



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
INSENERITEADUSKOND
Ehituse ja arhitektuuri instituut

**FOTOGRAMM-MEETRIA RAKENDAMINE
HOONETE RENOVEERIMISEL PIIRKONNA
TASEMEL**

**APPLICATION OF PHOTOGRAMMETRY IN BUILDING
RENOVATION AT THE REGIONAL LEVEL**

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Kädi-Riin Vendel

Üliõpilaskood: 182244EAEI

Juhendaja: Ergo Pikas

Tallinn 2023

AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

Lõputöö alusel ei ole varem kutse- või teaduskraadi või inseneriplomiti taotletud.

Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud.

8. mai 2023

Autor:

.....
/ allkiri /

Töö vastab magistritööle esitatud nõuetele.

"....." 20.....

Juhendaja:

.....
/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

"....."20... .

Kaitsmiskomisjoni esimees:

.....
/ nimi ja allkiri /

LIHTLITSENTS LÕPUTÖÖ REPRODUTSEERIMISEKS JA LÕPUTÖÖ ÜLDSUSELE KÄTTESAADAVAKS TEGEMISEKS

Mina, Kädi-Riin Vendel,

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose **Fotogramm-meetria rakendamine hoonete renoveerimisel piirkonna tasemel**, mille juhendaja on Ergo Pikas
 - 1.1 reprodutseerimiseks lõputöö säilitamise ja elektroonse avaldamise eesmärgil, sh Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogusse lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;
 - 1.2 üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tallinna Tehnikaülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogu kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.
2. Olen teadlik, et käesoleva lihtlitsentsi punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.
3. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest ning muudest õigusaktidest tulenevaid õigusi.

08.05.2023

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: **KÄDI-RIIN VENDEL**Üliõpilaskood **182244EAEI**Õppekava: **EAEI02 Ehitiste projekteerimine ja ehitusjuhtimine**

Peaeriala: Ehitusjuhtimine

Lõputöö teema:

**FOTOGRAMM-MEETRIA RAKENDAMINE HOONETE RENOVEERIMISEL
PIIRKONNA TASEMEL**

Application of photogrammetry in building renovation at the regional level

Juhendaja: **Ergo Pikas**

ergo.pikas@taltech.ee

Lõputöö konsultandid:

Tiitel või ametikoht, Ees- ja
PerekonnanimiKontakt (e-post või
telefon)

Allkiri ja kuupäev

Vaiko Veeleid
Hades Geodeesia OÜ

vaiko@hades.ee

Lõputöö põhieesmärgid:

1. Hinnata fotogramm-meetria rakendamise võimalikkust ja mõistlikkust hoonete renoveerimisel energiatõhususe parandamise eesmärgil.
2. Uurida, mil määral ning mis otstarvetel kasutatakse aerofotogramm-meetriaid hetkel Eesti ehitussektoris.
3. Välja selgitada, millist renoveerimiseks olulist informatsiooni on võimalik fotogramm-meetriselt koostatud mudelist saada.

Töö keel: eesti keel

Lõputöö etapid ja ajakava:

Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1. Sissejuhatus	08.05.2023
2. Ülevaade renoveerimise vajalikkusest ja rekonstrueerimisstrateegiast Eestis	01.03.2023
3. Ülevaade renoveerimist soodustavatest digitaalsetest lahendustest	01.04.2023
4. Fotogramm-meetria protsessi kirjeldus ja rakendus ehitussektoris	01.04.2023
5. Intervjuude läbiviimine analüüsimaks droonimõõdistuste rakendamist ehitussektoris	14.04.2023
6. Aerofotogramm-meetriliste mudelite analüüsimine	08.05.2023
7. Kokkuvõte eesti keeles	08.05.2023
Kokkuvõte inglise keeles	08.05.2023

Lõputööde ülevaatus, mille läbimine on kaitsmise eelduseks

11.05.2023

Peale ülevaatus saab teha väiksemaid korrekture ja üles laadida töö Moodle keskkonda plagiadi kontrolliks.

Esitlusmaterjalid kaitsmisel: Powerpoint esitlus ja jaotusmaterjalid

Kirjeldus	Tähtaeg
1 Powerpoint esitlus ja jaotusmaterjalid	10.05.2023

Lõputöö esitamise tähtaeg:

22. mai 2023

Lõputöö ülesanne välja antud: 02.02.2023

Juhendaja: **Ergo Pikas**

Ülesande vastu võtnud: **Kädi-Riin Vendel**

Avalikustamise piirangu tingimused: puuduvad

SISUKORD

AUTORIDEKLARATSIOON.....	2
Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks.....	3
SISUKORD	6
EESSÕNA.....	8
LÜHENDITE JA TÄHISTE LOETELU	9
TABELITE LOETELU	10
JOONISTE LOETELU.....	11
SISSEJUHATUS	12
1. KIRJANDUSE ÜLEVAADE	13
1.1 Rohepööre ja renoveerimislaine	13
1.2 Ehitussektori digitaliseerimine	16
1.2.1 Digitaliseerituse ülevaade ja väljakutsed	16
1.2.2 Digitaliseerimine energiatõhususe saavutamiseks ja renoveerimiseks	18
1.2.3 Eesti e-ehituse platvorm	19
1.3 Fotogramm-meetria	22
1.3.1 Protsessi kirjeldus.....	23
1.3.2 Juhtumianalüüsid: fotogramm-meetria rakendamine linnaplaneerimises ja hoonete renoveerimisel.....	28
1.4 Kirjanduse analüüsi lühikokkuvõte.....	33
2. METODOLOOGIA.....	34
2.1 Intervjueeritud ettevõtete valim.....	34
2.2 Analüüsitud mudelite valim	35
2.2.1 Kriteeriumid	37
3. DROONIMÕÕDISTUSE HETKESEIS EESTI EHITUSSEKTORIS	41
3.1 Kasutusotstarbed	41
3.2 Tehnoloogia valik	42
3.3 Kasutuskogemused.....	44
3.4 Intervjuude lühikokkuvõte	47
4. AEROFOTOGRAMM-MEETRILISTE 3D MUDELITE ANALÜÜS.....	49
4.2 Tulemused	49
4.2.1 Avatäited	49
4.2.2 Soojuspumbad.....	51
4.2.3 Hoone pikkus ja laius.....	53
4.2.4 Päikesepaneelid.....	55

4.2.5 Rõdud ja lodžad	56
4.2.6 Mudelite võrdlus	58
4.3 Tulemuste lühikokkuvõte	62
KOKKUVÕTE	64
SUMMARY	66
KASUTATUD KIRJANDUS.....	68

EESSÕNA

Käesoleva lõputöö teema pakkus välja juhendaja Ergo Pikas eesmärgiga paremini mõista fotogramm-meetria rakendatavust järgmistel aastakümnetel eesootava renoveerimismahu dokumenteerimisel ja haldamisel.

Soovin tänada juhendajat Ergo Pikast, ning Elisa Ilistet aja- ja asjakohase tagasiside ning soovitude eest lõputöö koostamise vältel. Samuti soovin tänada lõputöö konsultanti Vaiko Veeleidu ettevõttest Hades Geodeesia OÜ, kes pakkus tehnoloogilist tuge ja hankis lõputöö raames teostatud analüüsi jaoks alusmaterjalid.

Võtmesõnad: renoveerimine, Ehitisregister, fotogramm-meetria, droonimõõdistus, magistritöö.

LÜHENDITE JA TÄHISTE LOETELU

- 2D – kahemõõtmeline
- 3D – kolmemõõtmeline
- BIM – ehitusinformatsiooni modelleerimine, ehitusinformatsiooni haldamine, ehituse infomudel (ingl. *Building Information Modelling, Building Information Management, Building Information Model*)
- cm – sentimeeter, pikkusühik, $\frac{1}{100}$ meetrit
- DSM – digitaalne pinnamudel (ingl. *Digital Surface Model*)
- EHR – Ehitisregister
- GNSS – ülemaailmne satelliitnavigatsioonisüsteem (ingl. *Global Navigation Satellite System*)
- GPS – ülemaailmne asukoha määramise süsteem (ingl. *Global Positioning System*)
- GSD – parameeter, mis väljendab kahe järjestikuse piksli tsentrite vahekaugust mõõdetuna maapinnalt (ingl. *Ground Sampling Distance*)
- IT – infotehnoloogia
- JPEG – failiformaat
- km² – ruutkilomeeter, pindalaühik
- LOD – hoone detailsusaste (ingl. *Level of Detail*)
- m – meeter, pikkusühik
- mm – millimeeter, pikkusühik, $\frac{1}{1000}$ meetrit
- m/s – meetrit sekundis, kiirusühik
- px – piksel, mõõtühik, pildi vähim kahemõõtmeline element, millele saab sõltumatult kinnistada tunnuseid
- TI – tehisintellekt
- UAV – mehitamata õhusõiduk (ingl. *unmanned aerial vehicle*)

TABELITE LOETELU

Tabel 1.1 Hoonete detailsusastmete karakteristikud	21
Tabel 1.2 Juhtumite võrdlus.....	32
Tabel 2.1 Läbiviidud intervjuud.....	35
Tabel 2.2 Analüüsitava 3D mudelite võrdlus	35
Tabel 2.3 Mudelite analüüsiks kasutatavad kriteeriumid	38
Tabel 4.1 Hoonete pikkuse ja laiuse võrdlus.....	53

JOONISTE LOETELU

Joonis 1.1 Keskmise aastane täieliku renoveerimise osakaal korterelamute renoveerimisel kasutuslubade või kasutusteatiste alusel aastatel 2011-2018 võrreldes vajaliku osakaaluga rekonstrueerimisstrateegia elluviimiseks	14
Joonis 1.2 Tehisintellekti kasutamise määr ettevõtetes ning prognoositud investeeringute kasv erinevate sektorite lõikes.....	17
Joonis 1.3 EHR 3D kaksiku detailsus	22
Joonis 1.4 Fotogramm-meetrilise mõõdistuse raamistik.....	24
Joonis 1.5 GSD väärtuse võrdlus: vasakpoolsel pildil on GSD väärtus 5cm/px, parempoolsel 30 cm/px	26
Joonis 2.1 Näide juhuslike klastritega hoonete valimist	37
Joonis 2.2 Näited olukordadest mudelis, mis raskendavad informatsiooni hankimist.....	40
Joonis 3.1 Droonitehnoloogia kasutuselevõttu investeeritud summa ettevõtete lõikes	44
Joonis 4.1 Akende seisukorra hinnatavus mudelist	50
Joonis 4.2 Akende seisukorra hinnangu valideerimine	51
Joonis 4.3 Soojuspumba olemasolu määratavus mudelist	52
Joonis 4.4 Näide mudelist tuvastatud soojuspumpadest	52
Joonis 4.5 EHR-i kantud andmed mudelist tuvastatud soojuspumpade kohta	53
Joonis 4.6 Päikesepaneelide olemasolu määratavus mudelist	55
Joonis 4.7 EHR-i kantud andmed mudelist tuvastatud päikesepaneelide kohta	56
Joonis 4.8 Näide päikesepaneelide detailsuse kohta mudelis	56
Joonis 4.9 Rõdude või lodžade olemasolu määratavus mudelist	57
Joonis 4.10 Näide rõdude ja lodžade mõjust hoone geomeetria ja tekstuurile.	57
Joonis 4.11 Näide erinevusest liitekohtade pikkuste määratavuses.....	58
Joonis 4.12 Näide erinevusest mudeli kvaliteedis erinevatel veebilehtedel	59
Joonis 4.13 Päikese mõju hoone fassaadidele erinevatel külgedel	60
Joonis 4.14 Näited mudelite üldisest kvaliteedist.....	61

SISSEJUHATUS

Käesoleva lõputöö aktuaalsus tuleneb Euroopa Liidu eesmärgist saavutada 2050. aastaks kliimaneutraalsus. Sihini jõudmiseks tuleb fookusesse seada hoonete energiatõhususnõuete täitmine, kuna hoonete energiatarbimine moodustab Euroopa Liidus ligikaudu 40% kogu energiatarbimisest [1], olles seega suurim tarbija ja suurima potentsiaaliga valdkond kasvuhoonegaaside emissioonide vähendamiseks.

Lisaks uusehitistele peavad kehtestatud tähtsiks energiatõhususe miinimumnõudeid täitma ka olemasolevad hooned, mis väljendub Eestis kogu enne 2000. aastat ehitatud hoonefondi rekonstrueerimisega vähemalt energiamärgise C-klassile vastavaks. See hõlmab ligikaudu 141 000 hoone renoveerimist 30 aasta jooksul, neist 14 000 korterelamud [3]. Mahuka ettevõtmise soodustamiseks on tarvis kasutusele võtta digitaalsed abivahendid, mis aitavad protsessi tõhusamaks muuta.

Ehitussektor on teiste sektoritega võrreldes küll madalama digitaliseeritusastmega [5], kuid elukaare üleselt on palju potentsiaali ehitusprotsessi automatiseerimiseks ja digitaliseerimiseks. Hoonete renoveerimisel saab ühe võimalusena rakendada fotogramm-meetriat, mis on kulutõhus ja kiire viis lähteolukorra kaardistamiseks. Kui hetkel kasutatakse selleks enamjaolt laserskaneerimist, siis fotogramm-meetria kasutamine võib pakkuda olulist rahalist säästu [34], seda eriti kõrghoonete ja piirkondade mõõdistamisel.

Käesolev lõputöö keskendub fotogramm-meetria rakendusvõimaluste kaardistamisele hoonete renoveerimisprotsesside toetamiseks ning sellest tulenevate võimaluste ja kasu leidmisele ja analüüsimisele. Fotogramm-meetrilise mõõdistuse abil genereeritud mudeliga paralleelselt otsitakse võimalusi hoonefondi digitaalse kaksiku detailsuse tõstmiseks, et suurendada kaksikust kättesaadava renoveerimiseks vajaliku lähteinfo täpsust.

Töös otsitakse vastuseid järgnevatele küsimustele:

1. Millistel otstarvetel rakendatakse fotogramm-meetriat ehituses ning millisel määral tehakse seda Eesti ehitussektoris?
2. Millised on võimalused ja väljakutsed fotogramm-meetria rakendamiseks piirkonna tasemel hoonete renoveerimiseks?
3. Millist hoonete renoveerimiseks kasulikku infot on võimalik fotogramm-meetriliselt koostatud mudelist saada ning milline on selle info detailsus?

1. KIRJANDUSE ÜLEVAADE

Teoreetilises osas antakse esmalt ülevaade hoonete renoveerimise tähtsusest ja eesmärkidest Euroopa Liidu roheleppe kontekstis, täpsemalt tutvustatakse korterelamute renoveerimise statistikat Eestis. Seejärel kirjeldatakse ehitussektoris kasutatavaid digitaalseid lahendusi, süvitsi antakse ülevaade fotogramm-meetriast, selle kasutamise plussidest ja miinustest võrreldes teiste tehnoloogiatega.

1.1 Rohepööre ja renoveerimislaine

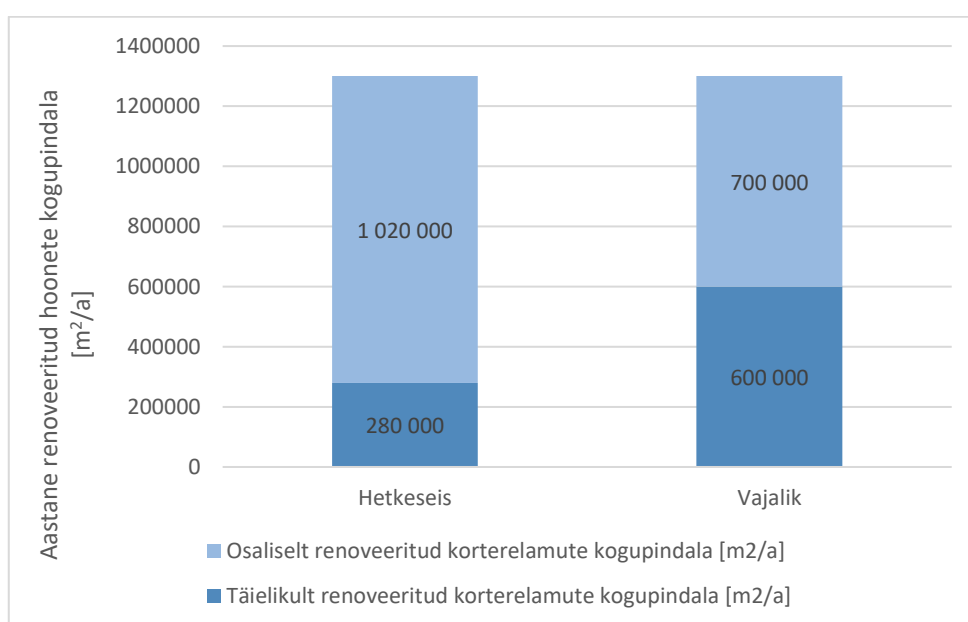
Euroopa on seadnud endale eesmärgiks saada 2050. aastaks esimeseks kliimaneutraalseks maailmajaoks. Selle saavutamiseks on Euroopa Liidu liikmesriigid vastu võtnud „Euroopa roheline kokkuleppe“ ehk roheleppe, mille peamiseks eesmärgiks on 21. sajandi keskpaigaks elimineerida kasvuhoonegaaside netoheide säilitades samal ajal majanduskasv [1]. Eelkõige ühtib see 2015. aasta globaalse Pariisi kokkuleppega kliimamuutuste leevendamiseks, andes liikmesriikidele veelgi täpsemad suunised eesmärgini jõudmiseks.

Üheks võimalikuks meetmeks kasvuhoonegaaside emissioonide minimeerimisel on hoonete energiatõhususe parandamine. Euroopa Komisjoni andmetel moodustab hoonetega seotud energiatarbimine 40% Euroopa Liidu kogutarbimisest [1]. Seepärast on antud sektori fookusesse seadmine loogiline – nii on positiivse mõju avaldamise tõenäosus suurem ja rakendatavad abinõud tõhusamad. Saavutamaks 30 aastaga kliimaneutraalsus tuleb erilist rõhku panna hoonefondi renoveerimisele, mis aitaks olemasolevate ehitiste energiakulusid märkimisväärselt vähendada. 2021. aasta andmete järgselt ei ole ligi 75% hoonetest Euroopa Liidus energiatõhusad, neist renoveeritakse aastas vaid 1% [2]. Eesmärgi täitmiseks on liikmesriigid välja töötanud pikaajalised renoveerimisstrateegiad, milles tuuakse esile renoveerimismahud ning eeldatavad majanduslikud ja keskkonnamõjud.

Eesti teadlaste ning ametnike koostöös valminud „Hoonete rekonstrueerimise pikaajaline strateegia“ seab sihiks kogu enne 21. sajandit ehitatud hoonefondi rekonstrueerimist vastavaks energiamärgise klassile C. See hõlmab endas ligi 141 000 hoone renoveerimist järgmise kolme kümnendi jooksul, millest 100 000 on üksikelamud, 14 000 korterelamud ning 27 000 mitteeluhooned. Ettenähtud ülesande täitmiseks tuleb renoveerimismahtu aastas kuni viiekordselt suurendada, see on saavutatav suurendades rekonstrueerimise osakaalu ehituses uusehitistega võrreldes [3].

Eeldatavasti ei ole ligi viiendikule renoveerimist vajavatest hoonetest C-klassile vastavate energiatõhususnõuete täitmine aastaks 2050 jõukohane, mistõttu tuleb vastavas mahus teisi hooneid rekonstrueerida veelgi sügavamalt energiatõhusaks [3]. Korterelamute renoveerimine on viimasel kümnendil eramutega võrreldes olnud edukam ning on võimalus, et just korterelamute arvelt on võimalik prognoositavaid puudujääke maksimumprogrammist kompenseerida.

Renoveerimiste arv on kümnendi jooksul olnud pidevas tõusus, ulatudes ligi 400 korterelamuni aastas. Kuigi trend on positiivne, on probleemseks faktiks see, et terviklike rekonstrueerimiste osakaal neist on liiga väike. Joonis 1.1 annab ülevaate osalise ja täieliku renoveerimise osakaalust korterelamute renoveerimisel.



Joonis 1.1 Keskmine aastane täieliku renoveerimise osakaal korterelamute renoveerimisel kasutuslubade või kasutusteatisel alusel aastatel 2011-2018 võrreldes vajaliku osakaaluga rekonstrueerimisstrateegia elluviimiseks [3]

„Rekonstrueerimistöde järgne kasutusluba või kasutusteatis võetakse aastas pindala alusel keskmiselt 1,3 mln m² korterelamutele, mis moodustab 4% enne 2000. aastat kasutusele võetud korterelamute pindalast. Eeldades, et terviklikult rekonstrueeritakse peamiselt toetuse abil, on aastate 2011-2018 keskmine terviklikult rekonstrueeritud korterelamute netopind 280 000 m², mis moodustab 1% enne 2000. aastat kasutusele võetud korterelamute pindalast. Strateegia eesmärgi täitmiseks vajalik keskmine aastane tervikliku rekonstrueerimise pindala on ~600 000 m² ehk siis ~2 korda suurem, kui praegune hinnanguline tervikliku rekonstrueerimise maht. Seega korterelamute

puhul ei olegi otseselt vaja tõsta rekonstrueerimistöid läbiviivate korterelamute arvu, vaid tõsta tuleks terviklike rekonstrueerimiste osakaalu. [3]"

Korterelamute terviklik renoveerimine hõlmab endas mitut energiasäästu toovat tööd - hoone piirdetarindite piisav soojustamine, akende vahetus kolmekordse klaaspaketiga akende vastu, küttesüsteemi uuendamine ning soojustagastusega ventilatsiooniagregaadi paigaldamine, et saavutada vähemalt energiamärgise C-klassi. Antud praktika on Eestis viimase 10 aasta jooksul produtseerinud häid tulemusi – see on endaga kaasa toonud üle 50% energiasäästu, soodsama sisekliima ja hoonete üleüldise energiatarbimise stabiliseerumise 15 aasta jooksul hoolimata hoonefondi igaastasest suurenemisest [3]. Mõistetavalt on korterelamute täielik renoveerimine aga väga suur rahaline väljaminek, mistõttu eelistavad paljud korteriomaniigid ja -ühistud osalise renoveerimise kasuks, mis ei ole aga Eesti rekonstrueerimise pikaajalise strateegia kohaselt jätkusuutlik [3].

Täieliku renoveerimise soodustamiseks on oluline välja töötada kestlikud meetmed. Eestis on võimalik taotleda korterelamute rekonstrueerimise toetust, mille abil on tänaseks renoveeritud 1114 hoonet. Taotluste arv kipub aasta-aastalt suurenema – ühe põhjusena võib välja tuua edukate rekonstrueerimisprojektide ilmumine naabruskonnas ning inimeste soov ka enda elamu seejärel energiatõhusamaks muuta. Kuigi toetus on oluliselt kasvatanud paljude omanike võimalusi rekonstrueerimistöde läbiviimiseks, tuleb tõdeda, et vahendid toetuste jagamiseks ei ole vastavuses taotlejate arvuga ning ammenduvad liiga kiiresti [3]. Seepärast on oluline kasutusele võtta digitaalsed tööriistad või uuenenud tehnoloogiad, mis aitavad tervikliku renoveerimise protsessi kulutõhusamaks muuta, olles seeläbi kättesaadavam rohkematele kinnisvaraomanikele ja aidates ühiskonda lähemale seatud keskkonna- ja majandusalastele eesmärkidele.

Üks viis seda tõhusamaks muuta on kohaldada traditsiooniliselt üksikehitistele suunatud renoveerimisprotsessi ajasäästu ning manuaalse töö vähendamise eesmärgil piirkonnale laiemalt [4]. Selle edukaks rakendamiseks on aga tarvis välja selgitada tegelik renoveerimismaht, mis hõlmaks informatsiooni nii hoonete seisukorra ja geomeetria kohta kui ka juba teostatud renoveerimistödest. Eeskätt on oluline koguda lihtsasti ja kiiresti ligipääsetavaid ning mõistetavaid energiatõhususlikult olulisi andmeid, näiteks akende seisukorra või soojuspumpade olemasolu kohta.

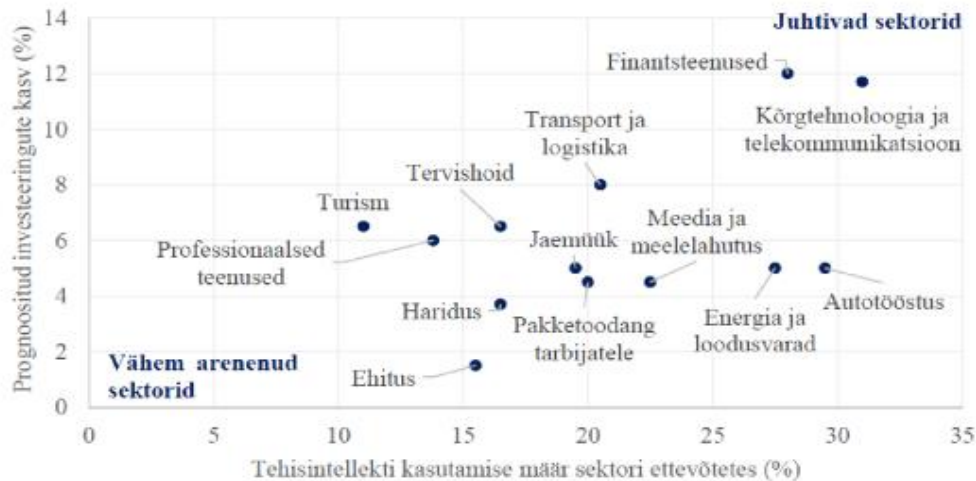
1.2 Ehitussektori digitaliseerimine

Selleks, et mõista, miks just digitaalsed tööriistad ja tehnoloogiad võivad olla kasulikud piirkonna tasemel renoveerimise edendamisel, tuleks esmalt pilk heita ehitussektori üldisele digitaliseeritusastmele. Innovatsiooni pärssivas ehitusvaldkonnas on kasutusel vaid loetud digitehnoloogiad ja potentsiaali uute integreerimiseks ning neist kasu lõikamiseks on palju. Renoveerimislaine valguses on Euroopa Liidus järjest rohkem hakatud rõhku panema just hoonete renoveerimist soodustavate tööriistade arengule.

1.2.1 Digitaliseerituse ülevaade ja väljakutsed

Ehitussektor on üks madalama digitaliseerituse astmega majandusvaldkondi. Vähene avatus tehnoloogilisele innovatsioonile on üheks põhjuseks, miks ehitussektor on madala tootlikkuse ning aeglase lisandväärtuse kasvuga [5]. Kui enamikes majandus- ja tööstusharudes on praegu fookuses Tööstus 4.0 tööstusrevolutsioon, peab ka ehitussektor tegema järjest suuremaid samme selleni jõudmiseks ja end innovatsioonile avama. Tööstus 4.0 kontseptsioon hõlmab endas füüsiliste varade digitaliseerimist ja ühtse digitaalse ökosüsteemi loomist, kus toimub pidev andmete analüüsimine ja jagamine [5]. „Tootlikkuse kasvu saavutamiseks ei piisa ainult IT-lahenduste kasutuselevõttust, vaid ettevõtted peavad muutma paralleelselt uute lahenduste kasutuselevõtmisega ka nii oma ärimudeleid kui ka äriprotsesse. Ehk teisisõnu – ehitusettevõtted peaksid samaaegselt tehnoloogiauuendustesse investeerimisega panustama samaväärselt nii protsessi- kui ka tooteinnovatsiooni. [5]“ Digitaliseerimise abil lisandväärtuse kasvu kiirendamine on aga seda olulisem, et ehitus- ja kinnisvaravaldkonna mõju ulatub ligi 45% kogumajandusest [4].

Vanemates sektorites on innovatsiooni algatamine märksa keerulisem kui uutes, kuna uuendustes nähakse ohtu olemasolevatele ärimudelitele või eksisteerivatele struktuuridele [5]. Ehitussektori ettevaatlikku hoiakut digitaliseerimise suhtes illustreerib madal panustamine tehisintellektil baseeruvate tehnoloogiate arendamisse või kasutuselevõttu. Näiteks on tehisintellekti (TI) kasutamine ehitussektoris küll levinum kui turismisektoris ja peaaegu võrdväärne haridus- ja tervishoiuvaldkonnaga, kuid sellesse prognoositavate investeeringute kasvumäär jääb selgelt teistele sektoritele alla [5]. Seda kinnitavad ka Euroopa Komisjoni poolt läbiviidud uuringu tulemused: kuigi tehnoloogiliste lahenduste kasutamise ning tootlikkuse suurenemise vahel ilmneb seos, pole paljud ettevõtted valmis nende rakendamiseks vajalikke investeeringuid tegema [6]. Erinevate sektorite võrdlus tehisintellekti kasutamise ja sellesse investeerimise kohta on kujutatud joonisel 1.2.



Joonis 1.2 Tehisintellekti kasutamise määr ettevõtetes ning prognoositud investeeringute kasv erinevate sektorite lõikes [5]

Üheks proovikiviks digitaliseerituse tõstmisel on andmete ühildumise parandamine. Kuigi hoonelt saadav andmete kogum on selle elukaare ulatuses suur, siis abivahendeid selle haldamiseks ja ühildamiseks napib [7]. „Arvatavalt on TI senise kasutuselevõtu üks olulisemaid takistusi olnud ühest küljest küll rohkete ehitusega seotud andmete ja andmebaaside olemasolu, kuid teisalt nende fragmenteeritud [---] paiknemine ning teineteisega mitteühildumine. See omakorda annab mõtteainet tulevikuks – ehitussektori lisandväärtust loova arengu vältimatuks eelduseks on väga heade, omavahel suhtlevate ja seotud ning riskasutuses olevate avaandmetel põhinevate andmebaaside olemasolu. Sellisel juhul saavad õppivad masinad ja algoritmid tulla appi ning aidata kavandada ja ehitada meie kõigi jaoks paremat hoonestatud keskkonda ning seda edaspidi ka paremini korras hoida. [5]“

Sektori arenguks tuleb tehnoloogiad juurutada ka ettevõtte tasandil, sest just ettevõtted on digitaliseerimise suurimad mõjutajad ehitusturul, juhindudes soovist ja vajadusest produktiivsust tõsta ning kulusid kontrolli all hoida [8]. „Digitaliseerimine aitab muuta ehituse kulud läbipaistvamaks ja ennustatavamaks ning paremini kättesaadavad andmed võimaldavad vältida ehitusprotsessis tekkivaid vigu. See on eelduseks kõrgtehnoloogiliste lahendustega energiatõhusate hoonete ehitamisele, kus on oluline tagada projekteeritud madal energiatarbimine hoone eksploatatsioonis, aga vältida ka materjalide ja ressursside raiskamist hoonete rajamisel. [4]“ 2017. aasta andmete kohaselt on teiste valdkondadega võrreldes ehitussektoris digitehnoloogia intensiivne kasutamine madalaim. Osaliselt on see tingitud sellest, et ehitussektoris on väikeettevõtete osakaal suurem ning Eestis ja mujal läbiviidud uuringute tulemused on

näidanud, et uuenduslike lahenduste rakendamine on just neis piiratud finants- ja inimressurside tõttu raskendatud [5].

Innovatsiooniprotsess on tugevalt mõjutatav ka riigi ja valitsuse poolt. Eesti on digiriigina tuntud terves maailmas ning võib öelda, et head eeldused digipöördeks on toimivate riigi e-teenuste süsteemide, aga ka ehitusalaste tippkeskuste ja klastrite moodustamisega loodud. Näiteks soodustab ettevõtete koondumine taolisesse arendus- ja koostöövõrgustikesse innovatsiooni levikut, mis omakorda kiirendab digitehnoloogiate kasutuselevõttu ja muudab sellesse suhtumist positiivsemaks [5]. Eesti ehitussektori arengudokumendis „Ehituse pikk vaade 2035“ tuuakse esile eraettevõtete ning ülikoolide teadusalase koostöö arendamist toetusmeetmete abil [6], mis on üheks innovaatilistesse lahendustesse investeringute kasvu alustaladeks.

1.2.2 Digitaliseerimine energiatõhususe saavutamiseks ja renoveerimiseks

Renoveerimisstrateegia elluviimisele aitab kaasa digitööriistade kasutuselevõtt. Madalale digitaliseeritusastmele vaatamata on ka ehitussektoris olemas juba levinud tööriistad või digitaalsed tehnoloogiad nagu näiteks ehitusinfo modelleerimine ehk BIM, punktipilve genereerimine, ühtsed andmekeskonnad. Energiatõhususe saavutamiseks ja renoveerimise hõlbustamiseks on soovitatav protsessi integreerida ka teisi lahendusi, näiteks digitaalset logiraamatut või digikaksikut. Saadava kasu suurendamiseks on vaja neid ka järjepidevalt täiustada ja edasi arendada.

Üheks renoveerimist soodustavaks tööriistaks on digitaalne logiraamat (ingl. *Digital Building Logbook*) – infosüsteem, mis on loodud terve elukaare vältel tekkinud hoonet, sealhulgas energiatõhusust, puudutava informatsiooni talletamiseks ja haldamiseks. See on oluline nii hoone energiatõhususe parandamiseks kui ka selleks, et teha informeeritud ja läbimõeldud otsuseid renoveerimisprotsessi käigus [7]. Samuti parandab digitaalne logiraamat info kättesaadavust ja läbipaistvust, suurendades seeläbi ka investorite huvi renoveerimisse panustamiseks [9]. Roheleppe ja renoveerimislaine kontekstis annab säärane andmebaas hea ülevaate hoonefondist kõigil tasanditel, võimaldab paremini hinnata energiatõhususe meetmete efektiivsust suurel skaalal, rakendada toetusmeetmeid, kehtestada strateegiaid ja jälgida kliimaeesmärkide saavutamisel tehtud edusamme [10].

Hoone energiamärgis on sertifikaat, mis tõendab hoone energiatarbimise hulka ja hindab selle energiatõhusust, võimaldades seeläbi hoonet teistega võrrelda. See motiveerib inimesi hoonet ostes või ehitades võtma arvesse ka energiatarbimist ja -

tõhusust [11]. Hoone renoveerimispass (ingl. *Building Renovation Passport*) on dokument, mis sisaldab konkreetse hoone pikaajalist ja järk-järgulist renoveerimisplaani, mis koostatakse koostöös hoone kasutajatega pärast energiaauditi läbi viimist. Renoveerimispassi peetakse energiamärgise edasiarenduseks, mis lisaks energiatarbimiselase info edastamisele annab omanikele kohandatud suuniseid ka hoone renoveerimiseks [9]. Lisaks juhistele hõlmab see endas ka renoveerimise tasuvusanalüüsi ning peaks seeläbi motiveerima rohkem omanikke teostama terviklikke renoveerimisi [12].

Digitaalne kaksik (ingl. *Digital Twin*) on füüsilise objekti digitaalne koopia, mis on rakendust leidnud erinevates tööstusharudes [13]. Ehitussektoris on digikaksik mudel, mille abil on võimalik ehitatud keskkonda visualiseerida, viia läbi simulatsioone ning selle planeerimist optimeerida [12]. Digikaksiku kasutamine vähendab ehitustegevuse planeerimiseks kuluvat aega, kuna „võimaldab kasutajal vaadata ehitisi ja ehitiste andmeid ümbritseva keskkonnaga seostatult, ka ajalises mõõtmes ehk erinevatel aegadel fikseeritud ja salvestatud seisu“, minimeerides seeläbi info killustatust [17]. Digikaksikud on kasutusel nii piirkonna kui ka üksikehitiste tasemel.

1.2.3 Eesti e-ehituse platvorm

Kuigi riigid on iseseisvalt hoonetelt kogutud informatsiooni andmebaasidesse talletanud juba varasemast, on digitaalne logiraamat Euroopa Liidu ülese tööriistana esile tõusnud just hiljutise renoveerimislaine valguses. Seetõttu pole ühtset vormi või mudelit digitaalse logiraamatu loomiseks veel välja töötatud [9]. Võimalikke väljundeid digitaalsele logiraamatule on hetkel seega mitmeid ning Eesti mõistes on tegemist e-ehituse platvormiga, mis on „kogu ehitise elukaare osaliste ja avaliku sektori infovahetuse kese [14]“. Üheks selle osaks on ka Ehitisregister, mille eesmärk ongi hooned puudutava informatsiooni talletamine ja kättesaadavuse parandamine. „Tarkade otsuste langetamiseks on vaja informatsiooni. Näiteks hoonete renoveerimise otsusteks on hea teada erinevate hoonegruppide energiakulu, olulisi konstruktsioone, materjale, omandisuhet, kui palju päikeseenergiat selle külgedele langeb, jne. Mida rohkem seda infot on, mida täielikum, ajakohasem ja korrektsem see on, seda vähem on otsustustes määramatust. Seda infot võib hankida näiteks uuringutega või analoogsetelt hoonetelt üle kandes. Kõige kiirem on aga infot ammutada infosüsteemist. Arvestades seda, et analoogseid otsuseid on vaja langetada nii eraisiku, kohaliku omavalitsuse, kinnisvarafirma kui riigi tasandil, on infosüsteemist info ammutamine ka odavam kui uuringu läbiviimine. [15]“

Võrreldes enamiku Euroopa riikidega on Eesti ehitisregister paremal tasemel. Kui näiteks Hispaanias ja Itaalias riiklikud registrid puuduvad või on need regionaalsete registritega võrreldes oluliselt sisuvaesemad [7], siis Eestis on olemas hea ülevaade kogu hoonefondist. Lisaks sellele on eelnimetatud riikidega võrreldes võimalik Eesti ehitisregistrist saada infot nii ehitise konstruktsioonide ning tehnosüsteemide kui ka energiamärgise kohta [16]. Samuti näitab ehitisregistri taset andmete avalikkus, mis aitab registrist pärineva info kasutamisest saadavat kasu maksimeerida. Mujal on andmed suures osas mitteavalikud [7].

Siiski on leitud, et Eesti ehitisregistrist pärinevad andmed on ebaühtlase kvaliteediga. Ühtlasema kvaliteediga on andmed hoone arvuliste näitajate kohta, näiteks ruumide pindalad või nende arv korterites, ebaühtlasem on aga näiteks konstruktsioonide liike või materjale puudutav info, kui üht tüüpi välisseina on registris nimetatud erinevalt ja 18% hoonetest ka valesti [17]. Kõikuva kvaliteedi üheks põhjuseks on kasutajate liigne valikuvabadus ja ebamäärasus andmete sisestamisel. „Põhjuseks võivad olla kasutajate puudujäägid teadmistes, kuid ka asjaolu, et EHR's on konstruktsioonide ja materjalide näitajate kirjeldused jäetud kasutajale interpretatsiooniks. [---] Selleks, et saada kasutajatelt kvaliteetset sisendit, oleks vaja kvaliteetseid kirjeldusi oodatud informatsioonist. Hoone mõõte kirjeldavate näitajate jaoks on EHR'is olemas kirjeldused, sama võiks laiendada ka teksti sisaldavatele parameetritele. [17]“ Osaliselt mängib rolli ka andmete kogumise viis ja materjalide, konstruktsiooniliikide jm teisiti nimetamine erinevate ajaperioodide vältel.

Lisaks osaliselt ebaühtlasele kvaliteedile esineb puudujääke ka info kättesaadavuses ehk registrisse kantud andmete olemasolus – uuring on näidanud, et 47% hoonetel on registrisse kandmata pikkus või laius, 43% on puudu hoone köetav pindala. 2011. andmete kohaselt oli kütteallikas nimetamata 53% hoonetest. Samuti puuduvad täielikult andmed rõdude ja lodžade ning avatäidete kohta – kuigi kortermajade tüüpse korruseplaani korral võib eeldada, et igas toas on üks aken, siis otsaseintes paiknevate akende olemasolu on raskem tuvastada [17]. Kõik eelnimetatud andmed on aga olulised hoone energiatõhususarvutuste teostamisel.

Olemasolevaid andmeid saaks veelgi täpsemalt esitada – näiteks on hetkel võimalik saada infot soojusallika või ventilatsiooni liigi kohta [16], kuid digitaalse logiraamatu tulevikus nähakse võimalust ammutada infot ka kasutatava seadme mudeli, mõõtmete, kaalu, vanuse, energiatarbimise, tekitatava müra jm kohta [18]. Samuti võiks logiraamatus kajastuda vähemalt palja silmaga antav hinnang välispiirete (katuse, välisseinte) seisukorrale – näiteks pragude või vajumite esinemine [9], rõdude ja lodžade puhul võiks anda esmase hinnangu varisemisohule [17]. Eelnev näide

illustreerib ka seda, et digitaalse logiraamatu andmestiku näol on tegemist osaliselt dünaamilise ehk ajas muutuva infoga. See tähendab, et andmeid tuleks perioodiliselt uuesti koguda ja süsteemis uuendada [18]. Siinkohal on soovitatav andmeid koguda piirkonna alusel, kasutades selleks tehnoloogiad, mis võimaldavad korduvat protsessi läbi viia kiiremini ja tõhusamalt kui hooneid üksikult vaadeldes – üks võimalus on kasutada selleks fotogramm-meetriat.

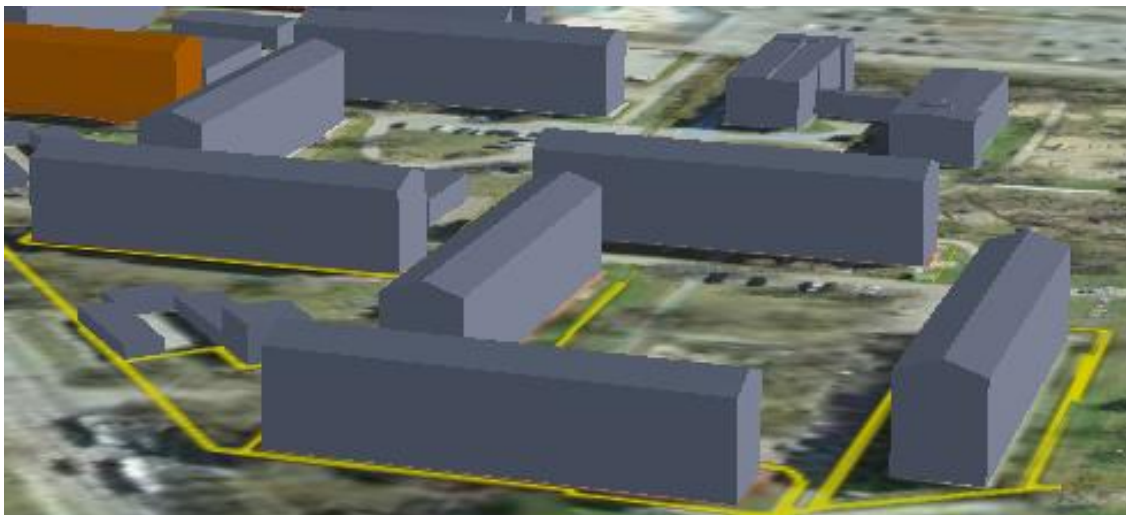
Digitaalse logiraamatuga paralleelselt edastab renoveerimist puudutavat infot ka digitaalne kaksik. Eestil on avalikult kättesaadav kogu ehitatud keskkonna digitaalne 3D kaksik, mis üheskoos Luksemburgi digikaksikuga on esimene riikliku mõõtmega digitaalne kaksik maailmas [8].

Hoone detailsusastmed (LOD – ingl. *Level of Detail*) iseloomustavad infotaset, mida 3D mudel või kaksik edasi annab. Üldjuhul eristatakse tasemeid 0-3, kus igal järgneval astmel lisandub informatsiooni – LOD0 väljendab hoone tasapinnalist kujutist, LOD1 kolmemõõtmelist kujutist, LOD2 suudab eristada katusetüüpe ning LOD3 suudab lisaks kõigele eelnevale kujutada ka maapealseid konstruktsioone või detaile (nt aknaid, rõdusid) [19]. Tabelis 1.1 on esitatud detailsusastmete võrdlus.

Tabel 1.1 Hoonete detailsusastmete karakteristikud [19]

Tunnus Detailsusaste	2D kujutis	3D kujutis	Katusetüüpide eristus	Lisadetailid ja - konstruktsioonid
LOD0	X			
LOD1	X	X		
LOD2	X	X	X	
LOD3	X	X	X	X

Joonisel 1.3 on kujutatud Ehitisregistri 3D kaksikut, millel näha, et selle tänane täpsus vastab LOD2 detailsusastmele.



Joonis 1.3 EHR 3D kaksiku detailsus [20]

Piisava täpsuse saavutamiseks renoveerimiseks oluliste energiatõhususarvutuste teostamisel on tarvis arvesse võtta ka elementide nagu akende, välisuste, rõdude ja keldrikorruse olemasolu. Need andmed on olulised piirdetarindite liitekohtade joonsoojusläbivuse arvutusteks [4], mis omakorda edastavad infot hoone soojuskao kohta. LOD2 detailsusastmega mudel sellist infot ei kajasta, mis tähendab, et vastava info leidmiseks tuleb kasutada mitut erinevat allikat ja kulutada energiatõhususe hindamisele rohkem aega. Samuti võib erinevatest allikatest pärinev killustatud info olla kogutud erinevatel ajahetkedel, mis võib põhjustada tõrkeid andmete ühildamisel ning nende üheselt mõistmisel [21]. Eelnimetatud detailide kajastamiseks mudelis oleks tarvilik hoonefondi digikaksiku arendamine LOD3 detailsusastmele.

Sarnaselt digitaalsele logiraamatule oleks võimalik ehitatud keskkonna digitaalset kaksikut täiustada mõõdistatuna droonitehnoloogia, näiteks fotogramm-meetria abil, võimaldades lisaks andmete suuremal skaalal kogumisele ka lihtsustatud juurdepääsu raskesti ligipääsetavatele hoonetele [8].

1.3 Fotogramm-meetria

„Fotogramm-meetria on teadus, mis tegeleb objekti kuju, mõõtmete ja asendi määramisega fotode järgi. [22]“ Kuigi tegemist pole uue tehnoloogiaga, on fotogramm-meetria, sarnaselt teistele valdkondadele, viimastel aastakümnetel läbinud suure arenguhüppe automatiseerimise ja digitaliseerimise vallas. Kui esimesed aerofotod tehti 19. sajandi keskpaigas kuumaõhupallidelt [22], siis tänapäeval on valdavalt kasutatavaks seadmeks lennukid ja droonid.

Fotogramm-meetria on populaarne ortofotokaartide koostamisel, kuna sobib suurte maa-alade jäädvustamiseks. Tänapäevaks on see kasutusel ka linnaplaneerimises ja hoonete ehituses, eriti renoveerimisprojektides ning muinsuskaitsealuste hoonete lähteolukorra kaardistamiseks.

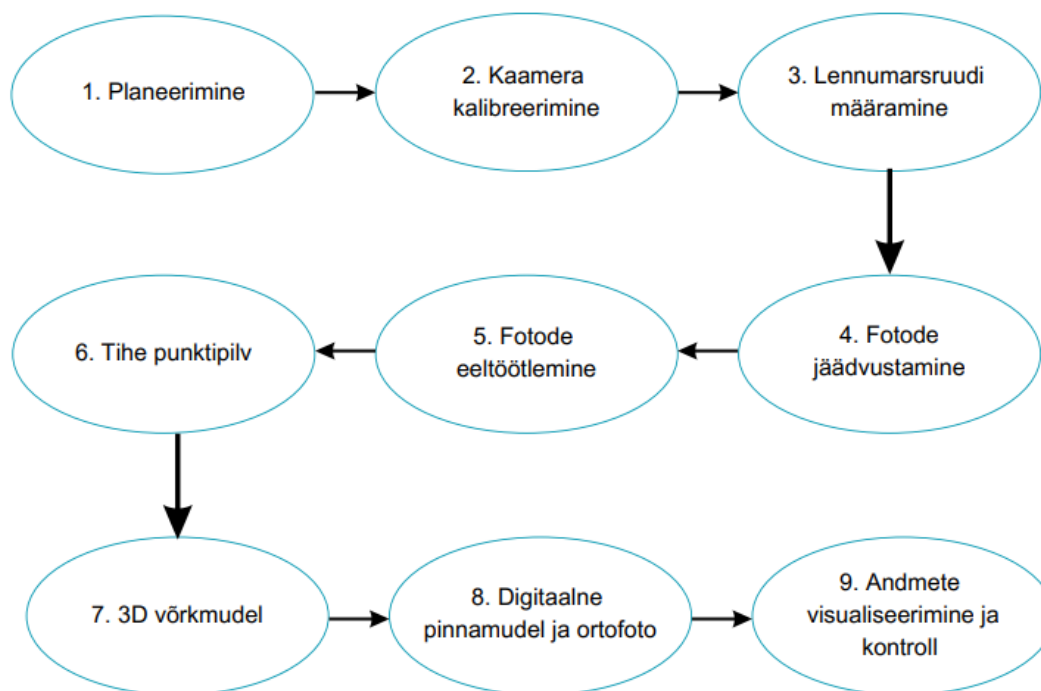
Fotogramm-meetrilise mõõdistuse alustalaks on objekti pildistamine. Selle järgi liigitatakse fotogramm-meetria järgmiselt [22]:

- aerofotogramm-meetria;
- fototeodoliit- ehk terrestriline fotogramm-meetria;
- satelliitfotogramm-meetria.

Esimene neist tähistab ülesvõtete tegemist lennukite või UAV (ingl. *unmanned aerial vehicle*) ehk mehitamata õhusõidukite abil õhust, teine pildistamist maapinnalt ning kolmas satelliitidelt. Fotogramm-meetria on seega küllaltki mitmekülgne ja rakendatav nii lähi- kui ka kaugobjektide kaardistamiseks ja uurimiseks. Aerofotogramm-meetria eelisteks peetakse automatiseerimise võimalust, fotokujutise objektiivsust, saadava informatsiooni suuremat mahtu ning välitööde mahu vähenemist [22].

1.3.1 Protsessi kirjeldus

Fotogramm-meetrilise mõõdistuse raamistik on esitatud joonisel 1.4. Töövoopõhimõtteks on objektist täpse kolmemõõtmelise informatsiooni ammutamine kahemõõtmeliste kujutiste ehk fotode kaudu [23].



Joonis 1.4 Fotogramm-meetrilise mõõdistuse raamistik [24]

Protsess saab alguse projekti planeerimisest – soovitud lõpptulemuse, info detailsuse välja selgitamisest. Seejärel seadistatakse kaamera ning määratakse droonilennu parameetrid (marsruut, lennukõrgus). Soovituslik on enne aeropildistamise algust veenduda, et tarkvarad ja seadmed toimivad korrektselt ning protseduuri teostamiseks on sobivad ilmastikuolud ning valgus. Pildistatakse objekti kohal või ümber selle perimeetri erinevatelt kõrgustelt piisava ülekattega [24]. Eeltöötamise käigus kontrollitakse fotode kvaliteeti ning ühtlustatakse vajadusel nende orientatsiooni või valgustust, ebasobivad pildid eemaldatakse seeriast [23]. Järgmiste sammudena genereeritakse punktipilv ja võrkudel, mis puhastatakse üleliigsest infost enne BIM mudelina kasutuselevõttu. Vajadusel koostatakse ka digitaalne pinnamudel DSM (*ingl. Digital Surface Model*) ja ortomosaiik. Andmete töötlemise ja visualiseerimise etapis kontrollitakse saadud tulemuste täpsust ja õigsust, fotorealistlikuma tulemuse tagamiseks renderdatakse (*ingl. rendering*) mudelit [24].

Esimeseks sammuks fotogramm-meetrilise mõõdistuse läbiviimisel on selle ettevalmistamine. Oluline on kaalutleda, milliseid protsesse ja tegevusi on võimalik automatiseerida. See vähendab hilisemat välitööde mahtu ning aitab protsessi teostada läbimõeldumalt.

Kaamerasüsteemi valik on üheks esmaseks tegevuseks lennu kavandamisel. Aerofotogramm-meetrias eristatakse valdavalt kaht tüüpi kaamerasüsteeme [25]:

- üksikvõttesüsteem (ingl. *frame camera imaging system*);
- panoraamsüsteem (ingl. *line scanner imaging system*).

Nimestki tulenevalt kasutab üks süsteem objekti jäädvustamiseks rohkelt ülekattega üksikvõtteid erinevatelt positsioonidelt, millest moodustub fotoseeria. Teine jäädvustab objekti järjestikku pidevas liikumises kaamera lennusuunal ning moodustub panoraamvõte. [25] Ühe või teise süsteemi eelistamine sõltub pildistatavast objektist ning soovitud lõpp-tulemusest – panoraamvõtteid on sobivamad suure maa-ala jäädvustamiseks ning kaartide loomiseks, üksikvõtteid kasutatakse väiksemate kolmemõõtmeliste objektide, näiteks hoonete, pildistamiseks. Käesolevas lõputöös keskendutakse sel põhjusel üksikvõttesüsteemile.

Kaamera valikul on põhilisteks kriteeriumiteks objektiivi fookuskaugus ja kaamera sensor, mille omavahelisest kombineerimisest sõltub kaamera vaatevälja ja kaadri suurus. Samuti on otstarbekas teha valik kaamera või drooni kasuks, millel on sisseehitatud GPS (*ingl. Global Positioning System*), mis annab kogutud andmetele automaatselt lisamõõtme geodeetilise info näol. Ühtlasi vähendab see hiljem info töötlemisele kuluvat aega [26].

Lennurežiim võimaldab protsessi automatiseerida. Väikesemõõtmelise UAV korral on valida kolme lennurežiimi vahel [27]:

- manuaalne lennurežiim;
- poolautomaatne lennurežiim;
- automaatne lennurežiim.

Manuaalse lennurežiimi puhul juhib operaator drooni täielikult kaugjuhtimispuldi abil ning jälgib ühtlasi ka kütuse jääki või aku kestvust, raadioside püsimist. Poolautomaatse režiimi korral võib operaator anda suuna- ja kiirusalaseid käske, kuid droon on ise stabiliseeritum ning ei ole nii suurel määral mõjutatud tuulest. Automaatse lennurežiimi korral sisestatakse koordinaatsüsteemis asuvatest punktidest koosnev lennutrajektor süsteemi ning UAV järgib seda automaatselt, täiendavaid juhised pole vajalikud. Viimane neist võib anda fotogramm-meetria vaatenurgast parima tulemuse, kuna lennutrajektor on täpne ja kontrollitud [27].

Fotode detailsuse määramisel on oluliseks parameetrik GSD (*ingl. Ground Sampling Distance*), mis väljendab kahe järjestikuse piksli tsentrite vahekaugust maapinnalt mõõdetuna. Oluline on soovitud GSD väärtus enne fotode jäädvustamist paika seada, kuna sellest oleneb, milliselt distantilt tuleks objekti pildistada. Väiksem GSD väärtus vastab foto suuremale detailsusele, näiteks väljendab GSD väärtus 1,4

cm/px seda, et fotolt on võimalik tuvastada 1,4 cm suurune objekt [26]. Väiksema GSD väärtuse saavutamiseks tuleb jäädvustused teha objektile lähedamalt või kasutada parema resolutsiooniga kaamerat. Maapinna kõrguslike erinevuste või kaameranurga muutuste tõttu võivad ka ühelt kõrguselt tehtud fotod GSD väärtuse poolest erineda, seepärast ühtlustatakse see protsessi hilisemas faasis ning kasutatakse väärtuste aritmeetilist keskmist [28]. Joonis 1.5 annab ettekujutuse, kuidas saab GSD abil väljendada foto resolutsiooni ja kvaliteeti.



Joonis 1.5 GSD väärtuse võrdlus: vasakpoolsel pildil on GSD väärtus 5cm/px, parempoolsel 30 cm/px [28]

Lennutrajektor sõltub enamasti pildistatava objekti suuruselt ja kujult. Üksikobjekti korral on tarvilik kasutada ringikujulist trajektoori 360-kraadi ulatuses, maa-alade kaardistamisel on otstarbekam lennata paralleelsete joontena [27]. Positsioonid, millelt pildistada, seadistatakse tarkvara abil enne lennu toimumist [29]. Esimesena märgitakse lennu algus- ja lõpp-positsioon. Peale selle võib drooni liikumisele seada piire või kehtestada keelutsoon [27]. Lisaks tuleb arvesse võtta kasutatava seadme aku kestvus, kuna üldjuhul võimaldab see droonil lennata umbes 30 minuti kaupa [29].

Võimalikult täpse ülevaate saamiseks objektist on vaja koguda sobivaid andmeid - fotogramm-meetrilisest vaatepunktist kvaliteetseid fotosid. Üldjuhul annavad hilisemas töötamise faasis parima tulemuse fotod, mis on jäädvustatud objekti pinnaga risti 360-kraadi ulatuses erinevatelt kõrgustelt [29].

Fotode ülekatte piisaval määral tagamine on pildistamisel väga oluline. Soovituslik ülekate on 60-80% [29]. „Hästi tehtud fotodel on laial ülekattumisel põhiliselt kolm eesmärki. Esiteks tagab see kogu maa-ala katmise vaatepunktist, mis on vajalikud stereoskoopiliseks vaatlemiseks. [---] Teiseks võimaldab see kasutada iga foto tsentrit mosaiigi tegemisel. Kolmandaks, väike osaline kattumine järjestikku asuvate fotode vahel on vajalik, rajamaks täiendavat maapealset kontrolli fotogramm-meetriliseks triangulatsiooniks. [22]“ Väiksema väärtuse korral võib edasine protsess nurjuda, kuna tarkvara ei leia piisavalt sidepunkte ning ei suuda seepärast võrkumodelit või punktipilve

genereerida [29]. Süsteemsemaks jäädvustamiseks on võimalik protsessi automatiseerida. UAV on võimalik eelnevalt seadistada nii, et ülekate oleks iga foto vahel võrdne. Selle tulemusena saab koostada ühtlasema ning täpsema väljundi [29].

Ilm ja kellaeg mõjutavad fotogramm-meetrilist pildistamist samuti, kuna neist olenevalt võivad jäädvustatud fotod olla väga erinevad. „Aeropildistatakse selgetel, pilvitutel päevadel heades atmosfääritingimustes. [---] Vajalik faktor, mis võetakse arvesse, on pildistamise kellaeg ehk päikese kõrgus. Päikese madal asend annab pikki varje, mis on vastuvõetamatu, sest varjud teevad objektid raskesti määratavateks. Üldiselt on aeropildistamiseks optimaalne umbes 30° päikesenurk. [22]“ Aprillis on Tallinnas päike umbes 30-kraadise nurga all vahemikus kell 11-16, juulis kell 8-9 ja uuesti kell 17-18, oktoobris aga ainult kella 13 paiku [30]. Talvel on päike oluliselt madalamal, suvel jällegi liiga kõrgel. Kõige optimaalsem aeg pildistamiseks on Eestis seega varakevad. Aeropildistamine pole soovitatav vihma, udu ning tugeva tuulega [31]. Sellistes oludes võib kaamera pöördenurk varieeruda ligikaudu 10 kraadi, millest tulenevalt halveneb fotode resolutsioon, väheneb sidepunktide arv või komplitseerub nende tuvastamine [32].

Kontrollpunktid (ingl. *ground control points*) on teadaolevate koordinaatidega punktid, mis on vajalikud suurema täpsuse saavutamiseks punktipilve või 3D mudeli koostamisel. Need toetavad drooni sisseehitatud positsioneerimissüsteemi võimaldades hiljem kontrollida punktipilve punktide vastavust koordinaatsüsteemile [33]. Kontrollpunktid märgitakse maapinnale või objektile kasutades spetsiaalseid märgistusi või aerosoole.

Peale aeropildistamist saab alguse modelleerimise etapp. See on faas, mis on antud tehnoloogia juures kõige uuem, kuid mida implementeerides on võimalik fotogramm-meetriat palju tõhusamalt ning uutes valdkondades rakendada.

Fotode eeltöötlemine on info modelleerimise esimeseks sammuks enne punktipilve moodustamist tarkvara abil. Seda tehakse valdavalt manuaalselt – fotoseeriast eemaldatakse udused, ebaühtlase kvaliteediga fotod. Vajadusel kohendatakse fotode orientatsiooni või valgustust [23] ning salvestatakse need eelistatud failiformaati – analüüsid on näidanud, et parimaid tulemusi annavad JPEG-formaadis fotod [34].

Punktipilve ja võrkmodeli genereerimiseks sisestatakse sõelale jäänud fotod tarkvarasse. Punktipilvega on võimalik edasi anda detailset ruumilist infot, kuid madala struktuursuse tõttu arendatakse need üldjuhul edasi 3D võrkmodeliks. Ühe võimalusena saab geodeet või muu spetsialist punktipilve spetsiaalse tarkvara abil üleliigsest infost puhastada, nii et alles jääksid lihtsad ja konkreetsed konstruktsioonid. Selles etapis on

oluline osapooltel kokku leppida, millist ning millise detailsusastmega infot soovitakse säilitada, milline on kasutusel olev koordinaatsüsteem ja millist väljundit või failiformaati soovitakse edasiseks töötlemiseks. Alternatiivina võib punktipilve ka otse BIM tarkvarasse sisestada ning selles modelleerimiseks sobivaks redigeerida. Antud valiku eeliseks on failiformaadi ühtsus ning BIM projekteerija võimalus detailsusastet ise määrata [23].

Ortomosaik või digitaalne pinnamudel koostatakse tiheda punktipilve või sileda võrkmodeli põhjal. Punktipilve punktid interpoleeritakse ja saadakse DSM, millest omakorda genereeritakse peale ortorektifikatsiooni ehk drooni liikumise ja suhtelise kõrguse muutumisega seotud info eemaldamist ortomosaik [35]. Ortomosaik on kahemõõtmeline ja koosneb mitmetest ortofotodest. See annab kiire ülevaate ning on kasutusel näiteks ehitusobjektidel olukorra kaardistamisel.

3D mudel on üldjuhul üleliigsest infost veelgi rohkem puhastatud ja objektile on konkreetsed piirjooned. Objekti pinnal võib olla realistlik fotokujutis, siinkohal on soovitatav mudelit renderdada - seda kasutatakse geomeetria parandamiseks ja fotorealistlikuma mudeli loomiseks [24]. See samm ei ole kohustuslik, kuid aitab objekti paremini visualiseerida. Digikaksikute puhul on levinud fotokujutise puudumine, objekti pind on ühevärviline [20], mis lubab seda ümbritsevast keskkonnast paremini eristada. 3D mudeli detailsusastmed on selgitatud tabelis 1.1.

1.3.2 Näited fotogramm-meetria rakendamisest linnaplaneerimises ja hoonete renoveerimisel

Linnaruumi visualiseerimisel ja informatiivse digikaksiku loomisel on fotogramm-meetria kasutamisel seniseks takistuseks olnud see, et genereeritud 3D võrkmudel ei anna edasi kõrgtasemelist tähenduslikku ja struktuurilist teavet vektormudeli kujul. Seetõttu on piirkonna modelleerimisel siiani fotogramm-meetriaist laialdasemat kasutust leidnud laserskaneerimine [19]. Kuigi varasemalt on seda eelistatud täpsema punktipilve tõttu, siis hiljutised uuringud näitavad, et fotogramm-meetria abil koostatud punktipilved on laserskaneerimisega võrreldavad, erinedes vähem kui 10 mm [34]. Selle põhilisteks eelisteks laserskaneerimisega võrreldes on tehnoloogia kättesaadavus, väiksem maksumus, lühem lennuaeg ning võimekus mõõdistada (täpsemalt) ka kõrghooneid, milleni laserskannerid ei ulatu [23]. Siiski tuleb arvestada, et laserskaneerimine on sõltumatu ilmastikust ning valgusest ja võib seega teatud tingimustes pakkuda paremaid tulemusi [31].

Tšehhi (2016) juhtum [23]. Antud uurimus keskendus kolmekordse korterelamu fassaadi dokumenteerimisele ja kogutud info modelleerimisele, kusjuures võrreldi protsessi tulemusi laserskaneerimist ja fotogramm-meetriat kasutades. Uurimuse eesmärgiks on optimeerida renoveerimise protsessi – muuta see kiiremaks, kulutõhusamaks, elanike jaoks meeldivamaks ning vähendada tööde kestvust ehitusplatsil. Fotogramm-meetriline pildistamise objektiks oli üksik korterelamu, fotod jäädvustati kasutades 4 erinevat kaamerat nutitelefonist peegelkaamerani. Kaamerast sõltus nii genereerimiseks vajaminevate piltide arv, maht ja selleks kuluv aeg, mis varieerus 1,5 tunnist 20 tunnini, kui ka punktipilve tihedus. Tehnoloogiad andsid mõlemad rahuldavaid tulemusi, kallimate kaamerate poolt tehtud fotode tulemusel olid laserskaneerimisega võrreldes geomeetriliste punktide erinevused väiksemad kui 5 mm. Juhtumiuuring annab aimu kaamera valiku olulisusest objektiivse info saamiseks. Lisaks näitavad tulemused, et fotogramm-meetriat rakendades on võimalik jõuda laserskaneerimisega võrdsetele tulemustele oluliselt odavamalt – kui kaamera hinnad algavad umbes 2000 eurost, siis laserskannerid on kallimad kui 40 000 eurot.

USA (2021) juhtum [34]. Juhtumiuuring piirkonna 3D modelleerimiseks teostati Utah osariigi Brigham Young University ülikoolilinnakus 1,7 km² suurusel alal. Eesmärgiks oli luua realistlik mudel, mis aitaks säilitada linnaku arhitektuuri, optimeerida selle haldamist ja planeerimist ning tulevikus pakkuda hariduslikke ja tutvustavaid virtuaaltuure. Läbi viidi 29 droonilendu, mille ajal koguti 77 685 fotot. Lisaks aeropildistamisele jäädvustati fotosid ka maapinnalt. Kokku jäädvustati 125 527 fotot, neist 67% õhust ja 33% maapinnalt. Peale eeltöötlemist sisestati ContextCapture tarkvarasse ligikaudu 100 000 fotot. Neist omakorda umbes 20 000 fotot ei suutnud tarkvara mudelisse integreerida, mis tähendab, et jäädvustatud fotodest läks lõpuks mudelis kasutusse vaid 64%. Keskmine GSD väärtus lõpliku 3D võrkmodeli puhul oli 0,55 cm/px. Tulemused näitavad, et fotogramm-meetria eelistamine aerolaserskaneerimisele võib suuremahulise mõõdistuse korral tulemuseks anda 75% rahalise kokkuhoiu.

Nigeeria (2022) juhtum [26]. Antud uurimuse raames loodi linnaplaneerimise eesmärgil LOD1 tasemel digitaalne kaksik 0,23 km² suurusest piirkonnast. Mõõdistamiseks kasutati DJI Mavic 2 Pro drooni sisseehitatud kaamera ja positsioneerimissüsteemiga. Kaamera objektiivi fookuskaugus oli 35 mm. Kaalutletult valiti lennukõrguseks 61 m, mille tulemusena oli vaja teha vähem fotosid, mis omakorda vähendas lennuaega ning aku lühikesest kestvusest tulenevalt ka lendude arvu. Kogutud 470 fotost kasutas tarkvara väljundite loomiseks ära kõik ehk 100% fotodest. Saadud ortomosaigi ja digitaalse pinnamudeli puhul oli GSD väärtuseks 1,43 cm/px, mida on võimalik parandada madalamalt lennates. Loodud 3D mudeli abil visualiseeriti

piirkonna hoonete paiknemist ja kõrgust ning täheldati, et enam tuleks rõhku panna kõrgusesse ehitamisele, et optimeerida maakasutust. Kahjustuste ja deformatsioonide tuvastamisele kasutades fotogramm-meetriat. Kolme seeria läbiviimisel jäädvustati fotod erinevatelt distantsidelt erineva objektiiviga, et paremini mõista, millised parameetrid aitavad jõuda kahjustuste täpsema tuvastamiseni. Parima tulemuse andsid kõige lähedamalt ja suurima fookuskaugusega tehtud fotod. Uurimuse käigus saadi andmed näiteks pragude pindala, perimeetri, sügavuse, diameetri ja orientatsiooni kohta. Kuigi sarnase koguse punkte tihedas punktivilves genereerisid nii 5,7 m kauguselt tehtud fotod GSD väärtusega 0,12 cm/px ja 10 m kauguselt tehtud fotod GSD väärtusega 0,27 cm/px, siis pragude tuvastamisel olid erinevused kahe mudeli vahel kuni 15 mm. Autori hinnangul oli see märkimisväärne vahe. Mõõdistuse teostamisel eelistati fotogramm-meetriat laserskaneerimisele selle taskukohasuse ja protsessi lihtsuse tõttu.

Leedu, Poola (2023) juhtum [37]. Uurimuse eesmärk oli analüüsida fotogramm-meetria rakendatavust andmete kogumisel ja töötlemisel olemasolevatelt hoonetelt ning võrrelda seejuures fotogramm-meetrist ja BIM mudelit. Modelleeritavaks hooneks oli Vilniuse Gediminase Tehnikaülikooli õppehoone Leedus. Fotod jäädvustati drooni abil õhust, BIM mudel koostati tehnilise dokumentatsiooni ja täiendavate mõõdistuste põhjal. Fotogramm-meetrisel mudeli miinusena toodi välja ligipääs vaid hoone välisosale, samas võttis fotogramm-meetria mudeli koostamine aega 2 päeva, BIM mudeli koostamine aga 3 nädalat. Võrreldes kaht mudelit leiti, et suurimad vead näiteks avatäidete mõõtmete, välispiirete liitekohtade ja fassaadi piirjoonte korral on fotogramm-meetrisel mudelil väiksemad kui 10%. Kokkuvõttes oli fotogramm-meetria abil koostatud mudeli täpsus 98,98%. See annab aimu fotogramm-meetria rakendamise potentsiaalset kiire ülevaate saamiseks suurest hulgast andmetest näiteks hoonete renoveerimisel. Autori hinnangul võiks sellisel juhul teostada lisaks mõni traditsiooniline kontrollmõõdistus, et andmete õigsust kontrollida.

Lõuna-Korea (2020) juhtum [38]. Juhtumiuuring keskendus aerofotogramm-meetria abil traditsiooniliste puithoonete konstruktiivsete elementide mõõdistamisele, et dokumenteerida hoone konstruktiivset seisukorda. Kahjustused pärinevad peamiselt maavärinatest, tuulest aga ka putukate ja hallituseente tagajärjel. Kuna traditsioonilised mõõdistamise viisid mõõdulindi või lasermõõtja abil osutusid ajamahukaks ja kohati ka ohtlikuks, otsustati nendega võrrelda drooniga mõõdistamist. Parima tulemuse saavutamiseks katsetati parameetrite erinevaid väärtuseid: fotode jäädvustamise kiirust, kaameranurka, lennukiirust ja -kõrgust. Kõige rohkem mõjutasid tulemust kolm esimest ning optimaalsema tulemuse andsid 2-sekundiline kaadrisagedus, 45-kraadine kaameranurk ja 1 m/s lennukiirus. Võrreldes

traditsiooniliste mõõteviisidega jäid erinevused hoone ja selle elementide mõõtmete näol alla 1%, mis annab kindlust, et fotogramm-meetria abil on võimalik konstruktiivsete elementide mõõtmel ja stabiilsust hinnata. Seeläbi on võimalik ära hoida muinsukaitsealuste objektide kahjustamist nende hindamise eesmärgil.

Kirjeldatud näidetest selgub, et fotogramm-meetriat on võimalik rakendada erinevatel otstarvetel. Renoveerimise ja linnaplaneerimise kontekstis on seda juba rakendatud hoonete ja selle välispiirete lähteolukorra dokumenteerimiseks ja mõõtmiseks, näiteks tuvastamiseks kahjustuste, vajumite olemasolu ja suuruseid. Lisaks annab see võimaluse jäädvustada arhitektuuriliselt või ajalooliselt olulisi hooned ja mälestisi ning panustada nende säilimisse. Fotogramm-meetria võimaldab ka optimeerida piirkonna hoonestuse haldamist ja edasist planeerimist, samuti loob see võimaluse piirkonna virtuaalseks tutvustamiseks.

Eeltoodud näidetes võrreldakse fotogramm-meetriat ka laserskaneerimisega ning tuuakse välja, et lõpptulemused erinevad üksteisest piisavalt vähe, et fotogramm-meetria kasutamine rahalise kokkuhoiu eesmärgil oleks õigustatud. Juhtumite võrdlus on esitatud tabelis 1.2.

Tabel 1.2 Juhtumite võrdlus [23], [26], [34], [36], [37], [38]

Juhtum Tunnus	Tšehhi (2016)	USA (2021)	Nigeeria (2022)	Itaalia (2019)	Leedu, Poola (2023)	Lõuna-Korea (2020)
Eesmärk	Fassaadi dokumenteerimine renoveerimiseks	Ülikoolilinnaku säilitamine, haldamine, planeerimine, tutvustamine	Linnaplaneerimine	Kahjustuste ja deformatsioonide tuvastamine	Lähteolukorra dokumenteerimine olemasoleval hoonel	Konstruktivsete elementide mõõtmete ja stabiilsuse hindamine
Fotode jäädvustamise koht	Maapinnalt	Kombineeritult	Õhust	Maapinnalt	Õhust	Õhust
Kaamera mudel	Pentax 645D	Xenmuse X4S Inspire 2	Hasselblad L1D-20c	APS-C	N/A	Zenmuse X5R
Kaamera resolutsioon [Mpx]	40	20	20	20	N/A	16
Fotode jäädvustamiskaugus [m]	12	100; 50	61	5,7	N/A	6
Fotode eesmine ülekatte [%]	N/A	80	60	89	N/A	N/A
Fotode külgmine ülekatte [%]	N/A	80	75	59	N/A	N/A
Kaameraga jäädvustatud fotode arv	56	77 685	470	114	N/A	121
Kasutusse läinud fotode arv	56	64 857	470	N/A	N/A	121
Kasutusse läinud fotode osakaal [%]	100	83,5	100	N/A	N/A	100
GSD väärtus [cm/px]	13	0,55	1,43	0,12	N/A	N/A

1.4 Kirjanduse lühikokkuvõte

Kirjanduse ülevaates põhjendati vajadust hoonete renoveerimise protsessi tõhustamiseks, kirjeldati digitaliseerimise trende ja väljakutseid ning selgitati fotogramm-meetrilise mõõdistuse protsessi ja eeliseid.

Tulenevalt Euroopa Liidu roheleppest ning sellega seonduvatest direktiividest, ootab teiste liikmesriikide seas ka Eestit ees massiline hoonete renoveerimine energiatõhususe parandamise eesmärgil. Selleks, et rekonstrueerimisstrateegia seatud tähtjaks ellu viia, tuleb asjale läheneda suuremas mõõtmes ning optimeerida renoveerimise protsessi piirkonna alusel. Siinkohal tuleks abiks võtta digitaalsed tööriistad ja droonitehnoloogia.

Ehitussektori digitaliseerituse aste on üks madalamaid, mille tulemuseks on madal tootlikkus ja aeglane lisandväärtuse kasv. Renoveerimisväljakutsega silmitsi seistes tuleb aga digitaliseerimist üha enam töövoogudesse integreerida. Linnaplaneerimises ja renoveerimises tulevad kasuks digitaalne logiraamat ja digitaalne kaksik, mis muudavad ehitise elukaare vältel tekkinud info haldamist lihtsamaks ja kiiremaks. Kuigi Eestil on mõlemad tööriistad juba toimivad, on kasu maksimeerimiseks vaja neid pidevalt edasi arendada – ühe võimalusena süsteemide jaoks perioodiliselt uuendamist nõudvaid või seni puuduolevaid andmeid koguda on kasutada selleks drone ja fotogramm-meetriat.

Fotogramm-meetria on mõõdistuse viis, mille eesmärgiks on kolmemõõtmelise informatsiooni kogumine kahemõõtmeliste kujutiste ehk fotode abil. Fotod kogutakse drooni abil ning genereeritakse tarkvara abil punktipilveks või võrkudeliks ja edasi 3D mudeliks. Näidetest selgub, et fotogramm-meetrilise mõõdistuse erinevaid väljundeid on võimalik kasutada nii lähteolukorra dokumenteerimiseks ja kahjustuste tuvastamiseks kui ka linnaplaneerimiseks, arhitektuuri-, ajaloo-, ja kultuurimälestiste säilitamiseks ja tutvustamiseks ning hoonete haldamiseks. Kui varasemalt on selleks eelistatud laserskaneerimist, siis uurimused leiavad, et fotogramm-meetriaga saadud tulemused on laserskaneerimisega võrreldavad, olles samaaegselt oluliselt odavamad.

2. METODOLOOGIA

Lõputöö eesmärgiks on saada vastused püstitatud küsimustele – kas ja kui palju rakendatakse fotogramm-meetria Eesti ehitussektoris, milliseid võimalusi, aga ka väljakutseid pakub fotogramm-meetria rakendamine hoonete renoveerimisel piirkonna tasemel ning millise detailsusega renoveerimiseks kasulikke infot on seejuures võimalik saada.

Esmalt koostatud kirjanduse ülevaade annab aimu hoonete renoveerimise vajadusest ning fotogramm-meetria olemusest ja võimalustest. Samuti esitatakse fotogramm-meetria rakendamise juhtumianalüüsid, mis kirjeldavad selle erinevaid kasutusotstarbeid.

Uurimusliku osa esimeses pooles viiakse läbi poolstruktureeritud intervjuud aeromöödistusega tegelevate ettevõtetega. Kvalitatiivsete intervjuude eesmärk ei ole koguda statistilist esinduslikku teavet, vaid uurida Eesti ehitussektoris droonimöödistusega tegelevate ettevõtete kogemusi droonitehnoloogiate rakendamisel. See annab ettekujutuse hetkeolukorrast Eesti ehitusturul. Vastuseid analüüsitakse ning võrreldakse kirjanduse ülevaates väljatooduga.

Uurimusliku osa teises pooles teostatakse aerofotogramm-meetrilise möödistuse tulemusena koostatud 3D piirkonnamudelite analüüs, et selgitada välja mudelilt andmete tuvastamise võimalikkus ning detailsus. Analüüsimiseks kasutatakse olemasolevaid mudeleid, droonilendu fotode jäädvustamiseks ei teostata. Esmalt selgitatakse kirjanduse ülevaate põhjal välja kriteeriumid, mille alusel mudelite analüüsi teostatakse. Seejärel analüüsitakse visuaalselt mitut erinevat mudelit, neis kõigis omakorda mitmeid erinevaid hooned. Tuvastatud andmetele vastavate kannete olemasolu kontrollitakse Ehitisregistris, võimaluse korral võrreldakse mudelist ja EHR-ist saadud andmeid. Saadud tulemusi analüüsitakse, selgitatakse välja analüüsimist segavad ja toetavad tegurid ning antakse üldine hinnang aerofotogramm-meetria sobivusele säärase andmete kogumiseks.

2.1 Intervjueeritud ettevõtete valim

Valimisse koondatakse erinevate tegevusaladega ettevõtted, kes kõik kasutavad mõnel otstarbel ka aeromöödistust. Tegevusaladeks on geodeesia, 3D-möödistamine ja modelleerimine, päkesepaneelidega integreeritud katusekattematerjalide tootmine, objekti seire teostamine. Informatsioon intervjuude kohta on esitatud tabelis 2.1.

Tabel 2.1 Läbiviidud intervjuud

Jrk	Ettevõtte tegevusala	Intervjuu kuupäev
1.	Geodeesia	22.03.2023
2.	3D-möödistamine	23.03.2023
3.	Päikesepaneelidega integreeritud katusekattematerjalide tootmine	10.04.2023
4.	Objekti seire teostamine	18.04.2023
5.	Geodeesia	22.04.2023

2.2 Analüüsitud mudelite valim

Piirkonna möödistamise korral on tulemus üksikobjekti möödistamisest erinev – keskendudes ühele objektile on mudeli detailsus kõrgem, kuid eesootavat renoveerimismahtu silmas pidades ei ole efektiivne hooneid eraldiseisvalt jäädvustada, kuna see oleks oluliselt ajamahukam ja kulukam. Seepärast keskendub analüüs just piirkonnamudelitele.

Analüüsitud mudelite valimisse kuuluvad aerofotogramm-meetrilised mudelid, mille alusmaterjaliks olevad fotod on jäädvustatud automaatse lennuplaani järgi 60-100 meetri kõrguselt. Osade möödistuste korral on lisaks teostatud ka manuaalne lend madalamal fassaadide jäädvustamiseks. Mudelis käsitletava maa-ala pindalad on ligikaudsed ja määratud Maa-ameti kaardirakenduse abil. Tabelis 2.2 on esitatud teave analüüsiks kasutatud mudelite kohta.

Tabel 2.2 Analüüsitud 3D mudelite võrdlus

Jrk	Piirkond	Pindala	Hoonete arv valimis	Lennu kõrgus	Aastaaeg
1.	Suur-Ameerika tn, Tallinn	0,22 km ²	32	100 m + madalam lend fassaadide jäädvustamiseks	Hilissügis/ varakevad

Jrk	Piirkond	Pindala	Hoonete arv valimis	Lennu kõrgus	Aastaaeg
2.	Liivalaia/Juhkentali tn, Tallinn	0,23 km ²	39	100 m + madalam lend fassaadide jäädvustamiseks	Suvi
3.	Männiku tee, Tallinn	0,02 km ²	6	60 m	Suvi
4.	Vanalinn, Tartu	0,11 km ²	32	70 m + madalam lend fassaadide jäädvustamiseks	Suvi
5.	Kesk tn, Elva	0,45 km ²	34	70 m	Suvi
6.	Kadriorg, Tallinn	1,34 km ²	33	90 m	Varasügis

Töö käigus ei analüüsita kõiki mudelis olevaid hooned, vaid koostatakse valim. Vaadeldud ala piiril paiknevad hooned on alati geomeetriselt mitteterviklikud. Hoonete valimisse kuuluvad seega hooned, mis paiknevad tervenisti mudelis, st nad ei asu vaadeldava ala piiril ja nende geomeetria terviklikkus ei ole sellest mõjutatud. Valimi koostamiseks jaotatakse mudel väiksematesse klastritesse, juhuslikult valitud klastrites analüüsitakse kõiki hooned. Valimis on nii avalikult kasutatavad hooned kui ka elamud. Joonisel 2.1 on kujutatud hoonete valimeid.



Joonis 2.1 Näide juhuslike klastritega hoonete valimist

2.2.1 Kriteeriumid

Selleks, et mudelist saadavat potentsiaalset kasu paremini mõista ja analüüsida, tuleks seada analüüsikriteeriumid. Kriteeriumid määratakse kirjanduse analüüsist selgunud teabe põhjal, mis määratleb Ehitisregistrist puuduolevaid andmeid, mida on aga vaja renoveerimisprojektide koostamisel energiatõhususarvutuste teostamiseks.

Kirjanduse analüüsist selgub, et Ehitisregistris on korter- ja ridaelamutelt sagedamini puudu andmed:

- 100% avatäited;
- 53% soojusallikad;
- 47% hoone pikkus või laius.

Avatäidete kohta ei leidu infot Ehitisregistris, samuti ei kuvata informatsiooni nende kohta LOD2 detailsusastmele vastavas e-ehituse platvormi digikaksikus. Aknad aga avaldavad olulist mõju energiatõhususarvutustele. Esimeses peatükis kirjeldatult on kõige raskemini tuvastatav korterelamute otsaseintes paiknevate akende olemasolu, samuti selgub, et tervikliku rekonstrueerimisega kaasnevate ehitustööde hulka kuulub ka akende vahetus. Tegelikult renoveerimismahust parema ülevaate saamiseks oleks tarvilik selgitada välja, millistel hoonetel on akende vahetus teostatud. Seeõttu on

esmaseks ülesandeks hankida mudelist informatsiooni akende mõõtmete, paiknemise ja seisukorra kohta.

Soojusallika liik on puudu enam kui pooltel hoonetel. Kui muude soojusallikate (katel, ahi) olemasolu on väljastpoolt keeruline kindlaks teha, siis fassaadil või katusel paiknevate soojuspumpade kohta võib olla võimalik teavet ka aerofotogramm-meetrilise mudeli abil hankida.

Pikkus ja laius on kindlasti mudelist mõõdetavad, kuid probleemiks võib osutuda niiviisi saadavate andmete täpsus.

Energiaallika liik on samuti lisaks eelnimetatule andmetele sageli puudu. Sarnaselt soojusallikaga on siinkohal potentsiaalselt tuvastatavad väljaspool hoonet asuvad päikesepaneelid, mis annaksid koheselt aimu vähemalt ühest kasutatavast energiaallika liigist – päikeseenergiast.

Rõdude ja lodžade olemasolu ei kajastu samuti Ehitisregistris ega LOD2 digikaksikus. Sarnaselt avatäidetega avaldavad nende olemasolu ja mõõtmed mõju energiatõhususarvutustele.

Tabel 2.3 Mudelite analüüsiks kasutatavad kriteeriumid

Jrk	Kriteerium	Andmeliik	Andmevorming
1.	Akende olemasolu otsaseinas	Avatäited	Jah/Ei
2.	Akende seisukorra hinnatavus	Avatäited	Jah/Ei
3.	Soojuspumpa olemasolu	Soojusallikas	Jah/Ei
4.	Hoone pikkuse ja laiuse täpsus	Pikkus ja laius	Hälve, 0,1 m
5.	Päikesepaneelide olemasolu	Energiaallikas	Jah/Ei
6.	Rõdude/lodžade olemasolu	Rõdud ja lodžad	Jah/Ei
7.	Välisseina-rõdu/lodža liitekoha pikkuse mõõdetavus	Rõdud ja lodžad	Jah/Ei

Analüüs viidakse läbi enamjaolt visuaalselt, et tuvastada seadmete ja rõdude või lodžade olemasolu ning akende paiknemist. Arvuliste näitajate (pikkuse ja laiuse)

täpsuse kontrollimiseks võetakse mudelist mõõdud ja võrreldakse neid Ehitisregistris olemasolevate andmetega.

Tuvastatud soojuspumpade ning päikesepaneelide korral kontrollitakse, kas nende olemasolule viitav mäрге on Ehitisregistrisse tehtud – soojusallikaks märgitud „soojuspump“ või energiaallikana märgitud „päikeseenergia“. Akende seisukorra hindamisel valideeritakse tulemust pisteliselt kasutades Google Maps kaardirakenduse *Street View* funktsiooni.

Juhul kui akende, soojuspumba või rõdude ja lodžade olemasolu või asukohta ei suudeta tuvastada, märgitakse ära ka selle peamine põhjus:

- „tekstuur“ – hoone või selle osa geomeetria on deformeerunud, ebaselge või esineb selles tühimikke;
- „varjud“ – hoonele või selle osale langeb vari, mistõttu ei ole võimalik infot välja lugeda;
- „haljastus“ – hoone või selle osa on kaetud läbipaistmatu taimestikuga või paikneb taim hoonele nii lähestikku, et rikub hoone geomeetriat;
- „kvaliteet“ – hoone on geomeetriliselt korrektne, kuid mudeli resolutsioon ei ole piisav, et teha kindlaid järeldusi.

Joonis 2.2 illustreerib eelnimetatud tegurite esinemist mudelites.



Joonis 2.2 Näited olukordadest mudelis, mis raskendavad informatsiooni hankimist.
Üleval vasakul – tekstuur; üleval paremal – varjud; all vasakul – haljastus; all paremal
– kvaliteet

3. DROONIMÕÕDISTUSE HETKESEIS EESTI EHITUSSEKTORIS

Vaatamata sellele, et renoveerimise eesmärgil pole aerofotogramm-meetria kasutamine veel väga levinud, on droonidega võimalik teostada aeromõõdistusi ka teistel otstarvetel. Kirjanduse ülevaade annab aimu, et aerofotogramm-meetriat, aga ka aerolaserskaneerimist, rakendatakse ehitussektoris projekteerimiseks olulise lähteolukorra tuvastamiseks, ehitise valmimise jälgimiseks või ehitusplatsi haldamiseks ja tööohutuse tagamiseks. Olemasolevate ehitiste puhul on võimalik selle välispiirete lähteolukorra dokumenteerimine ja mõõtmine, näiteks tuvastamiseks kahjustuste olemasolu ja mõõtmeid. Lisaks annab see võimaluse jäädvustada arhitektuuri- või ajaloomälestisi ning panustada nende säilimisse. Fotogramm-meetria võimaldab parandada piirkonna hoonestuse haldamist ja edasist planeerimist, samuti loob see võimaluse piirkonna virtuaalseks tutvustamiseks, soodustades seeläbi turismi või reklaamides piirkonda sobiva elukohana. Analüüsitud juhtumiuuringud leiavad lisaks, et aerofotogramm-meetrilise mõõdistuse teostamine võib pakkuda olulist rahasäästu aerolaserskaneerimisega võrreldes.

Selleks, et mõista paremini aerofotogramm-meetria rakendamist Eesti ehitussektoris, viidi läbi poolstruktureeritud intervjuud viie ettevõttega, kes tegelevad droonimõõdistusega. Intervjuude käigus kirjeldati kogemusi ja eelistusi rakendades aerofotogramm-meetriat või aerolaserskaneerimist oma töös.

3.1 Kasutusotstarbed

Esmalt uuriti, millisel eesmärgil on ettevõtted droonimõõdistust valdkonnasiseselt rakendanud.

Esimesena läbiviidud intervjuust selgus, et kasutusotstarbeid on olnud mitmeid, näiteks objekti lähteolukorra dokumenteerimine nii projekteerimise eesmärgil kui ka kahjustuste tuvastamiseks. Samuti on droonimõõdistust kasutatud ehitustööde ajal, näiteks ehitusplatsi organiseerimiseks ja ehitusprogressi jälgimiseks ning visualiseerimiseks, et anda parem ülevaade projekti sujumisest. Lisaks on tegeletud ka ortofotokaartide loomisega. Paljud kasutusotstarbed tulenevad sellest, et mitmed ehitusvaldkonna projekteerimisbürood või peatöövõtuga tegelevad firmad usaldavad sääraseid mõõdistused geodeesiaettevõtetele.

Teisena läbiviidud intervjuust 3D-möödistustele spetsialiseerunud ettevõttega ilmses, et aeromöödistus on kasutust leidnud enamjaolt ehitise lähteolukorra kaardistamisel ja ortofotokaartide loomisel.

Kolmandast intervjuust selgus, et ettevõtte kasutab oma töös droonimöödistust hoone lähteolukorra möödistamiseks ja dokumenteerimiseks. See tuleneb ettevõtte kitsamast tegevusalast, mis hõlmab drooniga olemasoleva hoone möödistamist klientidele terviklahenduse pakkumisel. Toodevat katusekattematerjal pakub taastuenergia baasil olulist energia- ja rahasäästu ja on üks võimalus hoone osaliseks renoveerimiseks.

Neljas ettevõtte selgitas, et on drooniga aeromöödistust rakendanud ortofotokaartide loomisel. Lisaks sellele teostatakse droonide abil objektiseiret, mille eesmärgiks on tekkinud kahjustuste tuvastamine. Samuti luuakse droonimöödistuse abil objektist digitaalne kaksik ja kaardistatakse olemasolevat taimestikku, mis võib osutada segavaks faktoriks.

Viiendast intervjuust selgus, et ettevõtte kasutab droonimöödistust nii objektide lähteolukorra kaardistamiseks kui ka võimalike kahjustuste ja deformatsioonide tuvastamiseks. Samuti koostatakse droonide abil ortofotokaarte.

3.2 Tehnoloogia valik

Fotogramm-meetria puudutavas kirjanduses võrreldakse seda tihti laserskaneerimisega ning tuuakse välja põhjuseid, miks eelistada üht või teist. Seetõttu uuriti ka intervjuu käigus, millist droonitehnoloogiat Eesti ettevõtted oma töös peamiselt rakendavad ning milliseid tööriistu ja abivahendeid kasutati enne droonidele üleminekut. Ühe fotogramm-meetria plussina tuuakse pidevalt välja selle madalamat maksumust, mis pärast uuriti ettevõtetelt ka rahaliste investeeringute kohta, mis nad on tehnoloogiate kasutuselevõtu nimel teinud.

Esimese intervjuu käigus ilmses, et ettevõtte on erinevatel eesmärkidel kasutanud mõlemat, kuid peamise tehnoloogiana on kasutusel aerofotogramm-meetria. Seda on kasutatud kuus aastat, enne droonide rakendamist kasutati eelnimetatud eesmärkidel GNSS-vastuvõtjat ja elektrontahhümeetrit. Võttes arvesse nii drooni, kaamera, tarkvara kui ka koolituste maksumust, on ettevõtte droonitehnoloogia kasutuselevõttu investeerinud rohkem kui 50 000 eurot.

Teisest intervjuust selgus, et kuigi droonimöödistusel on peamiselt kasutatav aerofotogramm-meetria, siis tegelikkuses kasutatakse seda maapealse

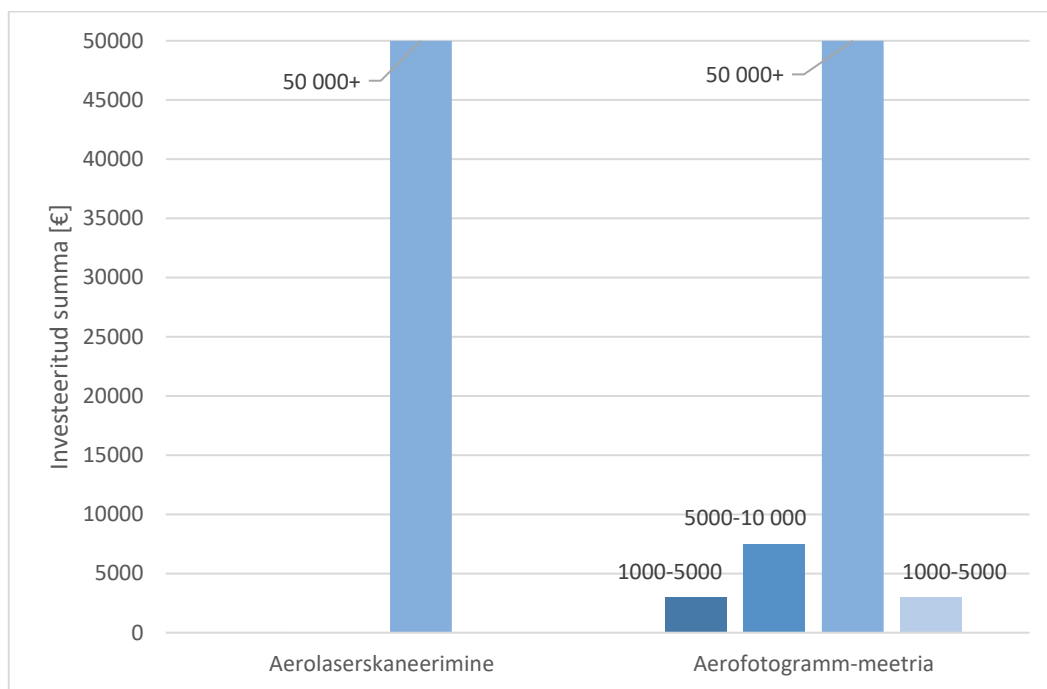
laserskaneerimise täiendamiseks, kuna see annab fotogramm-meetriast täpsemaid tulemusi. Seega kasutatakse aeromöödistust valdavalt kombineerituna terrestrialse möödistusega. Droonimöödistust on kasutatud kolm aastat, enne seda asendas seda tahhümeetriline möödistus ning maapealne fotogramm-meetria. Aerofotogramm-meetria kasutamiseks tehtud rahalised kulutused jäävad vahemikku 5000-10 000 eurot.

Kolmanda ettevõtte eelistatud droonitehnoloogiaks on samuti fotogramm-meetria, kuna laserskaneerimine ei tasu end väiksemamahulise töö juures ära. Droone on möödistamiseks kasutatud kuus kuud, enne seda kasutati möõtude võtmiseks tavapäraseid möötevahendeid – möödulinti, lasermööttjat. Ettevõtte on droonimöödistuse läbiviimiseks investeerinud 1000-5000 eurot.

Neljasa ettevõtte kasutab oma töös peamiselt aerolaserskaneerimist, mis on võrreldes aerofotogramm-meetriga andnud oluliselt paremaid tulemusi. Kuna möödistatavad objektid on küllaltki peenikesed, siis fotogramm-meetriliselt mudelilt neid tuvastada ei ole võimalik. Samuti on oluline mööta objekti kaugust võimalikust segavast taimestikust, mida samuti objekti tuvastamata teha ei saa. Laserskaneerimise eeliseks on ka see, et korraka peegeldub tagasi suur hulk laserkiiri, mis võimaldab saada informatsiooni ka näiteks puuvõra alusest pinnast või objektist, mida fotogramm-meetria kasutades nii lihtne saada ei ole. Droonimöödistust on ettevõtte teostanud viis aastat, möödistamist hakati koheselt droonidega läbi viima ja enne muid vahendeid ei kasutatud. Aerolaserskaneerimisse on ettevõtte drooni, laserskanneri, tarkvara, koolituste jm näol panustanud rohkem kui 50 000 eurot.

Viies ettevõtte tõdeb, et kuigi eelnevalt aerofotogramm-meetria kasutati laserskaneerimist, eelistatakse neist kahest just aerofotogramm-meetria, kuna see võimaldab paremat ligipääsu objektidele. Viimast on nad oma töös kasutanud viis aastat, investeerides selle kasutuselevõttu 1000-5000 eurot.

investeeringutest, mis intervjueritud ettevõtted on teinud võtmaks droonitehnoloogia oma töös kasutusele.



Joonis 3.1 Droonitehnoloogia kasutuselevõttu investeeritud summa ettevõtete lõikes

3.3 Kasutuskogemused

Intervjuude läbi viimise peamiseks eesmärgiks oli saada ülevaade selles valdkonnas tegutsevate Eesti ettevõtete kasutuskogemustest ning droonimöödistuse rakendamise võimalustest ja väljakutsetest.

Esimese intervjuu käigus selgus, et aerofotogramm-meetrilise möödistuse protsessi läbi viimiseks piisab ühest inimesest. Ettevõttes tegeleb 1-2 inimest droonilendamisega ning üks inimene andmetöötusega, soovitud väljundite genereerimisega. Kui kirjanduses leitakse tihti, et fotogramm-meetria on väga mõjutatud ilma poolt, siis vähese planeerimisega on võimalik lennata sobivatele päevadele ning üldjuhul pole ilmastikumõjud suureks takistuseks saanud. Manuaalselt viiakse läbi ettevalmistustööd, kuid drooni sisseehitatud lennuplaneerimissüsteemid ja GPS-seadmed annavad väga täpse tulemuse. Töötlemiseks ja visualiseerimiseks kasutab ettevõtte Agisoft Metashape tarkvara.

Teine ettevõtte kirjeldas, et droonimöödistus koosneb järgnevatest etappidest – objektiga tutvumine ja tööplani koostamine, geodeetilise aluse rajamine ja tähiste paigutamine ning koordineerimine ning andmetöötlus. Protsessis osalevad 1-2 inimest, ajakulu on objektide lõikes erinev. Suurem osa ajast kulub andmetöötusele, välitööde maht sellega võrreldes on oluliselt väiksem. Ilmastikuoludest on sobivaim ühtlase

pilvisusega sademeteta ilm, et ei tekiks varje. Ebasoodsam on päikesepaisteline või vahelduva pilvisusega ilm, samuti madal päike. Lisaks takistavad mõõdistamist sademed ja tugev tuul ning heledate või läikivate pindade olemasolu. Kogemus näitab, et parima tulemuse saavutamiseks on sõltuvalt olukorrast vaja igas etapis teha ka manuaalset tööd, kuna automatiseeritud lahendused pole ideaalsed. Andmetöötluseks on ettevõttes kasutusel Agisoft Metashape ja Pix4D tarkvarad.

Kolmanda intervjuu käigus selgitas ettevõtte oma kasutuskogemust üksikhoonete mõõdistamisel drooniga.

- Esmalt alustatakse planeerimisega – tuleb kontrollida, kas hoone asukohas kehtivad drooni lennutamisele piirangud ning vajadusel taotleda selleks luba. Ajakulu on umbes 10-60 minutit, olenevalt lennuloa vajadusest.
- Teisena teostatakse droonilend, mille eesmärgiks on vajaliku informatsiooni kogumine fotode kaudu. Ajakulu on umbes 2-30 minutit, sõltuvalt hoone suurusest, selle ümbrusest ja lennu automatiseeritusastmest.
- Kolmanda etapina laetakse jäädvustatud fotod üles kasutatavasse tarkvarasse, juhul kui lend on teostatud automatiseeritult kasutades tarkvara mobiilirakendust, laetakse need üles automaatselt.
- Viimasena kontrollitakse tarkvara poolt koostatud mudelit ning võetakse sealt välja edasiseks tööks vajaminev informatsioon ehk mõõdud, mille abil on võimalik pakutavat toodet konkreetsele hoonele kohandada. Hetkel tähendab see mudelist saadud mõõtude järgi katuselahenduse käsitsi ümberjoonestamist teises tarkvaras, kuid tulevikuvision näeb ette 3D importimise võimekuse, mis kiirendaks oluliselt protsessi, sest ära jääks mudelist manuaalne mõõtude võtmine ja uuesti joonestamine. Ajakulu on tavaliselt 5-30 minutit, olenevalt katuse keerukusest.

Enamjaolt on protsessi kaasatud kaks inimest – droonioperaator, kes planeerib ja teostab lennu ning tehniline joonestaja, kes võtab seejärel mudelist vajalikud mõõtmed ja joonestab katuselahenduse ümber. Suurimat mõju ilmastikunähtustest avaldavad sademed, kuna vihma ja lumega lendu läbi viia pole võimalik ning selle peab edasi lükkama. Samuti ei saa mõõdistada paksu lumekihi all olevat katust. Mõõdistuse õnnestumiseks on oluline ühtlane valgus, selleks on sobivaim pilves ilm. Lendamisel on mõjuteguriks ümbritsev keskkond – jälgida tuleb, et droon väldiks võimalikke takistusi. Seepärast on mõnikord vaja lennata erinevatelt kaugustelt, mis võib mõjutada 3D mudeli kvaliteeti. Olenevalt nii läbiviijast kui ka kasutatavatest seadmetest võib protsess olla nii automatiseeritud, et ainult mudelist mõõtude võtmine on manuaalselt teostatud.

Samas on kogemus näidanud, et manuaalselt teostatud lend tagab enamjaolt mudeli parema kvaliteedi, kuna objekti on võimalik jäädvustada lähemalt ja paindlikumalt. Vajalikud mõõdud saab siiski mõlemat moodi kätte. Fotode sorteerimist pole üldjuhul vaja teostada – seda tehakse vaid siis, kui saadud mudel on ebakvaliteetne ning fotod vajavad ülekontrollimist. Tarkvarana on hetkel kasutusel DroneDeploy, kuid kaalutakse ka Airteam tarkvara proovimist.

Neljanda ettevõtte vastustest selgus, et droonimõõdistuse protsess koosneb kolmest etapist: missiooni planeerimine, lendude teostamine ja andmete järeltöötlemine. Tavaliselt on protsessi kaasatud 2-3 inimest. Välitööde osakaal võrreldes planeerimise ja järeltöötusega on ligikaudu võrdne. Laserskaneerimise puhul avaldavad ilmastikuoludest tulemusele kõige rohkem mõju tugev tuul ja sademed, valgus ei mängi nii suurt rolli. Genereeritud mudelist on võimalik saada väga erinevat infot – näiteks on võimalik saada kõiki vajaminevaid mõõtmeid. Peamiselt kasutatakse objekti gabariitmõõtmeid kui ka vahekaugust ümbritsevate objektide ja puudega. Samuti teostatakse simulatsioone, näiteks sõltuvalt välistemperatuurist ja koormustest, mille abil on võimalik läbi viia kvaliteedikontrolle. Lisaks saab suure maa-ala kohta koostatud mudelist teha väljavõtteid üksikobjektide 2D- ja 3D-mudelite näol. Igas etapis on olukordi, mis nõuavad ka manuaalset tööd, kuid kogemus on näidanud, et käsitsi lennates ei ole võimalik kvaliteetselt mudelit saada ning seepärast viiakse lennud läbi automaatselt. Missioonide planeerimise tarkvarana on kasutusel UgCS. Mudeli genereerimiseks kasutatakse YellowScan CloudStation tarkvara, mis on kasutatava laserskanneri tootjapoolne tarkvara. Fotogramm-meetria puhul on enamasti kasutatud DJI Terra tarkvara.

Viienda intervjuu käigus selgus, et protsess saab alguse lennu ettevalmistusest – tuleb taotleda lennuluba ning planeerida lend tarkvaras. Sellega tegeleb 1 inimene ning aega kulub umbes 30 minutit. Lendude teostamisel on suurimat mõju tulemusele avaldanud pilvisus, tuul ja sademed. Lendamine teostatakse automatiseeritult, kuna lennutrajektoori automaatne määramine kiirendab oluliselt protsessi. Pärast droonilennu läbiviimist kontrollitakse manuaalselt üle jäädvustatud fotod ja eemaldatakse neist ebakvaliteetsed. Pärast soovitud väljundi genereerimist puhastatakse saadud punktipilv või mudel liigest infost. Mõõdistuse tulemuseks on ortofoto, võrkudel või punktipilv. Tarkvarana on kasutusel Agisoft Metashape.

3.4 Intervjuude lühikokkuvõte

Intervjuud droonimõõdistust teostavate ettevõtetega viidi läbi eesmärgiga välja selgitada, millised on kogemused ja eelistused droonitehnoloogiate kasutamisel Eestis ning mil määral kattuvad need kirjanduse ülevaates esitatud seisukohtadega. Peamiseks sihiks oli kindlaks teha peamised kasutusotstarbed, aga ka võrrelda erinevate tehnoloogiate kasutuselevõtu maksumust, kuna aerofotogramm-meetria üheks suurimaks eeliseks laserskaneerimise ees peetakse madalat hinda. Intervjueeriti 5 ettevõtet.

Selgus, et kõige levinumaks kasutusotstarbeks droonimõõdistuse puhul on objekti olemasoleva olukorra dokumenteerimine. Seda näiteks nii projekteerimise, dokumentatsiooni täiustamise kui ka pakutava tootelahenduse hoonele kohandamise eesmärgil. Samuti tuvastatakse selle abil võimalikke vigastusi või teostatakse seiret, mille abil kontrollitakse objekti seisukorda ja dokumenteeritakse segavad faktorid, näiteks liiga lähedal paiknev taimestik. Väiksemal määral kasutatakse droonimõõdistust simulatsioonide teostamiseks, ehitusplatsi organiseerimiseks ja ehitusprogressi visualiseerimiseks ehitustööde ajal.

Valdavalt on droonimõõdistusel kasutusel aerofotogramm-meetria, seda ainukese mõõdistusena või täiendavalt maapealsele laserskaneerimisele. Aerofotogramm-meetriat eelistatakse peamiselt väiksema maksumuse tõttu – laserskaneerimine ei tasu end näiteks väikeste objektide puhul ära. Samuti võimaldab see paremat juurdepääsu raskesti ligipääsetavatele objektidele. Aero- ja terrestrilise laserskaneerimise plussideks peetakse aga selle suuremat täpsust ja võimalust jäädvustada ka peenemaid objekte. Aerolaserskaneerimine võimaldab kergesti infot koguda ka näiteks puuvõrade alusest pinnast. Enne droonitehnoloogiate kasutuselevõttu kasutati eelnimetatud eesmärkide saavutamiseks maapealset laserskannerit, elektrontahhümeetrit, lasermõõtjat või mõõdulinti. Aerofotogramm-meetria kasutuselevõttu on intervjueeritud ettevõtted investeerinud keskmiselt 1000-10 000 eurot, aga ka 50 000 eurot, aerolaserskaneerimise puhul üle 50 000 euro. See annab aimu, et aerofotogramm-meetrist mõõdistust võib-olla võimalik läbi viia väiksema maksumusega.

Kogemuste kirjeldusest selgus, et droonimõõdistuse teostamisel on kaasatud valdavalt 1-2 inimest ja protsess koosneb enamasti kolmest etapist: ettevalmistus, lennu läbiviimine ja järeltöötlus. Võrreldes ettevalmistusele ja andmete töötlemisele kuuluva ajaga on välitööde maht võrdne või väiksem. Parima tulemuse saavutamiseks peaks ilm mõõdistuse ajal olema tuulevaikne, pilves ja sademeteta. Samuti tuleb arvesse võtta ümbritsevat keskkonda – objekti ümbritsevate takistuste korral tuleb vahel lennata

erinevatelt distantsidelt, mis võib saadud tulemusele mõju avaldada. Protsessi automatiseerimise kohal lähevad arvamused lahku – kui mõnedest intervjuudest selgub, et automatiseeritult lendamine kiirendab oluliselt mõõdistuse teostamist ning annab ka kvaliteetsema tulemuse, siis teistes kirjeldatakse, et automatiseeritud tegevused ei ole kunagi ideaalsed ja parema tulemuse saavutamiseks tuleks lennata käsitsi. Ettevõtete kogemustest võib välja lugeda, et droonimõõdistuste läbiviimine ei ole keeruline ja aeganõudev. Levinuma tarkvarana on kasutusel Agisoft Metashape, järgnevad Pix4D, DroneDeploy, Yellowscan CloudStation ja DJI Terra.

4. AEROFOTOGRAMM-MEETRILISTE 3D MUDELITE ANALÜÜS

Lõputöö raames analüüsiti kokku 6 mudelit ja 176 hoonet. Analüüsi eesmärgiks oli välja selgitada, kas aerofotogramm-meetrite 3D mudelite abil on võimalik hankida hoonete kohta Ehisregistrist hetkel puuduolevaid andmeid. Teiseks eesmärgiks oli koguda informatsiooni võimalike segavate faktorite kohta, mis seesuguse analüüsi teostamist keerulisemaks muudavad, et neid oleks võimalik edaspidi vältida näiteks lennu planeerimisel või teostamisel. Analüüs viidi läbi veebibrauseris, kuna renoveerimisalase informatsiooni leidmiseks tuleks võimaluse korral samuti edaspidi kasutada avalikku *online*-andmebaasi, mitte allalaaditavaid mudeleid.

4.2 Tulemused

Analüüsi käigus püüti mudelitelt tuvastada otsaseintes paiknevate akende, soojuspumpade, päikesepaneelide ja rõdude või lodžade olemasolu. Mudelist kogutavaid arvandmeid võrreldi Ehisregistrisse kantuga. Samuti hinnati akende seisukorra ja välisseina-rõdu/lodža liitekoha pikkuse määratavust. Mudelite kaudu informatsiooni kogumist segavad tegurid jaotati nende parema kirjeldamise ja mõistmise eesmärgil nelja gruppi: tekstuur, varjud, haljastus ja kvaliteet.

Järgnevalt on esitatud analüüsi tulemused seatud kriteeriumide kaupa.

4.2.1 Avatäited

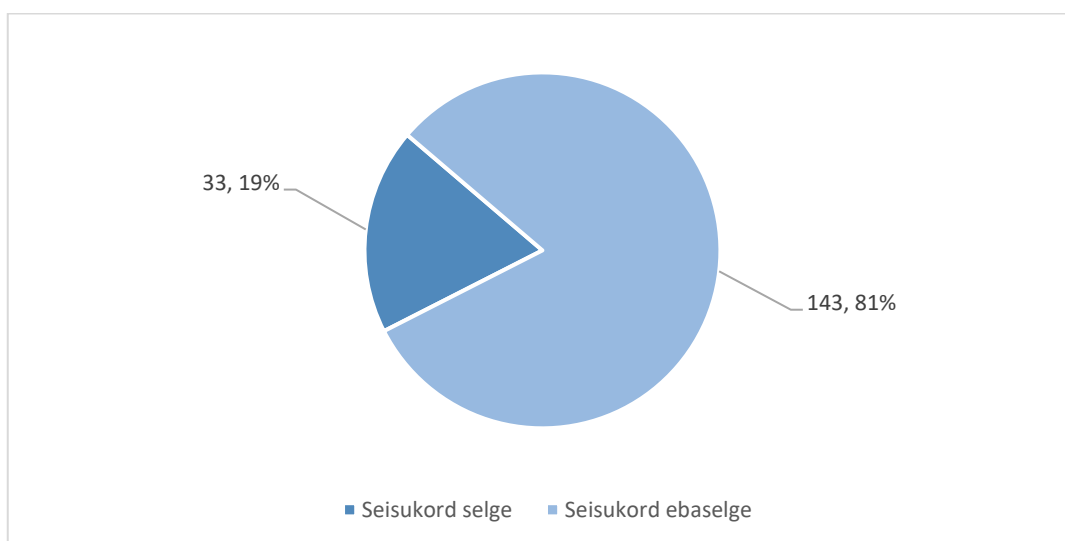
Avatäidete, täpsemalt akende, puhul oli eesmärgiks teha kindlaks, kas hoonete otsaseintes paiknevad aknad. Analüüsimaaks mudelist saadava teabe detailsust, uuriti ka akende seisukorra hindamise võimalust.

Selgus, et 176 analüüsitud hoonest sai 162 ehk 93% hoonete kohta kindlalt väita, kas otsaseintes paiknevad või ei paikne aknad. Päikesepaneelide olemasolu järel oli see teine kõige kergemini tuvastatavam kriteerium. 14 hoone puhul ei suudetud otsaseintes paiknevate akende olemasolu kindlaks teha – 3 korral oli põhjuseks varjud, 4 korral haljastus ning 7 korral tekstuur. Mudeli kvaliteet määramist ei mõjutanud.

Akende seisukorda oli mudelitest keeruline hinnata. 176 hoone kokkuvõttes oli võimalik kindel hinnang seisukorrale anda vaid 33 hoone ehk 19% puhul, neist 17 kuuendas mudelis. Suuresti tuleneb see sellest, et mudelid 1-5 asusid erineval veebiplatvormil kui mudel 6, mis andis edasi oluliselt kõrgemat mudeli kvaliteeti ja võimaldas kindlamalt

hinnata akende seisukorda. 16 hoone puhul hinnati seisukorda hoone arhitektuuri põhjal – kindlalt uusehitistena tuvastatud hoonete puhul oldi veendunud, et aknad on piisavalt väikese soojuslähivusega, et olla võrdväärsed „vahetatud“ akendega. Peamiseks põhjuseks, miks seisukorda hinnata polnud võimalik, peetigi mudelite liiga madalat kvaliteeti.

Siinkohal tasub märkida, et seisukorra hinnatavus on küllaltki suhteline mõiste ning selles mängib suuresti rolli ka analüüsija kogemused ja teadmised. Joonis 4.1 illustreerib akende seisukorra hinnatavust mudeli baasil.



Joonis 4.1 Akende seisukorra hinnatavus mudelist

Seisukorra hindamisel valideeriti tulemust pisteliselt kasutades Google Maps *Street View* funktsiooni ehk võrreldi mudelit fotoga. Joonisel 4.2 on kujutatud hoonet, mille akende seisukord hinnati mudelilt „tuvastatavaks“.



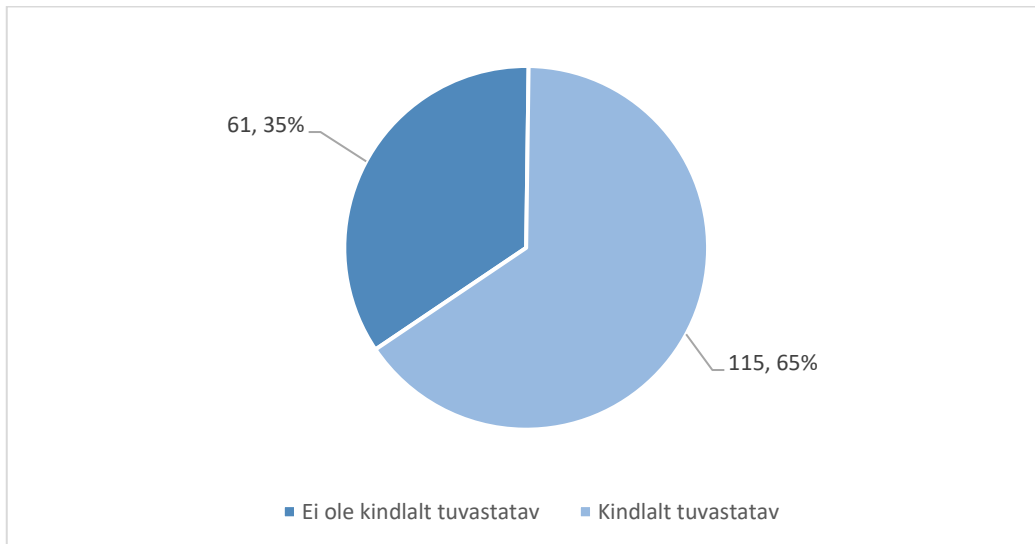
Joonis 4.2 Akende seisukorra hinnangu valideerimine. Üleval – 3D mudel; all – Google Maps *Street View* foto

4.2.2 Soojuspumbad

Kolmanda kriteeriumina hinnati soojuspumpade tuvastatavust. Hoonete puhul, mille soojuspumpade olemasolu leidis mudelist kinnitust, kontrolliti vastava kande eksisteerimist Ehitisregistris.

Analüüsist selgus, et 176 hoonest oli 115 korral ehk 65% hoonetest võimalik kindlaks teha, kas hoone puhul on kasutuses ka soojuspump. 61 hoone puhul ei olnud olemasolu määramine võimalik – 9 korral oli põhjuseks haljastus, 3 korral varjud, 4 korral kvaliteet ja 45 korral tekstuur. Ilmselt mängib soojuspumpade tuvastamisel rolli seadme väiksed mõõtmed ja sarnane värvus paljude hoonete fassaadidega, mis muudab selle taustast raskesti eristatavaks.

Märgata oli fassaadi värvitooni mõju tekstuurile ja kvaliteedile, kuna 40 korral 49-st oli määramatute hoonete puhul tegemist heledates toonides fassaadiga (valge, beež, kollane, heleroheline), 9 korral oli fassaad tumedates toonides (pruun, tumehall, punane, roheline). Joonis 4.3 kujutab soojuspumba olemasolu määratavust mudelist.



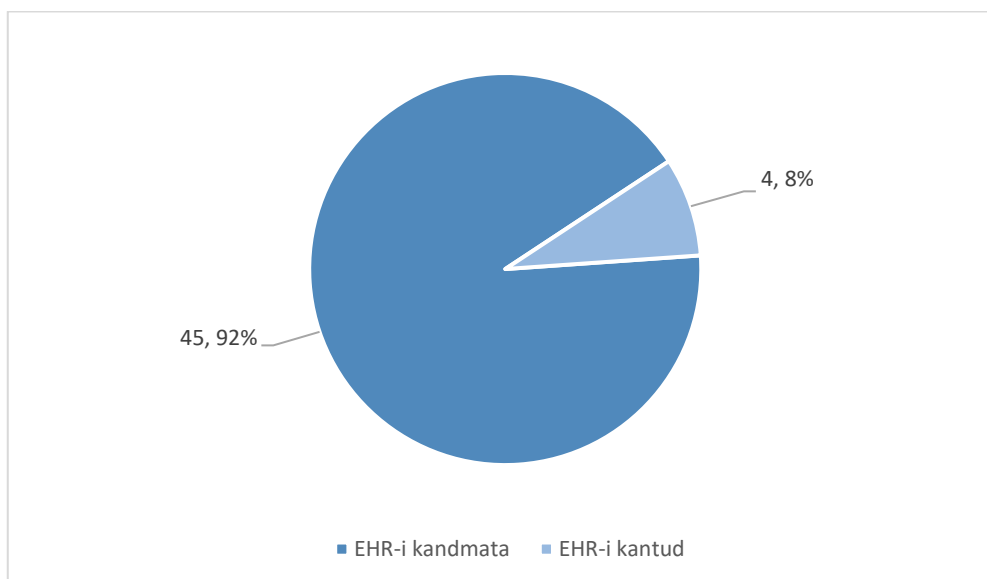
Joonis 4.3 Soojuspumba olemasolu määratavus mudelist

Soojuspumbad oli lihtsamini tuvastatavad mudelist, mille koostamiseks oli teostatud ka madalam lend fassaadide jäädvustamiseks. Joonisel 4.4 on esitatud näide mudelist 4 tuvastatud soojuspumpadest.



Joonis 4.4 Näide mudelist tuvastatud soojuspumpadest

Kokku tuvastati vähemalt üks soojuspump 49 hoonel. Ehitisregistrisse oli sellealane märge tehtud vaid 4 korral ehk 8% hoonetest. See näitab, et EHR-ist puuduolevaid andmeid on säärase mudelite abil võimalik koguda küll. Joonisel 4.5 on kujutatud osakaalu tuvastatud soojuspumpadest, mille kohta on vastav kanne tehtud ka Ehitisregistrisse.



Joonis 4.5 EHR-i kantud andmed mudelist tuvastatud soojuspumpade kohta

4.2.3 Hoone pikkus ja laius

Hoone pikkus ja laius on sagedamini puuduvad arvandmed, nende mudelist kogumise võimalikkuse hindamiseks võeti mudelist hoonetelt mõõdud ja võrreldi neid Ehitisregistris olemasolevate andmetega. Analüüsi käigus võrreldi mudelis ja Ehitisregistris olevaid mõõtmeid 15 hoonel – esmalt seeõttu, et mudelist mõõtude võtmist võimaldas vaid veebiplatvorm, millel analüüsiti 6. mudelit, aga ka vastavate andmete vähesuse tõttu Ehitisregistris. Tabelis 4.1 on esitatud mõõtmete võrdlus mudeli ja EHR-i andmete põhjal.

Tabel 4.1 Hoonete pikkuse ja laiuse võrdlus

Jrk	Hoone pikkus EHR-i kantuna [0,1 m]	Hoone pikkus mudelist mõõdetuna [0,1 m]	Hoone laius EHR-i kantuna [0,1 m]	Hoone laius mudelist mõõdetuna [0,1 m]
1.	59,0	59,5	14,5	14,4
2.	14,3	14,6	15,1	15,1
3.	16,3	16,5	8,0	7,7
4.	32,3	31,9	21,5	21,5
5.	16,8	16,7	7,8	7,9

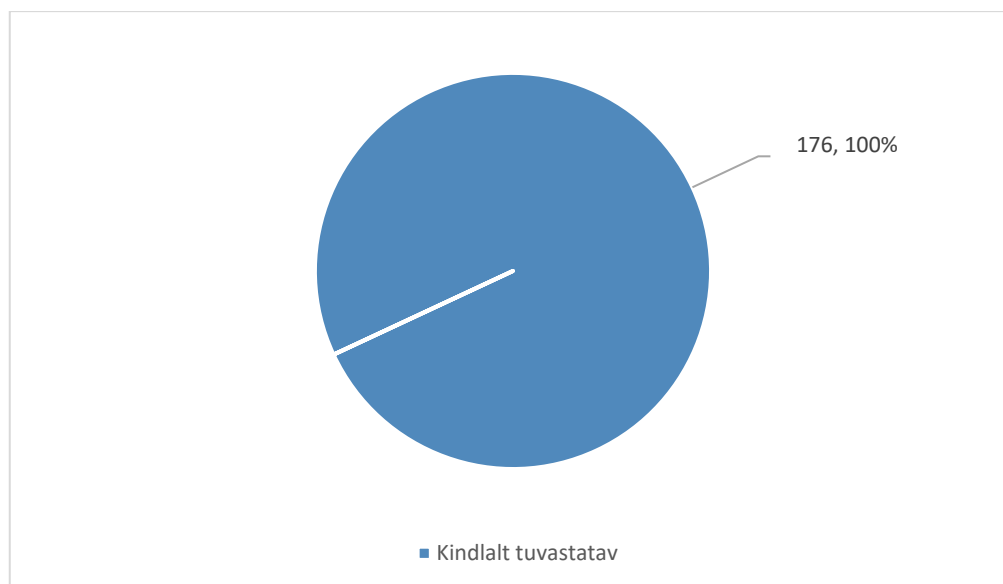
Jrk	Hoone pikkus EHR-i kantuna [0,1 m]	Hoone pikkus mudelist mõõdetuna [0,1 m]	Hoone laius EHR-i kantuna [0,1 m]	Hoone laius mudelist mõõdetuna [0,1 m]
6.	11,2	11,0	9,0	8,9
7.	25,2	24,7	11,0	11,0
8.	74,5	72,0	46,8	46,4
9.	19,5	19,6	9,5	9,4
10.	46,5	42,0	33,0	32,5
11.	24,4	23,7	14,0	14,0
12.	19,6	19,7	14,8	14,1
13.	11,6	11,8	10,9	10,9
14.	43,3	45,4	12,8	14,7
15.	15,3	15,5	13,9	13,9
Maksimaalne hälve (+/-)		4,5	Maksimaalne hälve (+/-)	1,9
Keskmine hälve (+/-)		0,8	Keskmine hälve (+/-)	0,3

Tulemused näitavad, et maksimaalsed hälbed pikkuse ja laiuse puhul EHR-i andmetega võrreldes on vastavalt 4,5 m ja 1,9 m, keskmised hälbed vastavalt 0,8 m ja 0,3 m. Viimaste põhjal võib järeldada, et mudelist määrates on mõlemad mõõtmed küllaltki täpsed, kuid laius on siiski kahest täpsem. Suurimad erinevused pikkustes esinesid just pikemate hoonete puhul. See tuleneb sellest, et nende korral on oluliselt sagedasem geomeetria deformeerumine mõnes hoone osas, mis takistab täpset mõõdistamist. Kompaktsemate hoonete puhul on deformeerumise võimalus väiksem.

4.2.4 Päikesepaneelid

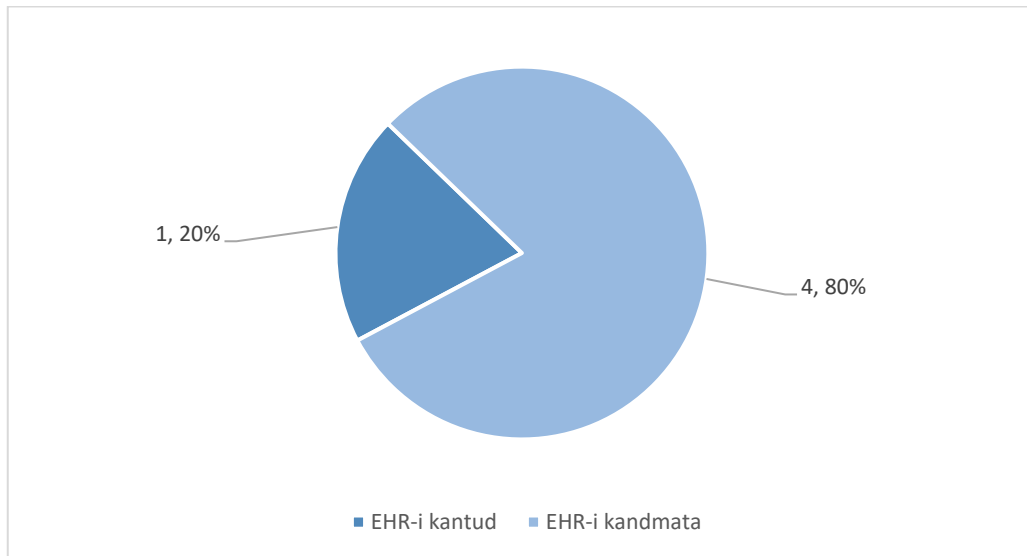
Päikesepaneelide puhul oli eesmärgiks soojuspumpadega sarnaselt hinnata nende olemasolu tuvastatavust ning kontrollida kindlaks määratud päikesepaneelide puhul vastava kande eksisteerimist Ehitisregistris.

Päikesepaneelide olemasolu kinnitamine oli kõigist kriteeriumidest lihtsaim, 176 hoonest oli võimalik 100% kordadest tuvastada, kas hoonel on kasutusel päikesepaneelid. Selle põhjusena võib välja tuua nende katusel paiknemise – droonimöödistusega on kõige paremini jäädvustatavad horisontaalselt asetsevad pinnad, sh katused. Joonisel 4.6 on esitatud hoonete osakaal, mille puhul on võimalik tuvastada päikesepaneelide olemasolu.



Joonis 4.6 Päikesepaneelide olemasolu määratavus mudelist

Päikesepaneelid tuvastati 5 hoonel, neist 1 puhul oli vastav info kantud ka EHR-i. Joonis 4.7 kujutab Ehitisregistrisse kantud päikesepaneelide osakaalu.



Joonis 4.7 EHR-i kantud andmed mudelist tuvastatud päikesepaneelide kohta

Kui traditsioonilisel kujul on päikesepaneelid kergesti tuvastatavad, siis populaarsust koguvad integreeritud päikesekatused võivad edaspidi paneelide mudelist määramist oluliselt raskendada. Joonisel 4.8 on kujutatud väljavõtet mudelist, millel näha päikesepaneelid ja nende detailsus.



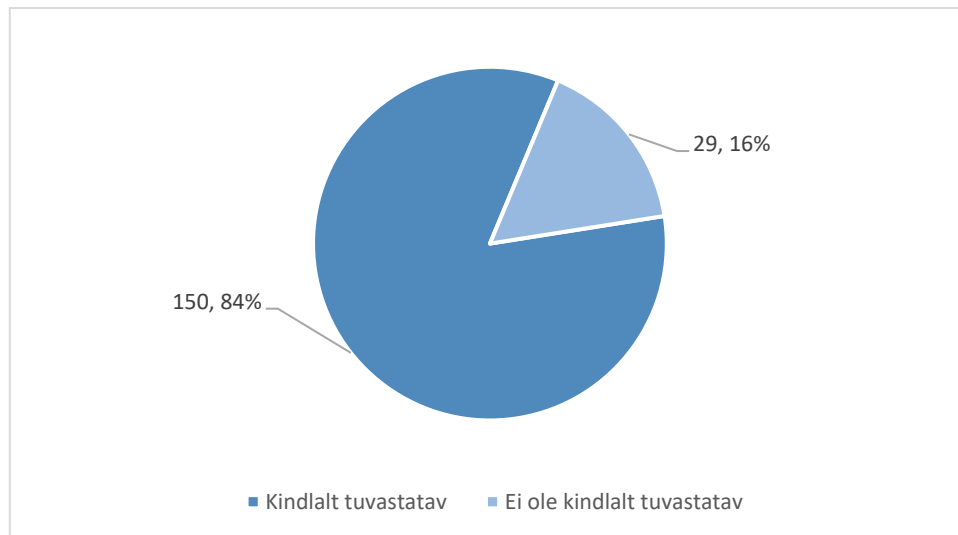
Joonis 4.8 Näide päikesepaneelide detailsuse kohta mudelis

4.2.5 Rõdud ja lodžad

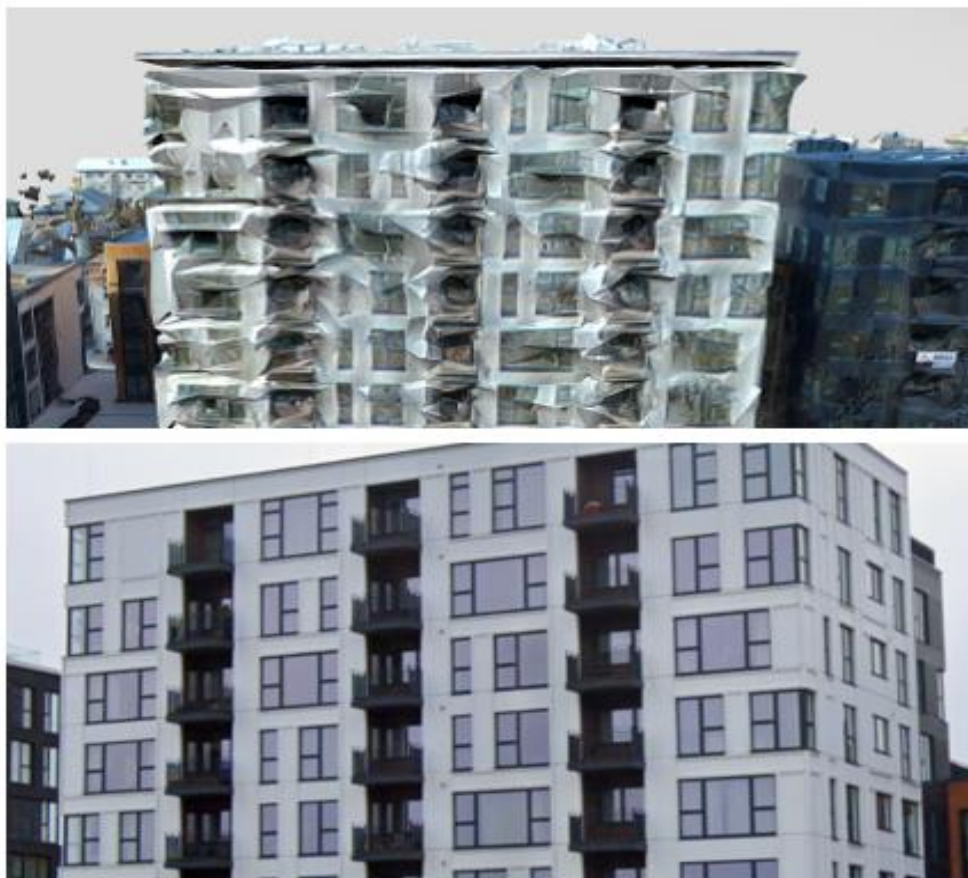
Rõdude ja lodžade kohta puudub Ehitisregistris ja digikaksikus täielikult info, seega oli analüüsi eesmärgiks nende olemasolu kindlaks tegemine. Tuvastatud rõdude või lodžade puhul hinnati visuaalselt ka välisseina liitekohade mõõdetavust.

Rõdude või lodžade mudelist tuvastamine osutus ootamatult keeruliseks. Selgus, et eenduvad hooneosad rikuvad sageli olulisel määral hoone geomeetriat ja seeläbi ka

fassaadi tekstuuri. 179 analüüsitud hoonest polnud võimalik rõdude või lodžade olemasolu määrata 29 korral ehk 16% hoonetest. Joonisel 4.9 on kujutatud nende olemasolu määramise võimalikkust. Joonis 4.10 illustreerib nende olemasolu võimalikku mõju fassaadi terviklikkusele.



Joonis 4.9 Rõdude või lodžade olemasolu määratavus mudelist



Joonis 4.10 Näide rõdude ja lodžade mõjust hoone geomeetriaile ja tekstuurile. Üleval – 3D mudel; all – Google Maps *Street View* foto

Mudelist tuvastati rõdud ja lodžad 45 hoonel. Neist 39 korral ehk 87% puhul hinnati rõdu-välisseina liitekoht mõõdetavaks. 6 hoone korral oli fassaadi tekstuur liialt deformeerunud, et rõdude või lodžade piirid oleks selgesti määratletavad ja mõõdetavad. Joonisel 4.11 on esitatud võrdlus tuvastatud rõdudest või lodžadest, millest ühe liitekoht on hinnatud „mõõdetavaks“, teisel mitte.



Joonis 4.11 Näide erinevusest liitekohtade pikkuste määratavuses. Üleval – lodža piirid korrektsed; all – rõdu piirid ebakorrektsed

4.2.6 Mudelite võrdlus

Mudelite lõikes avaldas kõige suuremat mõju veebiplatvorm, millel mudelit analüüsiti. Esimest viit mudelit analüüsiti kasutades Sketchfab veebilehte, kuuenda mudeli puhul aga Tallinna linna kaardirakendust. Viimase korral oli mudeli kvaliteet oluliselt kõrgem ning seeläbi akende seisukord, soojuspumbad jm palju selgemini tuvastatavad. Joonisel 4.12 on esitatud võrdlus kvaliteedis erinevatel platvormidel, kui vaadelda üht hoonet võrreldavate kaugustelt.



Joonis 4.12 Näide erinevusest mudeli kvaliteedis erinevatel veebilehtedel. Üleval – Sketchfab; all – Tallinna linna kaardirakendus

Sellest tulenevalt on ka mõistetav, miks kuuenda mudeli puhul oli akende seisukorra hindamine oluliselt lihtsam võrreldes teiste mudelitega. Kirjanduse analüüsist sellist olukorda kirjeldatud ei olnud, seega andis säärane erinevus kvaliteedis platvormide võrdluses ka uut teadmist.

Lendude ajal olnud erinevad ilmastikutingimused mõjutavad samuti lõpptulemust. Visuaalselt hinnates on kuuenda mudeli puhul olnud ilm ühtlaselt pilves ning hoonete ja fassaadide kvaliteet ka oluliselt ühtlasem kui näiteks esimese mudeli puhul, kus on võimalik selgelt eristada päikese- ja varjupoolseid fassaade. Otsene päikesepaiste mõjutab tekstuuri ja kvaliteeti oluliselt, lõhkudes ja moonutades hoone geomeetriat ning tekitades sellesse tühimikke. Samas on näha, et päikesepaistelise ilmaga on varjus fassaadi kvaliteet oluliselt kõrgem kui pilves ilmaga. Joonisel 4.13 on võrreldud erinevates mudelites hoone fassaade kahelt poolt – võrreldud on kuuendat ja esimest

mudelit, kusjuures võrdluse jaoks on kasutatud üht veebiplatvormi ning valitud mõlemal juhul heleda fassaadiga hoone.



Joonis 4.13 Päikese mõju hoone fassaadidele erinevatel külgedel. Üleval – pilves ilm, fassaad kahelt poolt; all – päikesepaisteline ilm, fassaad kahelt poolt

Samuti osutus mudelite lõikes eeldatust olulisemaks taimestiku olemasolu, tihedus ja lopsakus. Kui kuuest mudelist viie lennud olid teostatud perioodil, kui lehtpuud olid lehtes, siis raagus puudega võrreldes segasid need hoone geometria terviklikult jäädvustamist ja kuvamist oluliselt. Samuti segas hoone läheduses tihedalt paiknev taimestik (eelkõige puud) sageli ligipääsu osadele hoone külgedele, tekitades mudeli tekstuuris tühimikke. Suvisel poolaastal jäädvustatud mudelite puhul said taimestikuga paremini hakkama need mudelid, mille puhul oli teostatud ka lisaks madalam lend fassaadide jäädvustamiseks. Analüüsist tuli välja ka nüanss, et madalamad (ühe- või kahekordsete) hooned on ümbritsevast taimestikust oluliselt rohkem mõjutatud kui kõrgemad hooned.

Joonisel 4.14 on esitatud näited kõigi kuue mudeli kvaliteetidest. Parema kvaliteediga tõusevad esile mudelid, mille puhul teostati fassaadide jäädvustamiseks eraldi manuaalselt juhitud lend madalamal kõrgusel.



Joonis 4.14 Näited mudelite üldisest kvaliteedist. Üleval vasakul – mudel nr 1; üleval paremal – mudel nr 2; keskel vasakul – mudel nr 3; keskel paremal – mudel nr 4; all vasakul – mudel nr 5; all paremal – mudel nr 6

4.3 Tulemuste lühikokkuvõte

Käesoleva lõputöö raames teostatud mudelite analüüsi eesmärgiks oli välja selgitada millist Ehitisregistrist puuduolevat renoveerimiseks kasulikku infot ning millise detailsusega on võimalik hankida aerofotogramm-meetrilise mõõdistuste baasil koostatud mudelitest.

Analüüs teostati valdavalt visuaalselt, ühe kriteeriumi analüüsimiseks võeti mudelist ka mõõte. Analüüsi käigus selgitati välja otsaseintes paiknevate akende, soojuspumpade, päikesepaneelide ning rõdude ja lodžade olemasolu. Lisaks hinnati visuaalselt akende seisukorda ning välisseina-rõdu/lodža liitekoha mõõdetavust. Tuvastatud seadmete puhul kontrolliti vastava info olemasolu Ehitisregistris. Mudelilt mõõdetava pikkuse ja laiuse täpsuse hindamiseks võrreldi neid Ehitisregistri andmetega.

Analüüsiti 6 piirkonnamudelit, neis omakorda 176 hoonet. Tuli välja, et seadmete ja hooneosade tuvastamisel said takistavaks neli tegurit: tekstuur, varjud, haljastus ja mudeli kvaliteet. Selgus, et kõige lihtsam on mudelilt tuvastada päikesepaneelide (100%) ja otsaseinte akende (93%) olemasolu. Suuresti tuleneb see sellest, et päikesepaneelid asetsevad katusel ehk horisontaalpinnal, mis on aeromõõdistuste käigus lihtsasti jäädvustatav. Otsaseinte akende tuvastamisel ei mängi kvaliteeditase nii suurt rolli kui teiste näitajate puhul. Järgnesid rõdud ja lodžad (84%) ning soojuspumbad (65%) – esimeste puhul oli olemasolu määramisel ebaselgust rohkem kui eeldati, kuna eenduvad hooneosad lõhkusid sageli hoone geomeetriat ja muutsid fassaadi raskesti eristatavaks. Soojuspumpade puhul võib põhjuseks tuua seadme väiksed mõõtmed ja heleda värvuse, mis sarnastes toonides fassaadidelt hästi välja ei paista. Akende seisukorda oli mudelitest keeruline hinnata – kindel sai olla vaid 19% hoonete puhul. Välisseina-rõdu/lodža liitekoha pikkus oli mõõdetav 87% tuvastatud rõdudest või lodžadest.

Analüüsist ilmnas, et Ehitisregistrist puuduolevat infot on võimalik aerofotogramm-meetrilistest piirkonnamudelitest koguda. Tuvastatud soojuspumpadest oli EHR-i kantud vaid 8%, tuvastatud päikesepaneelidest 20%. Ka hoonete pikkus ja laius on mudelilt mõõdetavad, keskmised hälbed absoluutväärtustena olid vastavalt 0,8 m ja 0,3 m. Suurimad hälbed tekkisid eriti pikkade hoonete mõõtmisel, kuna nende puhul on deformatsioonid hoone geomeetrias tõenäolisemad.

Mudelite võrdluses mõjutas kvaliteeti kõige rohkem veebiplatvorm, millel analüüs läbi viidi. Nimelt andsid erinevad veebilehed sama mudelit oluliselt erineva kvaliteediga edasi. Kirjanduse ülevaate põhjal avaldas eeldatust rohkem tulemusele mõju taimestik – hoone lähedal paiknevad puud moonutasid selle geomeetriat või olid need

läbipaistmatud nii, et taimestiku alla jääva hooneosa kohta polnud võimalik järeldusi teha. Analüüsist selgus, et ühe hoone vastasfassaadid võivad otsese päikesevalguse tõttu olla oluliselt erineva kvaliteedi ja tekstuuriga. Parema kvaliteediga olid need mudelid, mille koostamiseks teostati eraldi lend madalamal kõrgusel.

Koostatud analüüsi tulemuste põhjal saab kinnitada, et ühtlase lõpptulemuse saamiseks tuleks droonilennu teostamisel vältida päikesepaistelise ilma, et tagada hoonete geomeetriline ja tekstuuriline terviklikkus igal küljel. Vastavalt piirkonnas paiknevate hoonete kõrgustele tuleks kaaluda madalamal lendamist – madalamad hooned on mudeli koostamisel oluliselt rohkem ümbritsevast taimestikust mõjutatud ning võivad kõrgelt jäädvustatuna hiljem raskesti eristatavad olla. Selleks, et taimestiku mõju mudelile veelgi rohkem vähendada, on soovituslik droonilend teostada kevadel või sügisel, kui puud pole lehtes, või puhastada genereeritud mudel üleliigsest infost tarkvara abil. Kõrgematest hoonetest ja haljastuse vähesusest tulenevalt on linnakeskkonna fotogramm-meetriline modelleerimine lihtsam kui maapiirkonnas ning annab parema tulemuse.

KOKKUVÕTE

Tulenevalt Euroopa Liidu sihist saavutada 2050. aastaks kliimanetraalsus, on tähelepanu keskmesse tõusnud hoonete renoveerimine energiatõhususe parandamise eesmärgil. Selleni jõudmiseks tuleb Eestis lähima 30 aasta jooksul renoveerida ligikaudu 141 000 hoonet, seda läbi rekonstrueerimiste mahu viiekordse suurendamise ning ehitussektori fookuse suunamise uusehitistelt olemasolevate hoonete rekonstrueerimisele. Mahuka ettevõtmise teostamiseks tuleb renoveerimisele läheneda piirkonna tasemel, kasutades selleks digitaalseid lahendusi.

Käesoleva lõputöö üheks eesmärgiks oli selgitada välja võimalused ja väljakutsed, mida pakub või millega tuleks arvestada fotogramm-meetria rakendamisel hoonete renoveerimisel. Kirjanduse analüüsi käigus selgus, et fotogramm-meetriat on võimalik kasutada mitmetel renoveerimist puudutavatel otstarvetel: olemasoleva olukorra kaardistamisel, kahjustuste tuvastamisel, konstruktsioonide kandevõime hindamisel, arhitektuuri- ja kultuurimälestiste säilitamisel ja linnaplaneerimisel. Võrreldes alternatiivse tehnoloogiaga on aerofotogramm-meetrilise mõõdistuse teostamine oluliselt odavam ning võimaldab ligipääsu ka kõrghoonetele. Esitatud näidetest ja läbiviidud intervjuudest ilmnas, et parima tulemuse saavutamiseks võib olla vajalik selle kombineerimine terrestrilise mõõdistusega, mis aga piirkonna tasemel kaardistamise puhul oleks üsna aeganõudev.

Teiseks eesmärgiks oli koguda teavet dronitehnoloogiate kasutamise kohta Eesti ehitussektoris tegutsevatelt ettevõtetelt, et võrrelda kohalikke kasutuskogemusi kirjanduse ülevaates esitatud seisukohtadega. Intervjueeritud ettevõtete peamine eelistus aeromõõdistuse tehnoloogiana on fotogramm-meetria – see annab aimu, et erinevused maksumuses, tööprotsessis ja selle ajamahukuses mängivad piisavalt suurt rolli, et veidi madalam täpsus lõpptulemuses, mis fotogramm-meetria kaasnab, võib olla õigustatud. Peamiste kasutusotstarvetena saab esile tõsta objekti lähteolukorra kaardistamise, ortofotokaartide koostamise, kahjustuste tuvastamise ja dokumenteerimise – see näitab, et olemas on ka renoveerimist hõlbustavate tegevuste kasutuskogemus, mis väljendab oskusteabe integreerimise ja koostöö võimalikkust massiliste renoveerimiste ettevalmistamisel ja teostamisel lähitulevikus.

Kolmandaks püstitatud eesmärgiks oli analüüsida aerofotogramm-meetrilise mõõdistuse tulemusena koostatud 3D mudeleid ja selgitada välja, kas ja millist renoveerimiseks kasulikku teavet on neist võimalik hankida. Analüüsist ilmnas, et 3D piirkonnamuudelilt on võimalik tuvastada näiteks väljaspool hoonet paiknevate soojus- ja energiallikate või hooneosade olemasolu. Samuti on võimalik koguda arvandmeid,

näiteks hoone pikkust ja laiust või välispiirete liitekohtade pikkuseid. Analüüsi tulemuste põhjal esitati soovitud dronilendude teostamiseks.

Lõputöö käigus saadi vastused esitatud küsimustele ning töö oli seega eesmärgipärane. Selgus, et fotogramm-meetrial on mitmeid renoveerimisel rakendatavaid otstarbeid. Kinnitust leidis aerofotogramm-meetria sobivus piirkonnamudelite koostamiseks ning omakorda piirkonnamudelite sobivus renoveerimiseks oluliste andmete kogumiseks. Ilmnes, et Eestis dronimöödistust teostavate ettevõtete seas on juba kogemusi aerofotogramm-meetrilise tööprotsessi läbiviimisel ning mudelite produtseerimisel.

SUMMARY

Building renovation to improve the energy efficiency of buildings is in the spotlight due to the goal of achieving climate neutrality in the European Union by 2050. To reach the goal approximately 141,000 buildings must be renovated in Estonia in the upcoming 30 years by increasing the reconstruction volume 5 times and shifting the focus in the construction industry from new buildings to the reconstruction of existing buildings. In order to carry out this large-scale undertaking, the renovation process must be approached at the regional level using digital solutions.

One of the aims of this thesis was to ascertain the opportunities and challenges regarding the application of photogrammetry in the renovation of buildings. During the analysis of the literature, it became clear that photogrammetry can be used for several purposes related to renovation: mapping of the existing situation, identifying and documenting damage, assessing the load-bearing capacity of structures, preserving architectural and cultural monuments and urban planning. Compared to an alternative technology, aerial photogrammetric surveying is significantly cheaper and allows access to high-rise buildings. From the case studies and conducted interviews, it became evident that to achieve the best result, it may be necessary to combine it with terrestrial surveying, which, however, would be quite time-consuming in the case of mapping at the regional level.

The second goal was to collect information about the use of drone technologies from companies operating in the Estonian construction sector in order to compare local usage experiences with the views presented in the literature review. The main preference of the interviewed companies for aerial surveying technology is photogrammetry - this suggests that the differences in cost, work process and time consumption play a large enough role to justify the slightly lower accuracy in the final result that comes with photogrammetry. As the main purposes of use, mapping of the existing situation of the object, compilation of orthophoto maps, damage detection and documentation can be highlighted - this shows that local experience of use in activities that promote renovation exists, which allows the possibility of integration of know-how and collaboration in the preparation and execution of mass renovations in the near future.

The third goal was to analyze 3D models created as a result of aerial photogrammetric surveying and determine which information that is useful for renovation can be obtained from them. The analysis showed that it is possible to identify, for example, the existence of heat and energy sources or building parts located outside the building. It is also possible to collect numerical data, for example the length and width of the building or

the lengths of the joints of boundary structures. Based on the results of the analysis, recommendations were made for future drone flights.

In the course of the thesis, the initial research questions were answered, and the work was thus purposeful. It turned out that photogrammetry has several purposes that can be applied in renovation. The suitability of aerial photogrammetry for creating regional models was confirmed, and in turn, the suitability of regional models for collecting important data for renovation was confirmed. It turned out that among the companies performing drone surveying in Estonia, there is already experience in conducting the aerial photogrammetric work process and producing such models.

KASUTATUD KIRJANDUS

- [1] KOMISJONI TEATIS EUROOPA PARLAMENDILE, EUROOPA ÜLEMKOGULE, NÕUKOGULE, EUROOPA MAJANDUS- JA SOTSIAALKOMITEELE NING REGIOONIDE KOMITEELE Euroopa roheline kokkulepe. 2019. Vaadatud: 8. veebruar 2023. [Online]. Available at: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ET/TXT/?qid=1576150542719&uri=COM%3A2019%3A640%3AFIN>
- [2] „Renoveerimislaine: linnad ja piirkonnad on tegudeks valmis”. <https://cor.europa.eu/et/news/Pages/renovation-wave---cities-and-regions-ready-to-deliver.aspx> (vaadatud 11. veebruar 2023).
- [3] Majandus- ja Kommunikatsiooniministeerium, „Hoonete rekonstrueerimise pikaajaline strateegia”. Juuni 2020.
- [4] E.-R. Parts, E. Pikas, T. M. Parts, E. Arumägi, I. Liiv, ja T. Kalamees, „Quality and accuracy of digital twin models for the neighbourhood level building energy performance calculations”, 2023.
- [5] K. Kask et al., „Ehitussektori tootlikkuse, lisandväärtuse ja majandusmõju analüüs”. detsember 2018.
- [6] Majandus- ja Kommunikatsiooniministeerium, „Ehituse pikk vaade 2035”. 2021.
- [7] M. Gómez-Gil, M. M. Sesana, G. Salvalai, A. Espinosa-Fernández, ja B. López-Mesa, „The Digital Building Logbook as a gateway linked to existing national data sources: The cases of Spain and Italy”, J. Build. Eng., kd 63, lk 105461, jaan 2023, doi: 10.1016/j.job.2022.105461.
- [8] European Construction Sector Observatory, „Digitalisation in the construction sector”, Analytical, apr 2021.
- [9] M. Gómez-Gil, A. Espinosa-Fernández, ja B. López-Mesa, „Review and Analysis of Models for a European Digital Building Logbook”, Energies, kd 15, nr 6, Art. nr 6, jaan 2022, doi: 10.3390/en15061994.
- [10] BPI et al., Study on the development of a European Union framework for digital building logbooks: final report. LU: Publications Office of the European Union, 2021. Vaadatud: 15. märts 2023. [Online]. Available at: <https://data.europa.eu/doi/10.2826/659006>
- [11] L. Murphy, „The influence of the Energy Performance Certificate: The Dutch case”, Energy Policy, kd 67, lk 664–672, apr 2014, doi: 10.1016/j.enpol.2013.11.054.
- [12] M. Grecchi, M. Rivallant, M. Maria Sesana, ja G. Salvalai, „From the energy performance certificate to the building renovation passport”, Riv. Tema, kd 05, nr 02, okt 2021, doi: 10.30682/tema0502g.
- [13] D.-G. J. Opoku, S. Perera, R. Osei-Kyei, ja M. Rashidi, „Digital twin application in the construction industry: A literature review”, J. Build. Eng., kd 40, lk 102726, aug 2021, doi: 10.1016/j.job.2021.102726.
- [14] „visioon”, e-ehitus. <https://ehitus.ee/vision/> (vaadatud 18. aprill 2023).
- [15] „Ehitisregister | Majandus- ja Kommunikatsiooniministeerium”. <https://mkm.ee/ehitus-ja-elamumajandus/ehitus/ehitisregister> (vaadatud 14. märts 2023).
- [16] „Ehitisregister”. <https://livekluster.ehr.ee/ui/ehr/v1> (vaadatud 14. märts 2023).
- [17] E. Iliste, „Ehitisregistri andmete alusel elamupiirkonna energiatõhususe hindamise alused”, jaan 2023, Vaadatud: 14. märts 2023. [Online]. Available at: <https://digikogu.taltech.ee/et/item/db8623c0-7686-4c0e-9cca-c076543344a6>
- [18] P. Mêda, E. Hjelseth, D. Calvetti, ja H. Sousa, „Data Templates and Digital Building Logbooks boosting Digital Twin in Construction”, okt 2021, Vaadatud: 15. märts 2023. [Online]. Available at: <https://repositorio-aberto.up.pt/handle/10216/140981>

19. [19] J. Han et al., „Urban Scene LOD Vectorized Modeling From Photogrammetry Meshes”, IEEE Trans. Image Process., kd 30, lk 7458–7471, 2021, doi: 10.1109/TIP.2021.3106811.
20. [20] „EHR | 3D Kaksik”. <https://devkluster.ehr.ee/ui/3dtwin/v1/> (vaadatud 1. märts 2023).
21. [21] „E-ehituse 3D kaksiku arendus”, e-ehitus. <https://eehitus.ee/timeline-post/e-ehituse-3d-kaksiku-arendus/> (vaadatud 22. veebruar 2023).
22. [22] N. Liba, Fotogramm-meetria alused. 2005.
23. [23] M. Faltýnová, E. Matoušková, J. Šedina, ja K. Pavelka, „BUILDING FACADE DOCUMENTATION USING LASER SCANNING AND PHOTOGRAMMETRY AND DATA IMPLEMENTATION INTO BIM”, ISPRS - Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci., kd XLI-B3, lk 215–220, juuni 2016, doi: 10.5194/isprsarchives-XLI-B3-215-2016.
24. [24] A. Skondras et al., „UAV Mapping and 3D Modeling as a Tool for Promotion and Management of the Urban Space”, Drones, kd 6, nr 5, Art. nr 5, mai 2022, doi: 10.3390/drones6050115.
25. [25] M. Pepe, L. Fregonese, ja M. Scaioni, „Planning airborne photogrammetry and remote-sensing missions with modern platforms and sensors”, Eur. J. Remote Sens., kd 51, nr 1, lk 412–436, jaan 2018, doi: 10.1080/22797254.2018.1444945.
26. [26] C. Iheaturu, C. Okolie, E. Ayodele, A. Egogo-Stanley, S. Musa, ja C. Ifejika Speranza, „A simplified structure-from-motion photogrammetry approach for urban development analysis”, Remote Sens. Appl. Soc. Environ., kd 28, lk 100850, nov 2022, doi: 10.1016/j.rsase.2022.100850.
27. [27] H. Eisenbeiss ja M. Sauerbier, „Investigation of uav systems and flight modes for photogrammetric applications”, Photogramm. Rec., kd 26, nr 136, lk 400–421, 2011, doi: 10.1111/j.1477-9730.2011.00657.x.
28. [28] „Ground sampling distance (GSD) in photogrammetry”, Support, 15. juuli 2019. <https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/202559809-Ground-sampling-distance-GSD-in-photogrammetry> (vaadatud 28. veebruar 2023).
29. [29] O. Rak ja D. Szilágyi, „Photogrammetry possibilities and rules focusing on architectural usage”, Pollack Period., kd 15, lk 187–196, apr 2020, doi: 10.1556/606.2020.15.1.18.
30. [30] „Sun Angle Calculator”. <https://www.omnicalculator.com/physics/sun-angle> (vaadatud 28. märts 2023).
31. [31] E. P. Baltsavias, „A comparison between photogrammetry and laser scanning”, ISPRS J. Photogramm. Remote Sens., kd 54, nr 2, lk 83–94, juuli 1999, doi: 10.1016/S0924-2716(99)00014-3.
32. [32] Y. Yang, Z. Lin, ja F. Liu, „Stable Imaging and Accuracy Issues of Low-Altitude Unmanned Aerial Vehicle Photogrammetry Systems”, Remote Sens., kd 8, nr 4, Art. nr 4, apr 2016, doi: 10.3390/rs8040316.
33. [33] „Using GCPs”, Support. <https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/202558699-Using-GCPs> (vaadatud 29. märts 2023).
34. [34] B. E. Berrett et al., „Large-Scale Reality Modeling of a University Campus Using Combined UAV and Terrestrial Photogrammetry for Historical Preservation and Practical Use”, Drones, kd 5, nr 4, Art. nr 4, dets 2021, doi: 10.3390/drones5040136.
35. [35] M. Ludwig et al., „Quality Assessment of Photogrammetric Methods—A Workflow for Reproducible UAS Orthomosaics”, Remote Sens., kd 12, nr 22, Art. nr 22, jaan 2020, doi: 10.3390/rs12223831.
36. [36] R. A. Galantucci ja F. Fatiguso, „Advanced damage detection techniques in historical buildings using digital photogrammetry and 3D surface analysis”, J. Cult. Herit., kd 36, lk 51–62, märts 2019, doi: 10.1016/j.culher.2018.09.014.
37. [37] R. Kontrimovičius, M. Juszczak, A. Leśniak, L. Ustinovičius, ja C. Miedziałowski, „Photogrammetry-based approach for collecting and processing information about an existing building”, Bull. Pol. Acad. Sci. Tech. Sci., kd 71, nr 1, 2023, doi: 10.24425/bpasts.2023.144453.

38. [38] G. Y. Jeong, T. N. Nguyen, D. K. Tran, ja T. B. H. Hoang, „Applying unmanned aerial vehicle photogrammetry for measuring dimension of structural elements in traditional timber building“, *Measurement*, kd 153, lk 107386, märts 2020, doi: 10.1016/j.measurement.2019.107386.