



TALLINNA TEHNICAÜLIKOOL
INSENERITEADUSKOND
Ehituse ja arhitektuuri instituut

**SCAN TO BIM TÖÖVOOD, MEETODID JA
TEHNOLOOGIAD OLEMASOLEVATE
KORTERELAMUTE NÄITEL**

**SCAN TO BIM WORKFLOWS, METHODS AND
TECHNOLOGIES IN THE CONTEXT OF EXISTING
APARTMENT BUILDINGS**

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Mihkel Sari

Üliõpilaskood: 153829

Juhendaja: Ergo Pikas

Tallinn 2022

AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

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

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

30.04.2022

Autor:

/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

"....." 201.....

Juhendaja:

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

"....."201... .

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina, Mihkel Sari (21.02.1996),

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose **Scan-to-BIM töövood, meetodid ja tehnoloogiad olemasolevate korterelamute näitel**,

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.

1. Olen teadlik, et käesoleva lihtlitsentsi punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.

2. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest ning muudest õigusaktidest tulenevaid õigusi.

¹*Lihtlitsents ei kehti juurdepääsupiirangu kehtivuse ajal, välja arvatud ülikooli õigus lõputööd reprodutseerida üksnes säilitamise eesmärgil.*

30.04.2022

_____ (kuupäev)

Ehituse ja arhitektuuri instituut

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: Mihkel Sari, 153829

Õppekava, peeriala: EAEI02/15 - Ehitiste projekteerimine ja ehitusjuhtimine, ehitustehnika

Juhendaja: Ergo Pikas, Tallinna Tehnikaülikool, +372 56455953

Konsultant: Vaiko Veelaid, Hades Geodeesia OÜ, vaiko@hades.ee

Lõputöö teema:

(eesti keeles) *Scan to BIM* töövood, meetodid ja tehnoloogiad olemasolevate korterelamute näitel

(inglise keeles) *Scan to BIM Workflows, Methods and Technologies in the Context of Existing Apartment Buildings*

Lõputöö põhieesmärgid:

1. Olemasolevate korterelamute geomeetriliste hälvete kaardistamine ja hindamine
2. Scan to BIM kontseptsioonide, töövoogude ja tehnoloogiate kaardistamine ja hindamine.

Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Olemasolevate tehnoloogiate ja töömeetodite kaardistamine	31.12.2021
2.	Punktipilvede praktiline töötlemine ja geomeetria analüüsimine	28.02.2022
3.	Järelduste tegemine ja töö tulemuste kirjeldus	30.04.2022

Töö keel: eesti **Lõputöö esitamise tähtaeg:** 23.05.2022

Üliõpilane: Mihkel Sari

Juhendaja: Ergo Pikas

Konsultant: Vaiko Veelaid

Programmijuht: Irene Lill

Kinnise kaitsmise ja/või lõputöö avalikustamise piirangu tingimused formuleeritakse pöördel

SISUKORD

EESSÕNA	7
LÜHENDITE JA TÄHISTE LOETELU.....	8
SISSEJUHATUS	9
1. KIRJANDUSE ÜLEVAADE	10
1.1 JÄTKUSUUTLIKKUS JA RENOVEERIMISTE LAINE	10
1.1.1 Timmitud ehitus.....	11
1.1.2 Industrialiseerimine.....	12
1.1.3 Digitaliseerimine	12
1.2 BIM MUDELISSE SKANEERIMINE	15
1.2.1 Informatsioonivajaduste väljaselgitamine.....	16
1.2.2 Skaneerimise kvaliteedi määramine	18
1.2.3 Skaneerimise teostamine	19
1.2.4 Andmete töötlus ja mudeli loomine	23
1.3 OLULISEMAD JÄRELDUSED	25
2. UURIMISTÖÖ METOODIKA	27
2.1 MÕÖDISTUSPROJEKTIDE VALIM	27
2.2 OLEMASOLEVATE HOONETE GEOMEETRILINE ANALÜÜS	29
2.3 MUDELI GENEREERIMINE PUNKTIPIILVEST	30
3. TULEMUSED	32
3.1 OLEMASOLEVATE HOONETE GEOMEETRILINE ANALÜÜS	32
3.1.1 Kasutatud tarkvara	32
3.1.2 Hälvete suurused	35
3.2 MUDELI GENEREERIMINE PUNKTIPIILVEST	40
3.2.1 Punktipilve töötlus ja ettevalmistus	41
3.2.2 Poolautomaatne mudeli koostamine	43
3.2.3 Automaatne BIM mudeli genereerimine	45
3.2.4 Mudeli võrdlus punktipilvega	46
3.2.5 Mudeli genereerimise tarkvara võrdlus	47
3.3 LÄHTEKOHAD SCAN TO BIM RAKENDAMISEKS.....	47
3.3.1 Olemasolevate kortermajade geomeetrilised hälbed	47
3.3.2 Nõuded skaneeritavale hoonele	48
3.3.3 Nõuded skaneerimisele ja punktipilvele.....	48
3.3.4 Scan to BIM protsessi lihtsustamine	49
3.4 TULEMUSTE LÜHIKOKKUVÕTE.....	49

4. ARUTELU	51
KOKKUVÕTE.....	53
CONCLUSION	54
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU	55

EESSÕNA

Töö käsitleb lähematel aastakümnetel ees seisvat väljakutset eelmisel sajandil ehitatud kortermajade massilisel renoveerimisel. Eestis kasutusel olevast hoonefondist suur osa ei vasta tänapäevastele energiatõhususe nõetele ning järgmise 30 aasta jooksul vajab renoveerimist umbes 22600 kortermaja. Esimese sammuna kaardistatakse käesolevas töös tüüpilised kõrvalekalded selliste kortermajade geomeetrias. Teiseks hinnatakse olemasolevaid võimalusi *Scan to BIM* kontseptsioonide rakendamiseks kortermajade puhul, et tulevikus võtta laiemalt kasutusele vastavaid tehnoloogiaid ja luua efektiivne töövoog kortermajade renoveerimise protsessi tõhustamiseks.

Lõputöö teema sõnastati koostöös juhendaja Ergo Pikasega. Töö tegemisel oli peamiseks lähteandmeteks erinevate Eestis paiknevate kortermajade ja tööstushoonete punktipilved, mille hankis juhendaja. Tehnoloogilist, tarkvaralist ja sisulist abi ning konsultatsiooni pakkus Hades Geodeesia OÜ juhatuse liige Vaiko Veelaid. Mitmed tarkvaratootjad võimaldasid tasuta litsentsi lõputöö raames programmide täies mahus kasutamiseks.

Võtmesõnad: *Scan to BIM*, punktipilv, laserskaneerimine, renoveerimine, magistritöö.

Lühendite ja tähiste loetelu

BIM – ingl. *building information modelling* ehk ehitusinfo modelleerimine.

BIM mudel - hoone infomudel, mis sisaldab endas lisaks hoone ja selle elementide geomeetria ka erinevat mittegeomeetrist infot.

Scan to BIM – füüsilise objekti, näiteks hoone või maastiku, skaneerimise ja modelleerimise protsess, mille tulemusel valmib BIM mudel.

Timmitud ehitus – ingl. *lean construction* on töö korraldamise põhimõte, mille eesmärk on vähendada erinevate meetodite abil liigset ressursside kulutamist ja suurendada samade ressursside eest saadud kasu.

LOD - ingl. *level of detail* ehk detailsusaste.

LOA - ingl. *level of accuracy* ehk täpsusaste.

Punktipilv – digitaalsete andmete kogum, mis kujutab endast suurel hulgal punkte. Igale punktile on määratud koordinaadid ja võib olla määratud muid mittegeomeetrisi andmeid. Punktipilv võib sisaldada ka täiendavaid andmeid skaneerimispositsioonide või pilve kohta tervikuna.

Struktureeritud punktipilv – ingl. *structured point cloud* või *non-unified point cloud* ehk tark punktipilv, mis sisaldab suuremal hulgal metaandmeid, skaneerimise positsioonide asukohti ning panoraampilte nendest asukohtadest.

Ühildatud punktipilv – ingl. *unified point cloud* või *non-structured point cloud* ehk lihtsustatud punktipilv, mis sisaldab ainult punktide koordinaate ning lihtsamaid parameetreid.

SISSEJUHATUS

Vajadus töö teema järele tuleneb Euroopa Liidu kliimaneutraalsuse ja jätkusuutliku ehituse eesmärkidest. Nende kohaselt peaks aastaks 2050 olema kõik uued ja eksisteerivad hooned liginullenergiahooned. Eesti kontekstis meie kliimat ning energia tootmise tehnoloogiat arvestades on vajadus jätkusuutlikumate hoonete järele eriti paikiline. Kuna uute hoonete ehitamine on väga ressursimahukas, siis oleks säästlikum kasutada maksimaalselt olemasolevaid ehitisi ning neid võimalusel renoveerida. Sellest tulenevalt on Eestis koostatud hoonete rekonstrueerimise pikaajaline strateegia, mis seab ülesandeks järgmise 30 aasta jooksul renoveerida 22600 kortermaja.

Sellise mahuka ülesande täitmiseks on vaja läheneda süsteemselt ja töötada välja standardne lahendus tüüpilise korterelamu renoveerimiseks. Siinkohal on oluline võtta kasutusele uusimad tehnoloogiad ehituses, et saavutada soovitud tulemus efektiivselt ja säästlikult. Seejuures on asjakohane rääkida tehnoloogiast nagu laserskaneerimine ja BIM mudelite genereerimine, mis on suurepärased abivahendid hoonete hetkelolukorra kaardistamiseks ja renoveerimisprojektide koostamiseks. Nende tehnoloogiate rakendamise võimaluste uurimisele käesolev lõputöö peamiselt keskendubki.

Lõputöö eesmärk on kaardistada võimalused ja lähteolukord NSVL ajal ehitatud paneel- või kivikonstruktsioonist kortermajade renoveerimisprojektide koostamiseks. Selleks keskendub käesolev töö kahele põhilisele alaeesmärgile:

- 1) olemasolevate korterelamute geomeetriliste hälvete kaardistamine ja hindamine;
- 2) *scan to BIM* kontseptsioonide, töövoogude ja tehnoloogiate kaardistamine ja hindamine.

Lõputöö eesmärkide saavutamiseks on uurimistöö jagatud kolmeks osaks. Esimeses osas käsitletakse kirjanduse ülevaate vormis trende ehituses ning BIM mudelisse skaneerimise protsessi. Teises osas kirjeldatakse praktilise osa metoodikat. Töö praktiline osa hõlmab endas olemasolevate kõnealuste kortermajade geomeetriliste hälvete tuvastamist ning punktipilvest BIM mudeli genereerimise protsessi ja töömeetodite kaardistamist. Kolmandaks kirjeldatakse praktilise töö tulemusi, millele järgneb arutelu ja kogu töö kokkuvõte.

1. KIRJANDUSE ÜLEVAADE

Kirjanduse ülevaates käsitletakse varasemalt samal teemal kirjutatud töid. Lähtuvalt töö eesmärgist vaadatakse esiteks üldiseid trende ehituses, mida saaks rakendada ka vanade kortermajade renoveerimislahenduste väljatöötamisel. Teiseks uuritakse *scan to BIM* protsessi, selle rakendusnäiteid ning kasutusvõimalusi kortermajade massilisel renoveerimisel.

1.1 Jätksuutlikkus ja renoveerimiste laine

Euroopa Komisjon on väljatöötanud Euroopa roheleppe arengustrateegia, mis seab eesmärgiks Euroopa majanduse kliimaneutraalsuse saavutamise aastaks 2050. Kliimaneutraalsuse saavutamine eeldab mitmete erinevate valdkondade olulist keskkonnaalast arengut, mille saavutamiseks on väljapakutud mitmesuguseid meetmeid. Erinevate hinnangute kohaselt tarbivad hooned Euroopa Liidus umbes 40% kogu tarbitavast energiast ning eraldavad 36% kasvuhoonegaasidest. Seetõttu on arengustrateegia väga relevantne just hoonete ja ehituse valdkonnas. Euroopa liidu eesmärgid sätestavad näiteks, et aastaks 2050 peavad kõik olemasolevad ja uuena valmivad hooned olema liginullenergiahooned. (Euroopa komisjon. 2019)

Eestis on hoonete energiatarbimise osakaal Euroopa Liidu keskmisest veel suurem, mistõttu on hoonete kaasajastamine Eesti kontekstis eriti aktuaalne. Sellest tulenevalt on Eestis väljatöötatud hoonete rekonstrueerimise pikaajaline strateegia. See seab lähteülesandeks järgmise 30 aasta jooksul renoveerida väga suurel hulgal hooneid, hinnanguliselt 141 000 hoonet kogupindalaga 54 miljonit ruutmeetrit. Strateegia käsitleb ehitisi, mis on kasutusele võetud enne 2000. aastat. Just nende energiatarbimine on oluliselt madalam uuematest hoonetest. Kortermajad moodustavad sellest umbes 22600 hoonet kogu netopindalaga 28,3 miljonit ruutmeetrit. See on 52% kogu vajalikust renoveerimismahust. Strateegias väljatoodud andmete kohaselt saabub korterelamute renoveerimise vajaduse kõrgpunkt aastatel 2030 kuni 2040. Valdav osa käsitletud korterelamutest asub Harjumaal (8060), Tartumaal (2480), Ida-Virumaal (2140) ja Pärnumaal (2110). Mastaapse renoveerimise tulemusel peaks soojusenergia tarbimine vähenema kuni 70%, elektrienergia tarbimine kuni 20% ning CO₂ tootmine kuni 90%. (Tallinna Tehnikaülikooli ehituse ja arhitektuuri instituudi liginullenergiahoonete uurimisrühm. 2020)

Kui soovime eelnevalt mainitud eesmäärke täita, siis kasutades praeguseid lahendusi ja meetodeid ootab ees äärmiselt suur tööde maht juba ainuüksi renoveerimiste

kavandamisel. Renoveerimisprojektide korraldamisel on vaja muuta tavapäraseid harjumusi ning leida nutikamad ja efektiivsemaid lahendusi. Üks pool sellest on efektiivsemate töömeetodite ja tehnoloogiate kasutusele võtmine, mida toetavad sellised ehitusvaldkonna trendid nagu timmitud ehitus, digitaliseerimine ja tootmisprotsesside industrialiseerimine. Teiseks tuleb mõelda kasutatavate materjalide ning nende tootmisprotsessi säästlikkuse peale. Tootmisprotsessis väiksema CO₂ jalajälje annab näiteks puidupõhiste materjalide kasutamine betooni ja terase asemel. (Gustavsson, Sathre. 2011) Järgnevalt kirjeldatakse viimase aja olulisemaid trende ehituses, millest on potentsiaalselt abi mastaapse renoveerimise laine korraldamisel.

1.1.1 Timmitud ehitus

Timmitud ehituse (ingl. *lean construction*) peamine eesmärk on vähendada kõikvõimalike ressursside kulutamist ja jäätmete tootmist, sealjuures suurendades sama hulga ressursside eest saadavat väärtust. Põhimõtte on selles, et mistahes protsessi juures tuleks vähendada ajakulu ebavajalikele tegevustele ja maksimeerida aega reaalselt väärtust loovate tegevuste teostamiseks. Timmitud ehituse põhimõtte kohaselt eristatakse erinevat tüüpi ebavajalikku ressursikulu tekitavaid protsesse ning püütakse iga ressursi asjatut kulutamist vähendada. Ebavajalikku ressursikulu võib põhjustada näiteks üleliigne kauba transportimine, ooteaeg inimese või masina töös, ületootmine või defektide tekkimine. Nende ja mitmete muude probleemide vältimiseks rakendatakse tootmisel või ehitusel selliseid põhimõtteid nagu tööprotsessi standardimine, vootõhususe ja väärtustõhususe tõstmine ning töökeskkonna kujundamine. (Koskela, Ballard, Tommelein. 2002)

Timmitud ehituse põhimõtete rakendamise meetmetena on kasutatud näiteks automaatseid tööaja kasutuse tuvastamise süsteeme ehitusplatsil, et aru saada ja optimeerida tööliste ajakasutust. Üks edukas näide sellise süsteemi rakendamisest viidi läbi näiteks Soomes 2018. aastal (Zhao et al. 2021). Erinevate uuringute käigus saadud tulemustest selgub, mõningatel juhtudel võib otseselt kasuliku töö tegemisele kuluda vähem kui 20% tööajast. Ülejäänu kulub mitmete ettevalmistuste ja kõrvaltegevuste peale või on täielikult raisatud aeg (Kalsaas. 2010). Timmitud ehituse põhimõtted püüavadki ühe eesmärgina vähendada raisatud aega ja maksimeerida kasuliku töö osakaalu. Oluliselt lihtsam on seda küll rakendada tehasetingimustes, kus töötavad iga päev samad inimesed kindlatel töökohtadel ja järgivad välja kujunenud protseduure. Siiski on mingil määral võimalik samu põhimõtteid rakendada ehitusplatsi töö korraldamisel. Korterimajade renoveerimise juures aitab timmitud ehituse juurutamisele kaasa asjaolu, et korterimajad on valmistatud tüüpprojektide järgi ning samu

renoveerimislahendusi saab kasutada korduvalt mitmete hoonete puhul (Salem et al. 2006).

1.1.2 Industrialiseerimine

Industrialiseerimine on juba pikalt kestnud ning kasvav trend paljudes valdkondades. Just ehitussektoris on industrialiseerimine toonud kaasa olulist efektiivsuse kasvu ning üks parimaid industrialiseerimise näiteid kortermajade renoveerimisel on tehases valmistatud elementide ja moodulite kasutamine. (Miilits, Rak. 2020)

Sellel meetodil on mitmeid eeliseid klassikalise ehitusplatsil ehitamise ees. Näiteks kaob risk ilmastikust tulenevate tööseisakute tekkimiseks, tõhusamalt saab tagada tööohutust, optimeerida tööprotsesse ning igapäevaselt tuttavas keskkonnas töötades kulub töötajatel vähem aega kohanemisele ja ootamatute probleemide lahendamisele. Vana hoone fassaadi renoveerimisel oleks ainus töö välistingimustes elementide monteerimine, mis on oluliselt kiirem kui terve fassaadi ehitamine kohapeal mistahes materjalidest. (Miilits, Rak. 2020) Kõige enam levinud materjal selliste elementide valmistamiseks on puit. Puidupõhine materjal on kaalult kerge, lihtsasti töödeldav ning selle kasutamine tekitab vähem kahjulikku keskkonnamõju ja CO₂ eraldumist võrreldes betoonist ja terasest materjalide tootmisega. (Gustavsson, Sathre. 2011)

Ühe võimaliku lahendusena saab vanu korterelamu renoveerida just monteeritavate tehases valmistatud fassaadimoodulite paigaldamisega. Sellist lähenemist on kasutatud näiteks 2018. aastal Akadeemia tee 5a korterelamu renoveerimisel, mille käigus renoveeriti 1986. aastal ehitatud kortermaja liginullenergiahooneks. Renoveerimise käigus paigaldati hoone olemasolevale välisfassaadile tehases toodetud puitkarkasspaneelid. Renoveerimise järgselt toodi välja võimalusi, mida edaspidi sarnaste projektide juures paremini teha. Muuhulgas toodi välja vajadus automatiseeritud *scan to BIM* protsessi järele ning võimalus BIM tehnoloogia abil paremini integreerida erinevaid projekteerimise protsesse. (Pikas et al. 2021)

1.1.3 Digitaliseerimine

Digitaliseerimine on ehituses aktuaalseks muutunud tänu BIM mudelite laialdasemale kasutamisele ja tehnoloogiate odavnemisele. Digitaalsete lahenduste kasutusele võtmine on aidanud inseneride tööd tõhusamalt teha juba alates arvutite kasutusele võtmisest. Infotehnoloogia arengu jätkudes suudab tarkvara ja tehnoloogia ka ehitusvaldkonnas järjest keerulisemaid ülesandeid täita. (Miilits, Rak. 2020)

BIM mudelite laialdasem kasutamine on digitaliseerimise üks olulisemaid trende. Infomudel koostatakse ehitatavate hoonete puhul enamasti projekteerimise faasis. See annab võimaluse konstrueerida juba hoone kavandamisel see digitaalselt. Tänu sellele analüüsida, simuleerida ning visualiseerida lõpptulemust. Ehituse korraldamise käigus on mudeli eeliseks võimalus eelnevalt optimeerida ehitamise protsessi. Projekteerimise käigus annab BIM mudel võimaluse genereerida jooniseid ja spetsifikatsioonide väga lihtsa vaevaga. (Miilits, Rak. 2020)

Laserskaneerimine on tõhus meetod olemasolevate hoonete või objektide digitaliseerimiseks. Tüüpiline laserskanner saadab mõõdistamise käigus suurel kiirusel erinevates suundades välja laserkiiri, määrares iga kord ühe punkti asukoha skanneri suhtes. Mõõdistuse käigus võib skanner tuvastada miljoneid punkte. Spetsiaalne tarkvara koostab saadud andmetest kindlas formaadis punktipilve. Kombineerides mõõdistusi erinevatelt positsioonidelt või kasutades liikuvaid mõõdistusseadmeid, saab koostada täpsema ja terviklikuma punktipilve (Haljend. 2020). Punktipilve võib lihtsalt visualiseerida või saab selle põhjal koostada BIM mudeli. Mudelit omakorda võib kasutada näiteks renoveerimisprojekti koostamiseks või hoone pikaajaliseks haldamiseks (Adan et al. 2018), maastiku uurimiseks (Telling et al. 2017), mahtude arvutamiseks (Slattery et al. 2012), simulatsioonide tegemiseks ja paljudeks muudeks otstarveteks (Marshall, Stutz. 2012).

Fotogramm-meetria on sarnane protsess laserskaneerimisele. Selle tehnoloogiline erinevus seisneb selles, et laserkiirte asemel kasutatakse kõrgresolutsioonilist kaamerat, mis teeb mõõdetavast objektist seeria pilte erinevatest asukohtadest ja erinevate nurkade alt (Syring, Nylund. 2018). Samuti võib kasutada eriotstarbelisi seadmeid, näiteks infrapunakaamerat termograafia tegemiseks (Jo et al, 2021). Fotogramm-meetria droon jäädvustab tavaliselt fotod JPEG formaadis vähemalt 70-80% ülekattega ning peale nende töötlemist on võimalik tulemusi eksportida näiteks geomeetriliseks võrkudeliks (OBJ, FBX) või punktipilveks (RCM, RCS). Mida rohkem ühiseid punkte õnnestub erinevate fotode pealt leida, seda tihedam ja täpsem tuleb punktipilv. Näiteks on maastikku kaardistades metsamassiividest konkreetsete punktide tuvastamine keerulisem ja seetõttu loodusliku maastiku kaardistamiseks on meetod väiksema täpsusega. Samas maastikul asetsevad konkreetsete objektid nagu hooned ja rajatised on fotode pealt väga selgelt tuvastatavad ja nende modelleerimise täpsus fotogramm-meetria meetodiga võib õige teostuse korral olla väga suur (Syring, Nylund. 2018). Siiski tuleb arvestada, et sügavuskoordinaate (objekti kaugust seadmest) ei ole võimalik mõõta nii täpselt kui laserskaneerimise puhul.

Fotogramm-meetria mõõdistuse järgselt peab saadud pilte töötleva spetsiaalse tarkvaraga, mis leiab piltidelt ühiseid punkte ning arvestades piltide jäädvustamise positsioone ja kaldenurki määrab igale tuvastatud punktile asukoha kolmemõõtmelises ruumis. Mida rohkem punkte suudab tarkvara fotodelt tuvastada, seda tihedam tuleb punktivilv. Fotogramm-meetria suurimaks eeliseks on võime suhteliselt lihtsalt jäädvustada droonilt suuremõõtmelisi alasid või kõrgeid objekte, kuhu statsionaarne laserskanner hästi ei ulatu. Fotogramm-meetria lahendused on leidnud kasutust lisaks mudelite koostamisele ka näiteks mahtude arvutamisel, tööde progressi jälgimisel, termopiltide koostamisel ning teede ja maakasutuse kaardistamisel ja mõõdistamisel. (Syring, Nylund. 2018)

Virtuaalne reaalsus, mis on loodud ehitusinfo põhjal, leiab rakendust ehituse kavandamisel, ehitamise käigus ja ka hilisemal ehitise kasutamisel. Näiteks ehituse kavandamisel saab võrrelda erinevaid arhitektuurseid lahendusi ja realistlikult simuleerida hoones ringi liikumist 3D prillidega. Ehituse ajal saab liitreaalsust kasutades jälgida ehituse progressi võrreldes valmishitatud elemente kavandatud hoonega samaaegselt platsil liikudes. Ehitise kasutamise käigus saab virtuaalreaalsuses kavandada ümberehitustöid või muudatusi hoones. (Sidani et al. 2019)

Simulatsioonide läbiviimine on võimalik kasutades BIM mudeli geomeetrilisi ja mittegeomeetrilisi andmeid. Näiteks saab simuleerida hoone soojuslikku ja niiskuslikku toimivust erinevates ilmastikuoludes, ruumide akustilisi omadusi, sisekliima tingimusi, inimeste liikumist tavaolukorras või evakueerudes ning palju muud. (Sun, Turkan. 2020)

Ehitusmasinate juhtimine digitaalsete andmete põhjal annab täpsuse, mida manuaalse juhtimine korral poleks võimalik saavutada. Digitaalset juhtimist on rakendatud näiteks vaiamasinate ja tunnelimasinate juhtimisel, mis on aidanud säästa oluliselt aega, raha ja materjali. Näiteks teostati üks edukas näide sellest aastatel 2012 kuni 2018 Londonis Victoria Station metroojaama laiendustöödel, mille käigus rajati 280m uusi tunnelid ning hulgaliselt muid maa-aluseid ruume. Tunneliseinte tugevdamiseks kasutatud vaiad puuriti pinnasesse masina poolt, mis luges andmeid otse BIM mudelist. Selliselt saavutati eksimuste osakaal 0,00074% tavapärase 5-10% asemel, mis säästis 4 miljoni naela väärtuses potentsiaalseid lisakulusid. (Sacks et al. 2018)

1.2 BIM mudelisse skaneerimine

Mudelisse skaneerimise kasulikkus võib avalduda erinevates ehituse etappides paljude tegevuste juures. Näiteks projekteerimise faasis saab skaneerimise abil tuvastada olemasoleva maastiku geomeetria, genereerida jooniseid ja spetsifikatsioone. Ehituse käigus on võimalik keerukaid lahendusi visualiseerida ning saada nende kohta infot otse mudelist. Samuti arvutada mahtusid või jälgida ehituse progressi. Lisaks võib ühendada skaneeritud andmed projekteeritud mudeliga, mis on eriti kasulik ehituse käigus tekkinud projektimuudatuste visualiseerimiseks või ehitusvigade tuvastamiseks. (Wang, Guo, Kim. 2019)

Võtmetähtsusega on BIM mudelisse skaneerimine just renoveerimisprojektide puhul, sest nende juures on oluliseks alguspunktiks lähteolukorra kaardistamine. Selleks kasutatakse spetsiaalseid tehnoloogiaid, et mõõdistada kiiresti ja täpselt suuremahulisi objekte. Sellised tehnoloogiad nagu laserskaneerimine või fotogramm-meetria aitavad säästa olulisel määral töötunde ning vähendada vigade või ebatäpsuste tekkimise tõenäosust. Mõõdistuse tulemusel saadakse tavaliselt punktipilv ja punktipilvest modelleeritakse BIM mudel. (Wang, Guo, Kim. 2019)

Mudeli koostamine punktipilve põhjal klassikaliste meetodete abil nõuab suurel hulgal töötunde, seetõttu on viimasel ajal töötatud välja erinevaid programme, mis mudeli genereerimist lihtsustavad või automatiseerivad. Sellegi poolest tuleb mingil hulgal andmeid alati mudelisse käsitsi sisestada. Kokkuvõttes selline objektist mudeli loomine on BIM mudelisse skaneerimise töövoog (ingl. *scan to BIM workflow*). Selles peatükis järgnevalt kirjeldatud *scan to BIM* protsess põhineb artiklil „*An application oriented scan-to-BIM framework*“ (Wang, Guo, Kim. 2019). Alloleval joonisel 1.1 on väljatoodud 4-osaline töövoog koos alapunktidega.



Joonis 1.1 Scan to BIM töövoog (Wang, Guo, Kim. 2019)

1.2.1 Informatsioonivajaduste väljaselgitamine

Esimese asjana tuleb selgeks teha, mille kohta üldse infot koguda on vaja. See sõltub väga suurel määral andmete kasutamise lõppeesmärgist. Kui soovime skaneeritud teostusmudeli baasil koostada vanale kortermajale renoveerimisprojekti, siis sõltub alusmudeli mõõdistustäpsus suuresti renoveerimisprojekti kasutatavast ehitustehnoloogiast ja materjalidest. Näiteks kui renoveeritav hoone kaetakse tehases toodetud soojustatud seinamoodulitega, siis võib juba mõne sentimeetrine kõrvalekalle või lokaalne erinevus paneelide tasapinnas tekitada probleeme monteerimisel. Samas kui renoveerimisel kaetakse hoone sein hoopis plaatsoojustusega ning krohvitakse üle, siis on fassaadi geomeetria kõrvalekalle mõju väiksem. (Miilits, Rak. 2020)

Igal juhul on vajalik tuvastada suuremad hoone geomeetrilised hälbed, et lõpptulemus peale renoveerimist oleks korrektne ja hoone konstruktsiooni geomeetrilised hälbed ei mõjutaks fassaadi kvaliteeti. Samuti aitab see ennetada ootamatuid lisatöid, mis muidu selguvad alles ehituse käigus. Tüüpiliselt tuleks enne mõõdistust määrata järgnevad infovajadused. (Wang, Guo, Kim. 2019)

Milliste elementide kohta infot koguda? Enamasti ei ole vaja tuvastada igast skanneri ette jäävast punktist vastavat objekti, mõnikord võib piirduda üksikute elementide või hoone osaga. Liiga suure infohulga kogumine suurendab töömahtu igas järgnevas töö etapis, samas tuleb koguda piisavalt andmeid, et soovitud lõpptulemus oleks saavutatav. Seetõttu on juba alguses oluline määrata, millised elemendid skaneeritavas objektis meid üldse huvitavad. Näiteks võib skaneerimise fookuses olla hoone konstruktsioon, torustikud, aknad-uksed, välisfassaad või mõni muu üksik osa objektist. Sel juhul pole muude elementide mõõdistamiseks vaja üldse ressursse kulutada. (Wang, Guo, Kim. 2019)

Millise detailsusega infot koguda? Detailsusaste ehk LOD (ingl. *level of detail*) määrab, kui palju infot on mudelis elemendi kohta. Detailsusaste käsitleb valminud BIM mudeli geomeetria ja informatsiooni detailsust ehk millist infot elemendi kohta on mudelis kajastatud ja millist mitte. Mida suurema detailsusega mudelit vaja on, seda rohkem infot tuleb mudeli koostamisel sisestada. Detailsusastmeid võib jagada järgnevalt:

- LOD100 - kontseptsioon, tähistab objekti sümboolselt;
- LOD200 - umbkaudne geomeetria;
- LOD300 - täpne geomeetria, määratud on mõõtmed, kuju, asukoht ja orientatsioon;
- LOD400 - tootmistäpsus, täpne geomeetria ja muu elemendi tootmiseks vajalik info;

- LOD500 - teostustäpsus, vastavus kontrollitud olemasoleva objekti põhjal. (Wang, Guo, Kim. 2019)

Kui on vajadus määratleda geomeetria ja informatsiooni terviklikkuse taset eraldi, siis võib kasutada GI tähisega detailsuse määramist. Esimene number näitab geomeetrilist täpsust (tähis G) ning teine number informatsiooni terviklikkust (tähis I). Tabelis 1.1 on toodud välja võimalikud kombinatsioonid informatsiooni terviklikkuse ja geomeetrilise täpsuse määramiseks GI indeksi järgi. (Badenko et al, 2019)

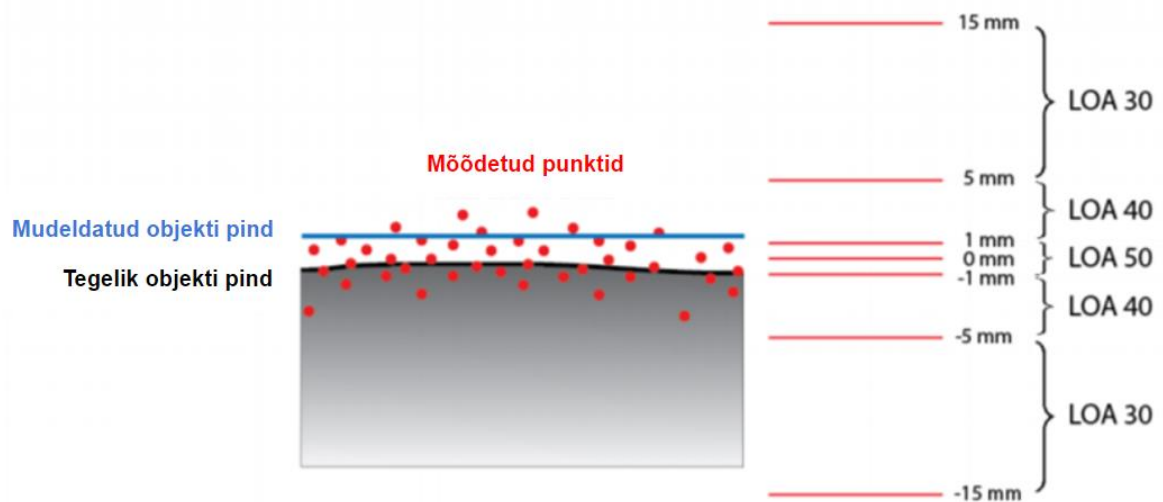
Tabel 1.1 Võimalikud GI indeksi kombinatsioonid (Badenko et al, 2019)

GI indeksi defineerimine		Informatsiooni terviklikkus, I		
		1	2	3
Geomeetria täpsus, G	1	GI 11	GI 12	GI 13
	2	GI 21	GI 22	GI 23
	3	GI 31	GI 32	GI 33

Milline täpsusaste (LOA) peab mudeli koostamisel olema tagatud? Täpsusaste (ingl. *level of accuracy*) määratakse hoone või elemendi modelleerimisele. Täpsusaste indikeerib mudeli vastavuse täpsust tegelikkusele. Automaatsel modelleerimisel tuleneb LOA sellest, kui kaugel asub modelleeritud elemendi tasapind punktipilves vastavate punktide kõige tihedamast kogumist. Manuaalsel modelleerimisel tuleneb LOA kasutaja valitud punkti kaugusest võrreldes tegeliku punkti asukohaga. LOA on iseloomulik just punktipilve põhjal koostatud mudelile, sest selle määramiseks on vajalik mudeli ja punktipilve geomeetria vaheline võrdlus. Täpsusastmeid jagatakse klassidesse vastavalt:

- LOA10 – täpsus >50mm;
- LOA20 – täpsus 15...50mm;
- LOA30 – täpsus 5...15mm;
- LOA40 – täpsus 1..5mm;
- LOA50 – täpsus 0...1mm.

Joonisel 1.2 on näidatud täpsusastme määramise põhimõtte elemendi modelleerimisel.



Joonis 1.2 Täpsusastme (LOA) määramine (USIBD, 2016)

Milliseid mittegeomeetrisi andmeid on vaja koguda? Kui koostada mitte ainult 3D mudelit, vaid terviklikku BIM mudelit, siis on oluline koguda ka mittegeomeetrisi andmeid nagu värv, pinna tekstuur, peegelduvus jms. Neid andmeid saab kasutada erinevate arvutuste või simulatsioonide koostamiseks ning hoone haldamisel informatiivsete andmetena. Mida rohkem vajalikke andmeid on võimalik koguda skaneerimise käigus automaatselt, seda vähem tuleb neid hiljem manuaalselt lisada. (Wang, Guo, Kim. 2019)

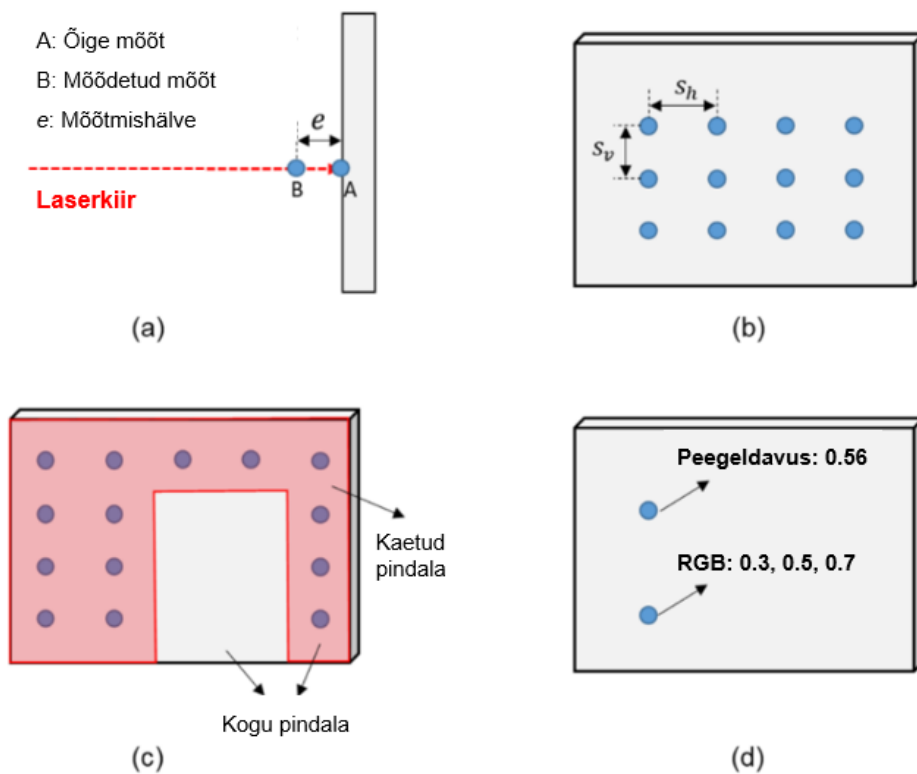
Korralikus BIM mudelis peaksid elemendid olema defineeritavad ka mõne klassifitseerimissüsteemi järgi. Sarnaste omaduste alusel saab punktidele määrata materjali, mis võib olla üks parameeter elementide klassifitseerimiseks (Brilakis et al. 2010). Eestis valmis 2020. aastal ühtne klassifitseerimissüsteem CCI (*Construction Classification International*) koos Eesti rahvusliku osaga (CCI-EE). Süsteem põhineb rahvusvahelistel standarditel ja selle eesmärk on anda ühtne alus kõikvõimalike ehitusprotsesside klassifitseerimiseks (Liias et al., 2021).

1.2.2 Skaneerimise kvaliteedi määramine

Skaneerimise puhul saab eristada 4 olulisemat parameetrit, mille nõutav vajadus tuleb enne skaneerimise algust määrata. Järgnevate punktidega ja joonisel 1.3 on parameetreid täpsemalt kirjeldatud. (Wang, Guo, Kim. 2019)

- **Täpsus** (a) määrab, kui suur hälve punktide distantse mõõtmisel on lubatud. See on oluline skaneerimispositsioonide valikul, sest üldjuhul objekti ja skanneri distantse suurenedes suureneb ka võimalik mõõtmishälve.

- **Ruumiline resolutsioon** (b) on mõõtepunktide tihedus horisontaalses ja vertikaalses suunas. Sellest sõltub otseselt punktide arv punktipilves.
- **Katvus** (c) määrab kui suur osa mõõdetavast piirkonnast on kaetud mõõtepunktidega. Määratakse selle põhjal, milliste hooneosade või elementide kohta on vaja infot koguda.
- **Muud parameetrid** (d) on näiteks pinnaomadused nagu värv või peegelduvus. Määratakse nõutud mittegeomeetriliste andmete põhjal. Lisaks võib olla seatud tehnilisi nõudeid skaneerimisel koostatava punktipilve failiformaadile või struktureeritusele, et hilisem mudeli genereerimine oleks tõhusam.



Joonis 1.3 Skaneerimisandmete kvaliteedi parameetrid (Wang, Guo, Kim. 2019)

1.2.3 Skaneerimise teostamine

Enne andmete kogumist tuleb veel määrata skaneerimise tehnoloogia ja seadmed, skaneerimise positsioonid, resolutsioon ja muud parameetrid. Lisaks on soovitatav koostada tööplan, kus on väljatoodud kogu skaneerimise läbi viimiseks vajalik info. Täpsed valikud tehakse vastavalt skaneerimisandmete kvaliteedinõuetele. Üldjuhul on skaneerimise tulemuseks mingil kujul punktipilv. (Wang, Guo, Kim. 2019)

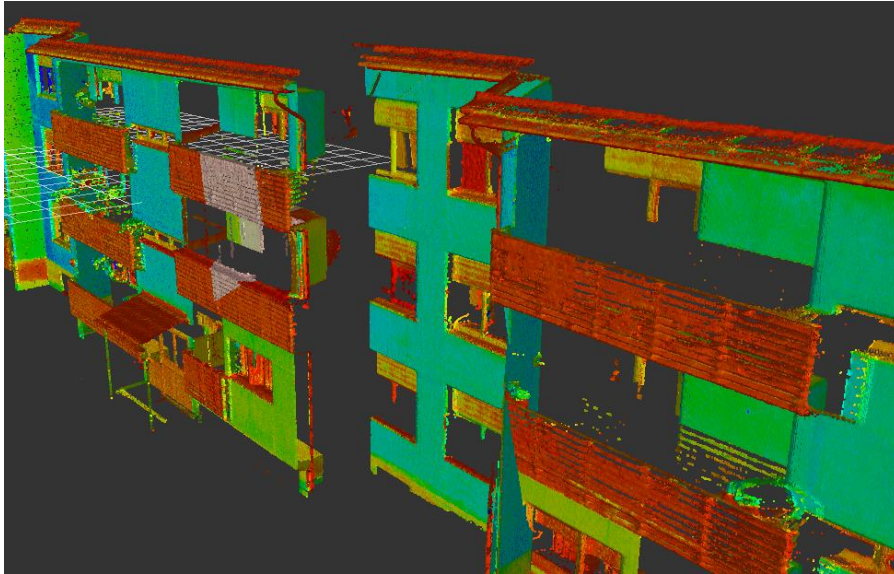
Tehnoloogia ja mõõdistusseadmete valik tuleb teha lähtudes skaneerimise eesmärgist ja objekti iseloomust. Kõige lihtsam viis üksikute punktide kaardistamiseks

on tahhümeetria, mille käigus määratakse kaldenurkade ja kauguse abil üksikute punktide asukoht ja kõrgus. Selle meetodiga ei ole otstarbekas suurel hulgal punkte kaardistada, aga saab kasutada näiteks kindlate referentspunktide määramiseks. Teise võimalusena on võimalik hoonet kaardistada fotogramm-meetria seadmega. See teeb objektist erineva nurga alt ülekattega pilte ning neid kombineerides tuvastab punkte punktivilves. Meetod sobib kõige paremini suuremate maa-alade kaardistamiseks, sest hoone fassaadi puhul võib tulemus olla ebatäpsem võrreldes lasermõõdistusmeetoditega. Kolmandaks saab kasutada laserskaneerimist, mis on olemuselt sarnane tahhümeetriale, kuid mõõdistab väga suurel hulgal punkte väga lühikese aja jooksul. Üldiselt tagab selline meetod hoone fassaadi mõõdistamisel kõige täpsema tulemuse. (Larsen et al, 2011)

Seadmete valiku juures on oluline arvestada, millise täpsusega andmeid tuleb koguda ning millised meetodid on sobivad hoone spetsiifilisi omadusi arvestades. Laserskaneerimise seadmed võivad üksteisest erineda näiteks selliste parameetrite poolest nagu võimalik punktutihedus, laseri mõõtekaugus ning võime eristada materjalide pinnaomadusi. (Marshall, Stutz. 2012)

Skaneerimispositsioonide õige valik on oluline eelkõige tervikliku punktivilve koostamiseks. Suure täpsusega terviklike andmete saamiseks on vaja valida erinevaid skaneerimispositsioone, et kogu mõõdistatav pind saaks skanneriga piisavalt lähedalt kaardistatud. Võimalusel peaks skaneerimispositsioonide ulatus olema valitud ülekattega. Vajalike positsioonide arvu suurendab nurgataguste ja muude keeruliselt ligipääsetavate kohtade nähtavust punktivilves. Näiteks rõdupiirde tagused seinad või väga kõrgel (ehk maapinnal asuvast skannerist kaugel) asuvad objektid. Joonisel 1.4 on näidatud punktivilv, kus skaneerimispositsioonid pole katnud täielikult kogu hoone fassaadi ning seetõttu on nurga taha tekkinud pime koht, mida ei ole võimalik hiljem täpselt modelleerida.

Lisaks tuleb arvestada, et mida suurema langemisnurga alt laseskiir punkti mõõdistab, seda suurem on oht mõõtmisvigade tekkimiseks (Haljend. 2020). Keerulise geomeetria mõõdistamiseks võivad appi tulla liikuvad skaneerimiseadmed, mis ei ole konkreetsele positsioonile fikseeritud. Käsiskanneri abiga on võimalik kiiresti ja mugavalt liikumise pealt andmeid koguda, mis on eriti kasulik näiteks kitsaste ja sopiliste siseruumide kaardistamisel. Skaneerimiseks või fotogramm-meetriaks kohandatud droonid aga suudavad ligi pääseda muidu kättesaamatult kõrgel asuvasse kohtadesse või kaardistada pealtvaates suuremaid maa-alasid korruga. Liikuvate seadmete miinuseks on see, et nendega ei saa koostada struktureeritud formaadis punktivilvesid. (Marshall, Stutz. 2012)



Joonis 1.4 Skaneerimispositsiooni puudumine kindla nurga alt

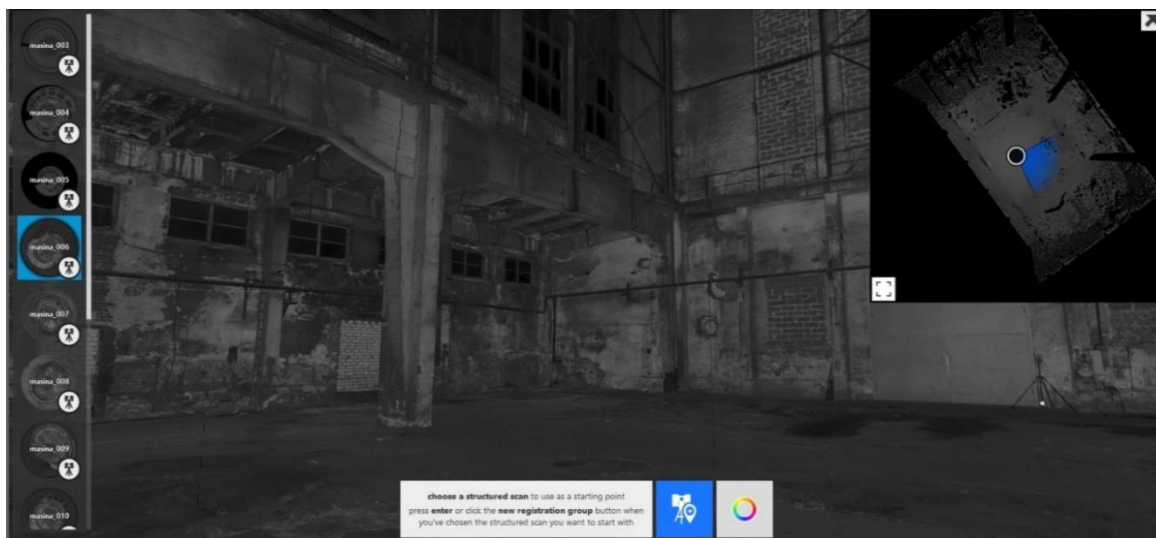
Resolutsioon sõltub skanneri võimekusest ja mõõdistatava objekti kaugusest. Eristada saab vertikaalset ja horisontaalset resolutsiooni, mis tuleb valida vastavalt määratud kvaliteedinõuetele. Kui nõutud resolutsiooni pole võimalik saavutada, tuleb lisada skaneerimise positsioone, skaneerida lähemalt või kasutada parema tehnilise võimekusega skannerit. (Wang, Guo, Kim. 2019)

Mittegeomeetrilised parameetrid on peamiselt erinevad pinnaomadused nagu värvus, temperatuur või peegelduvus. Nende jäädvustamiseks peab seadmel olema vastav võimekus. Mittegeomeetriliste andmete vajadus võib tuleneda otseselt skaneerimistöö eesmärgist või olla vajalik mudeli genereerimise lihtsustamiseks näiteks objektide tuvastamisel värvuse või peegelduvuse järgi. Mida rohkem mittegeomeetrilisi andmeid õnnestub skaneerimise käigus automaatselt koguda, seda vähem on hiljem manuaalset tööd nende lisamisega. (Wang, Guo, Kim. 2019)

Punktipilve struktureerituse järgi saab kõik punktipilved jagada kaheks – struktureeritud (ingl. *structured*) ja ühildatud (ingl. *unified*). Sageli saab neid eristada, vaadates punktipilve failiformaati.

Struktureeritud punktipilv on sisuliselt algupärane punktipilve fail, mis lisaks punktide koordinaatidele sisaldab ka erinevat metainfot, skaneerimise positsioonide asukohta ning panoraampilti igast positsioonist. Selline panoraampilt Autodesk ReCap programmis on näidatud joonisel 1.5. Struktureeritud punktipilve puhul on tegemist struktuuriga, mis võimaldab spetsiaalse tarkvara abil genereerida suure täpsusega BIM mudeleid. Mõni programm aktsepteerib või eelistab just stuktureeritud punktipilvesid, sest see annab tarkvarale suurema hulga infot, mida pilve töötlemisel või mudeli

genereerimisel kasutada. Struktureeritud punktipilve on võimalik saada ainult fikseeritud positsiooniga skaneerimise teel. Struktureeritud pilve saab konverteerida ühildatuks, kuid mitte vastupidi.



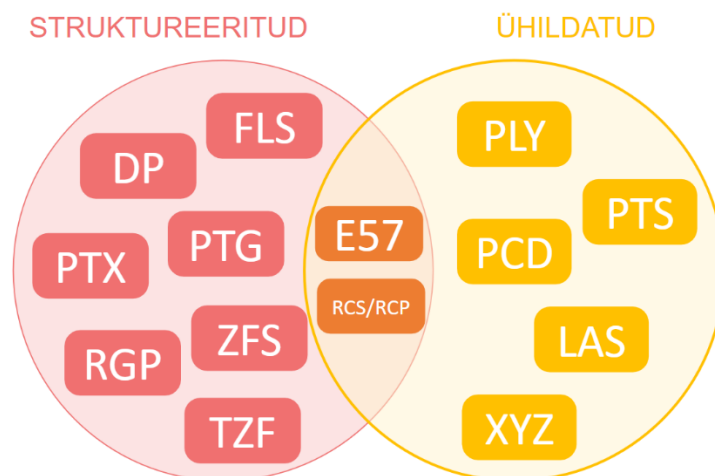
Joonis 1.5 Struktureeritud punktipilves sisalduv panoraampilt Masina tn 18 hoonest

Ühildatud ehk stktureerimata punktipilv on lihtsustatud variant punktipilvest, mis sisaldab vaid punktide koordinaate. Selline fail sobib hästi punktipilve visualiseerimiseks või poolautomaatseks mudeli genereerimiseks, kuid automaatselt hoone elementide tuvastamisel võib ühildatud formaat anda madalama kvaliteediga tulemuse. Ühildatud punktipilve teeb tavaliselt skaneerimise ajal liikuv seade nagu mobiilne käsiskanner või fotogramm-meetria droon. (Cintoo Cloud User Guide, 2022)

Andmefaili formaat määrab selle, kuidas on punktipilv üles ehitatud ja millist infot fail sisaldada võib. Andmete kodeeringu põhjal eristatakse binaarformaate ja ASCII formaate. Igal failiformaadil on kindlaksmääratud struktuur ja sellest tulenevalt võimaldavad need salvestada infot erinevalt. Siiski see ole tihti määrava tähtsusega, sest sarnast infot sisaldavaid punktipilvesid saab sageli töödelda ühest formaadist teise vastavalt vajadusele. Sealjuures tuleb küll tähelepanu pöörata, et konverteerimisel vajalikke andmeid kaduma ei läheks. (Thomson. 2018)

Mõnedel formaatidel on mingis olukorras eeliseid sõltuvalt konkreetsest tarkvarast, millega edasi töötatakse. Paljudel tarkvaradel on enda jaoks spetsiifiliselt kohandatud formaat. Näiteks RCS või RCP on Autodeskile omased faililaiendid. RCS fail sisaldab infot ainult ühe skaneerimise kohta. RCP on projektifail, mis koondab kokku ja viitab erinevatele RCS failidele, kuid ei sisalda ise mõõdistusandmeid. RCS formaadis punktipilv võib olla nii struktureeritud kui ka ühildatud kujul. Sarnaselt on paljudel tarkvaratootjatel väljatöötatud failiformaate, millega nende tarkvara kõige tõhusamalt toime tuleb.

Mõnel juhul saab failiformaadi järgi öelda, kas tegemist on struktureeritud või ühildatud punktipilvega, kuid näiteks RCP või E57 formaadid võimaldavad mõlemat varianti. Sel juhul on võimalik erinevust tuvastada näiteks selliselt, et avada punktipilv tarkvaras, mis näitab skaneerimise positsioone. Kui positsioonid on tarkvaras kuvatud, on tegemist struktureeritud punktipilvega. Joonisel 1.6 on väljatoodud mõned laiemalt levinud punktipilve formaadid ning näidatud, millised neist on ühildatud ja millised struktureeritud.



Joonis 1.6 Punktipilve struktureeritus vastavalt failiformaadile

1.2.4 Andmete töötlus ja mudeli loomine

Kui eelnev protsess on õigesti läbiviidud, siis peaks kogutud andmete põhjal olema võimalik koostada nõutud kvaliteedi ja detailsusega mudel. Skaneerimise käigus võib olla kogutud nii geomeetrilisi andmeid (punktide koordinaadid) kui ka mittegeomeetrilisi andmeid. Kui skaneerimisel ei olnud võimalik mõningaid vajalikke andmeid tuvastada, siis tuleb need selles etapis manuaalselt lisada. Skaneerimisega saadud mahukast andmehulgast konkreetse mudeli genereerimine on protsessi kõige töömahukam osa ja seetõttu kõige suuremat kasu loob just selle etapi maksimaalne automatiseerimine. Punktipilve töötlemisel on oluline arvestada selle tehniliste omadustega nagu pilve struktureeritus või andmefaili formaat. (Wang, Guo, Kim. 2019)

Punktipilve ettevalmistus hõlmab erinevaid tegevusi nagu kogutud andmete indekseerimine, registreerimine, puhastamine ja muu selline. Ettevalmistavate tegevuste vajadus sõltub edasistest protsessidest ja kasutatavast tarkvarast. Punktipilve esmase töötlemise käigus teostavad paljud programmid peale importimist esimesena punktipilve indekseerimise ehk töötlevad selle enda jaoks kergesti loetavasse formaati, kusjuures igale punktile lisatakse vajalik skaneerimisel kogutud info. Seejärel tuleb spetsiaalse programmiga punktipilved registreerida. Andmete registreerimine on

vajalik siis, kui punktid on skaneeritud vähemalt kahest erinevast positsioonist. Selle käigus võtab tarkvara erinevate skaneerimistega saadud toorandmed ja koostab neist kindlas formaadis tervikliku punktipilve. Näiteks kui ühte piirkonda on skaneeritud mitme nurga alt, tekib registreerimise käigus sellest kohast suurema täpsusega punktipilv. Enamikel juhtudel suudab tarkvara registreerimise läbi viia automaatselt, ilma et kasutaja peaks seadistust oluliselt muutma. (Autodesk Knowledge Network, 2022)

Punktipilve puhastamine on enamasti vajalik, sest skaneerimisel kogutakse hulgaliselt ebvajalikku infomüra objektidest, mille tuvastamine ei ole vajalik (puud, pöösad) või on oma asukohas ajutiselt (sõidukid, inimesed, mööbel). Sellised objektid võib juba skaneeritud punktipilvest eemaldada käsitsi või mõne spetsiaalse algoritmi abil (Han, 2017). Lisaks on ettevalmistuse käigus mõnikord vajalik pilve keeramine, koordinaatide muutmine, andmete käsitsi lisamine ja muud tegevused, et täita skaneerimise lõppeesmärke või lihtsustada mudeit genereeriva tarkvara tööd.

Mudeli genereerimise etapiks on punktipilv ettevalmistatud ja vastab kõigile vajalikele nõuetele. Modelleerimiseks kasutatakse erinevaid tarkvarasid, mis manuaalse töö ja automaatsete algoritmide kombinatsioonina koostavad soovitud parameetritele vastava punktipilve. Mudeli genereerimiseks tuleb skannerist või fotodelt saadud andmed konverteerida nõuetele vastavaks punktipilveks. Punktipilvest tuvastab tarkvara vajalikud elemendid, millele on võimalik lisada omadusi käsitsi või skaneerimisel kogutud geomeetriliste ja mittegeomeetriliste andmete põhjal. Alternatiiviks BIM mudeli elementide tuvastamisele võib keerulisema geomeetriaga objektide puhul kasutada ka näiteks geomeetriliste kujundite modelleerimist või polügoonvõrkude abil modelleerimist (Aule 2014).

Erinevate programmide tööpõhimõtted võivad üksteisest suuresti erineda. Näiteks EdgeWise on esialgselt väljatöötatud tehnosüsteemide tuvastamiseks ja seetõttu on programmis suur rõhk just torude ehk silindriliste elementide tuvastamisel, mida programm teeb 62% täpsusega. Samuti oskab EdgeWise leida omavahel identseid objekte ja neid dubleerida. Lisaks saab programm hakkama seinaelementide loomisega, kuigi loodud elementide mõõtmed pole alati korrektsed. Võrdluseks tuvastab tarkvara nimega Pointfuse tasapindu ja klassifitseerib neid seinteks või pörandateks vastavalt tasapindade orientatsioonile. Faro As-built seevastu kasutab tuvastamiseks lähenemist, kus kasutaja valib üksiku punkti tuvastataval objektil ning programm leiab punktipilvest vastavale elemendile kuuluvad teised punktid. Sarnaselt vajavad mitmed muud programmid kasutaja poolt valitud punktide etteandmist, manuaalset klassifitseerimist või muul moel inimese sekkumist protsessi. Kokkuvõttes suudavad erinevad

programmid mingil määral tööaega kokku hoida, kuid protsess vajab siiski suurel määral manuaalset tööd. (Drobnyi, Fathy, Brilakis; 2022)

Objektide tuvastamiseks geomeetria põhjal kasutavad programmid eelkõige kahte lähenemisviisi. Esimesel juhul tuvastatakse punktipilvest konkreetseid väiksemaid üksikuid objekte ja nende põhjal pannakse kokku mudeli terviklik pilt. Teisel juhul tuvastatakse kõigepealt suuremad tasapinnad ja selle põhjal hoone üldine geomeetria. Seejärel eraldatakse ruumid ja edasi nende sees asuvad objektid. Teine viis on objekte tuvastada on erinevate mittegeomeetriliste andmete põhjal nagu värv, pinna tekstuur, peegelduvus vms. (Drobnyi, Fathy, Brilakis; 2022)

Protsessi automatiseerimine eeldab, et mõõdistamisel on täpselt teada ja täidetud kriteeriumid, mille põhjal objekte punktipilvest tuvastama hakatakse. Sellised tingimused võivad olla näiteks akende ja uste avamine avade tuvastamiseks, korruste või muude punktipilvest raskesti eristatavate elementide tuvastamiseks fassaadile markerite lisamine või ruumidest ja fassaadi ümbert üleliigsete objektide nagu mööbel, taimestik või inimesed eemaldamine. (Brilakis et al. 2010)

Mudeli kontrollimisega on võimalik peale mudeli valmimist kontrollida selle täpsust ning tuvastada vigu. Kõige lihtsam viis selleks on importida vastavasse programmi valminud mudel ja skaneerimisega saadud punktipilv. Neid üksteisega kohakuti võrreldes on visuaalselt võimalik tuvastada vigu ja määrata mudeli teostustäpsus. Spetsiaalse tarkvaraga on võimalik ka punktipilve ja mudelit võrreldes koostada värviskeem (ingl. *heatmap*), mis toob värviskaalal välja kõige suuremad hälbed punktipilve ja mudeli vahel. (Anil et al. 2013)

1.3 Olulisemad järeldused

Eestis on suur hulk amortiseerunud hooneid, mida on lähimate aastakümnete jooksul vaja renoveerida. Hetkel on renoveerimiste maht kaks kuni viis korda väiksem kui oleks vaja, et saavutada Euroopa Liidu kliimapolitiika eesmäärke. Teema puudutab eriti kortermaju, mis moodustavad netopindalalt üle poole kogu renoveermist vajavast hoonete mahust. Eesoleva väljakutse tõhusaks lahendamiseks on suur potentsiaal tehnoloogia ja protsesside arendusel ning sihtotstarbelisel rakendamisel.

Suurima mõjuga trendid ehituses, mis mastaapset renoveerimist toetavad, on industrialiseerimine, timmitud ehitus ja digitaliseerimine. Kasutades hetkel kättesaadavaid tehnoloogiaid võiks suurima efektiivsuse kasvu korterelamute massiliseks renoveerimiseks saada kombineerides laserskaneerimist, BIM mudelite

genereerimist ning tehases valmistatud elementide kasutamist. Elementide valmistamine tehases võimaldab paremini rakendada ka timmitud ehituse põhimõtteid.

Võtmetähtsus seejuures on *scan to BIM* protsessi rakendamisel. Protsess hõlmab endas olemasoleva hoone skaneerimist, mille tulemusel valmib digitaalne punktipilv. Punktipilvest modelleeritakse spetsiaalse tarkvara abil mudel. Just mudeli genereerimine punktipilvest on etapp, mida tehakse tavapäraselt suurel määral manuaalselt ning see muudab kogu protsessi töömahukaks. Lõpptulemusena valminud mudel peab rahuldama kõik esialgselt määratletud infovajadused. Protsessi on küll arvukates teadustöodes erinevate nurkade alt kirjeldatud, kuid puudub ühtne standard töömeetodite rakendamiseks.

2. UURIMISTÖÖ METOODIKA

Töö peamiseks eesmärgiks on uurida ja hinnata olemasolevate kortermajade geomeetrisi hälbeid ning kaardistada võimalusi ja töömeetodeid punktipilvest BIM mudeli genereerimiseks. Kirjanduse ülevaates kirjeldatakse trende ehituses ja *scan to BIM* protsessi olemust. Uurimistöös osas on põhilised tegevused olemasolevate punktipilvede geomeetiline analüüs ja punktipilvest mudeli genereerimine. Kogu teemakäsitluse fookuses on Eestis eesolev kortermajade renoveerimiste laine ja selle teostamiseks efektiivsemate viiside leidmine.

Uurimistöös protsess koosneb viiest etapist. Esiteks ettevalmistus ja kirjanduse analüüs. Seejärel *scan to BIM* rakenduste tuvastamine ja võrdlusanalüüs. Kolmandaks punktipilvede kogumine ja organiseerimine. Peale seda olemasolevate ehitiste geomeetria analüüs ja järelduste tegemine. Lõpetuseks arutelu ning töö kokkuvõte.

2.1 Mõõdistusprojektide valim

Töö peamine fookus on punktipilvest BIM mudeli genereerimine ja seetõttu praktilises osas on võetud aluseks valmis punktipilved ning objektide skaneerimisega ei tegeletud. Mudeli genereerimine on ka protsessi sisuliselt kõige keerulisem osa, mis ei ole täna veel automatiseeritud. Just selles protsessi etapis kulub kõige rohkem töötunde.

Lähtuvalt töö eesmärgist keskendutakse peamiselt eelmisel sajandil ehitatud tüüpsete kortermajade jaoks lahenduse väljatöötamisele. Seega on mõõdistusprojektide valimis eelkõige vastavat tüüpi kortermajad. Geomeetria analüüs on tehtud peamiselt kortermajade põhjal. Mudeli genereerimise protsessi katsetamisel kasutati lisaks veel Astangu 27, Masina 18 ja Marati 5 punktipilvesid, et valimis oleks ka suuremaid tööstushooneid ja koolimaja. Seeläbi tuli töö käigus välja rohkem asjaolusid, millega erinevat tüüpi hoonete puhul mudeli genereerimisel arvestada.

Tabelis 2.1 on väljatoodud geomeetria analüüsis kasutatud kortermajad koos põhiliste andmetega. Tabelis väljatoodud andmed pärinevad Ehitusregistrist ning hoonete pildid erinevatest internetist vabalt kättesaadavatest allikatest.

Tabel 2.1 Geomeetria analüüsiks kasutatud hooned

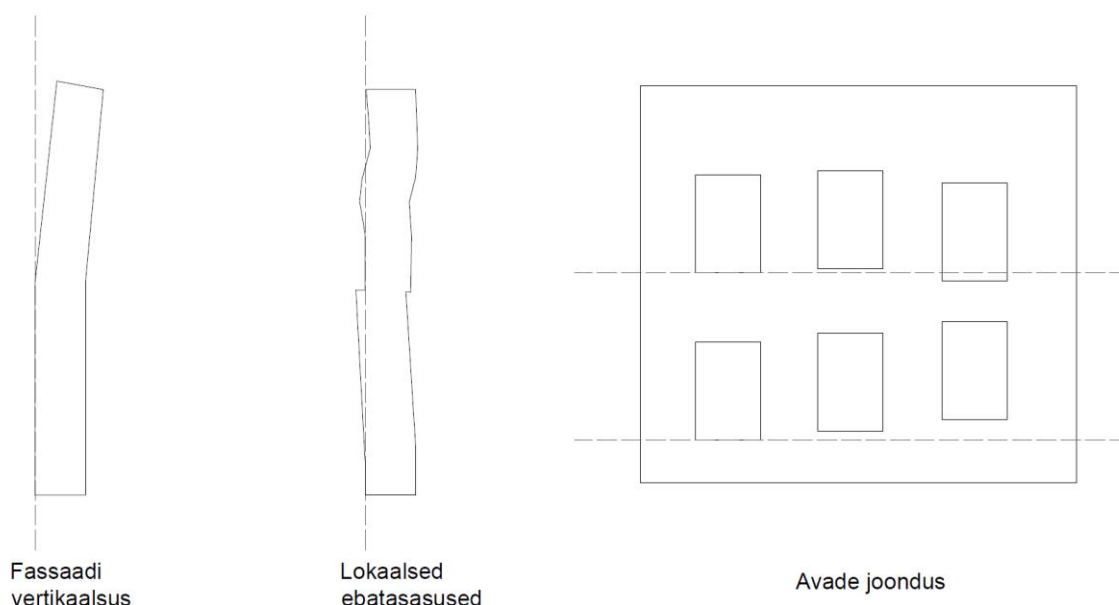
Pilt	Aadress	Konstruksioon / fassaad	Korruseid	Ehitus (Renov.)	Ehitusalune pind
	Akadeemia tee 5a, Mustamäe	Raudbetoonpaneel, praeguseks renoveeritud monteeritavate elementidega	5	1986 (2018)	1573 m ²
	Kauna 1, Kesklinn	Puit / krohvitud fassaad	3	1937	244 m ²
	Kevade 4, Kesklinn	Puit / krohvitud ja puidust fassaad	3	1917	597 m ²
	Kunderi 8, Kunderi 10 Kesklinn	Tellis / krohvitud fassaad	6	1970 1940	513 m ² 409 m ²
	Kuuma 4, Saue	Väikeplok, praeguseks renoveeritud monteeritavate elementidega	3	1986 (2022)	762 m ²
	Lohusalu tee 100, Lääne-Harju vald	Väikeplok / krohvitud fassaad	3	1987	577 m ²
	Nõmme tee 5, Kristiine	Tellis	5	1964	829 m ²
	Pronksi 4, Kesklinn	Tellis / krohvitud fassaad	5	1959	607 m ²

2.2 Olemasolevate hoonete geomeetiline analüüs

Üheks töö põhiliseks eesmärgiks on olemasolevate korterelamute geomeetriliste hälvete kaardistamine ja hindamine. Punkt pilvesid uurides saab välja selgitada, milliseid geomeetrilisi hälbeid peaks sellistelt hoonetelt eeldama renoveerimisprojekti koostamisel. Erinevad välisfassaadi geomeetrilised hälbed on oluliseks lähteinfoks renoveerimisprotsessi kavandamisel, kusjuures liiga suured kõrvalekalded võivad mõningaid töövõtteid välistada. Näiteks kui on plaan hoone soojustada monteerides olemasolevale välisseinale tehases toodetud seinaelemendid, siis võib liiga suure fassaadi kõrvalekalde puhul osutada elementide sirgelt paigaldamine keeruliseks.

Möödistusprojektide valimi hulgas on suurem osa raudbetoonpaneelmajad ning mõned tellistest kortermajad. Korteralamud on uurimistöö fookuses just seetõttu, et Eestis on suur hulk tüüpeid kortermaju, mis vajavad lähitulevikus renoveerimist, et olla vastavuses tänapäevaste energiatõhususe nõuetega. Seega on uurimistöö raames kõige kasulikum keskenduda just kortermajade uurimisele.

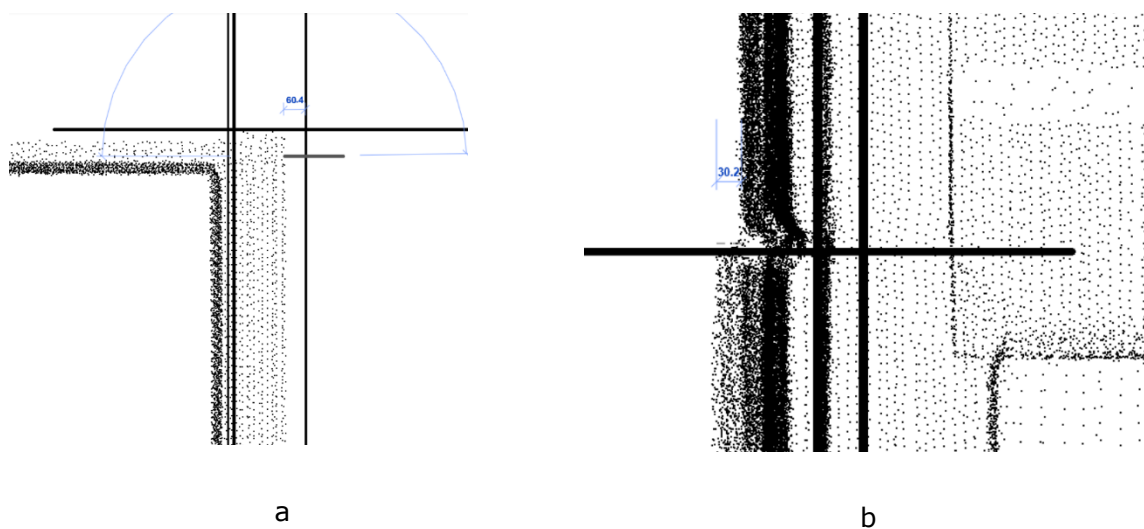
Valitud punkt pilvede geometriat analüüsiti peamiselt kolme kriteeriumi järgi, mis on väljatoodud joonisel 2.1. Fassaadi vertikaalsus näitab välisseite suuremaid täielikke või osalisi kõrvalekaldeid vertikaalstasandist. Lokaalsed ebatasasused väljenduvad väiksemate sisse- või väljapoole vajunud aladena, mis ei mõjuta fassaadi vertikaalsust tervikuna. Aknaavade joondus iseloomustab akende kõrguse erinevust määratud horisontaalse joone suhtes.



Joonis 2.1 Geomeetria analüüsi kriteeriumid

Geomeetriliste hälvete tuvastamiseks visualiseeriti tarkvara abil kõigepealt värviskaala, mis näitab punktipilve punktide ja mudeli vahelist distantssi igas punktis. Kui alusandmetena on olemas ainult punktipilv, siis tuleb mudeli asendamiseks luua manuaalselt fassaadi referentspind (seina element), millega punktipilve võrrelda. Selleks sisestati punktipilv Revitisse ning koostati vertikaalsed referentsseinad lähtudes välisfassaadi asukohast hoone esimesel korrusel. Esimese korruse sein valiti referentspinnaks, sest see on maapinnale lähemal ning väiksem on tõenäosus hälvete esinemiseks. Punktipilve ja tasapinna vaheliste hälvete värviskaala aitab kiiresti tuvastada erinevat tüüpi hälvete piirkonnad ning hinnata kõrvalekalde ligikaudset suurust. Värviskaala genereerimiseks osutus optimaalseks võtta skaalal maksimaalseks hälbeks mõlemas suunas 50mm, sest enamuse kõrvalekaldeid jäävad sellesse vahemikku.

Seejärel täpse kõrvalekalde suuruse mõõtmiseks võeti vastavalt plaanilt või lõikelt eelnevalt tuvastatud kriitilisest kohast mõõt punktipilve ja loodud referentsseina vahel. Mõõtmise põhimõtte on väljatoodud joonisel 2.2.



Joonis 2.2 (a) sein kõrvalekalde mõõtmine sirgest referentsseinast Revit programmis; (b) paneelide liitekoha astme mõõtmine Revit programmis.

2.3 Mudeli genereerimine punktipilvest

Uurimistöö teine põhiline eesmärk oli kaardistada võimalusi punktipilvest BIM mudeli loomiseks ning hinnata erinevate töömeetodite ja tarkvarade sobivust tüüpsete paneelmajade renoveerimisprojektide koostamiseks. Selleks tehti erinevate punktipilvedega läbi eelnevalt kirjeldatud BIM mudelisse skaneerimise protsess

võrreldes töö käigus omavahel analoogseid tarkvarasid. Kuna laserskaneerimine on laialt kasutusel olev protsess, siis selle uurimisele täpsemalt ei keskendunud ja võeti aluseks valmis skaneeritud punktipilved. Seega oli uurimise fookus just mudeli genereerimise etapil. Selles töö osas võrreldi või toodi välja näiteid tarkvarast järgmistes kategooriates:

- programmid, mis aitavad punktipilve ette valmistada ja manuaalset modelleerimist lihtsustada;
- poolautomaatse modelleerimise programmid, mis genereerivad mudelisse elemente kasutaja valitud punktide põhjal;
- automaatse modelleerimise programmid, mis tuvastavad elemente iseseisvalt.

Protsessi korrati erinevate kättesaadavate programmidega ja erinevatel punktipilvedel. Tulemusena hinnati saadud 3D mudeli kvaliteeti, tarkvara kasutusmugavust ja protsessi automatiseerituse taset. Kasutatud programmid valiti vastavalt nende funktsionaalsusele, kasutusmugavusele ja kättesaadavusele.

3. TULEMUSED

Järgnevalt on kirjeldatud töö tulemusi, mis saavutati kirjeldatud meetodikat rakendades. Tulemuste esimeses osas on täpsemalt kirjeldatud geomeetrilise analüüsi tulemusi. Teises osas mudeli genereerimise protsessi tulemuslikkust ja järeltulemusi. Seejärel on kirjeldatud olulisemaid järeltulemusi töö tulemustest ning lõpuks on väljatoodud lühikokkuvõte.

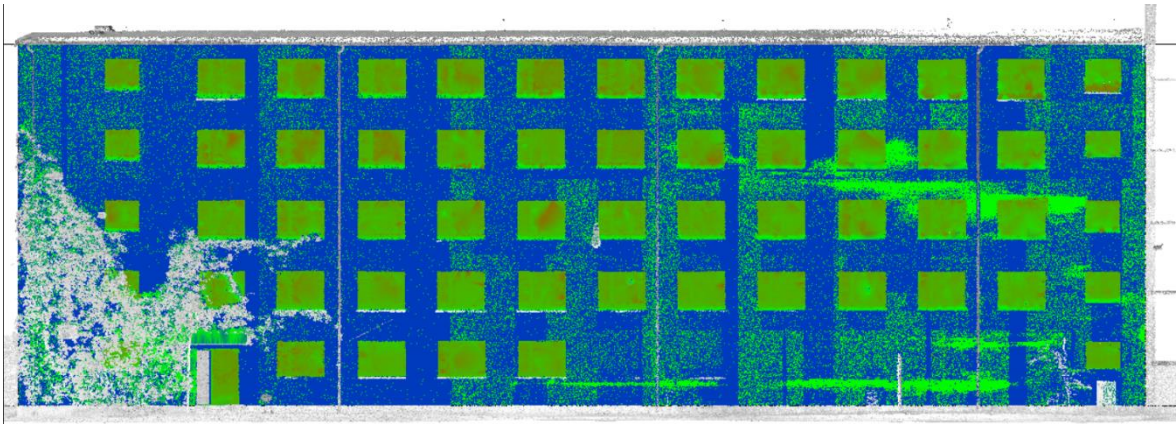
3.1 Olemasolevate hoonete geomeetriline analüüs

Ühe töö põhilise eesmärgina kaardistati kortermajade punktipilvedest suurimaid kõrvalekaldeid. Esimese tegevusena otsiti sobivat tarkvara ja tõhusat töövoogu hälvete kiireks tuvastamiseks. Seejärel kaardistati erinevat tüüpi kõrvalekalded ja nende suurused. Uurimise aluseks võeti 8 punktipilve, mis sarnanesid kõige rohkem tüüpilistele Eestis asuvatele kortermajadele.

3.1.1 Kasutatud tarkvara

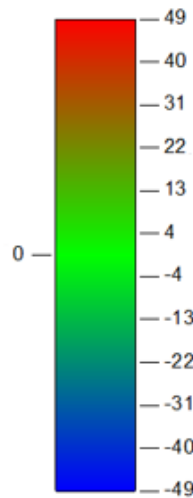
Punktipilve ettevalmistamiseks kasutati vajadusel Autodesk Recap programmi ning punktipilvest käsitsi hälvete mõõtmiseks ja referentstasapindade loomiseks Autodesk Revit tarkvara.

Autodesk Point Layout oli põhiline kasutatav programm punktipilvede võrdlemiseks mudeli või referentspinnaga. Tegemist on lisaprogrammiga Revitile, mis pakub erinevaid tööriistu punktipilvede käsitlemiseks. Ühe funktsioonina on seal olemas punktipilvede võrdlemine valitud mudeli tasapindadega. See osutus ka antud töö jaoks kõige mugavamaks lahenduseks, sest kogu protsess sai tehtud Reviti programmis. Muudesse programmidesse informatsiooni importides oli sageli vaja andmefaile konverteerida või objektide koordinaate sünkroniseerida. Joonisel 3.1 on näidatud värviskeem hoone fassaadil, mis on koostatud Autodesk Point Layout programmiga.



Joonis 3.1 Punktipilve võrdlus vertikaalse referentspinnaga Nõmme tee 5 näitel Autodesk Point Layout tarkvaraga

Joonisel 3.2 on näidatud värviskaala, mis kirjeldab antud programmis koostatud värviskeemidel kindlale värvile vastavat hälbe suurust millimeetrites.



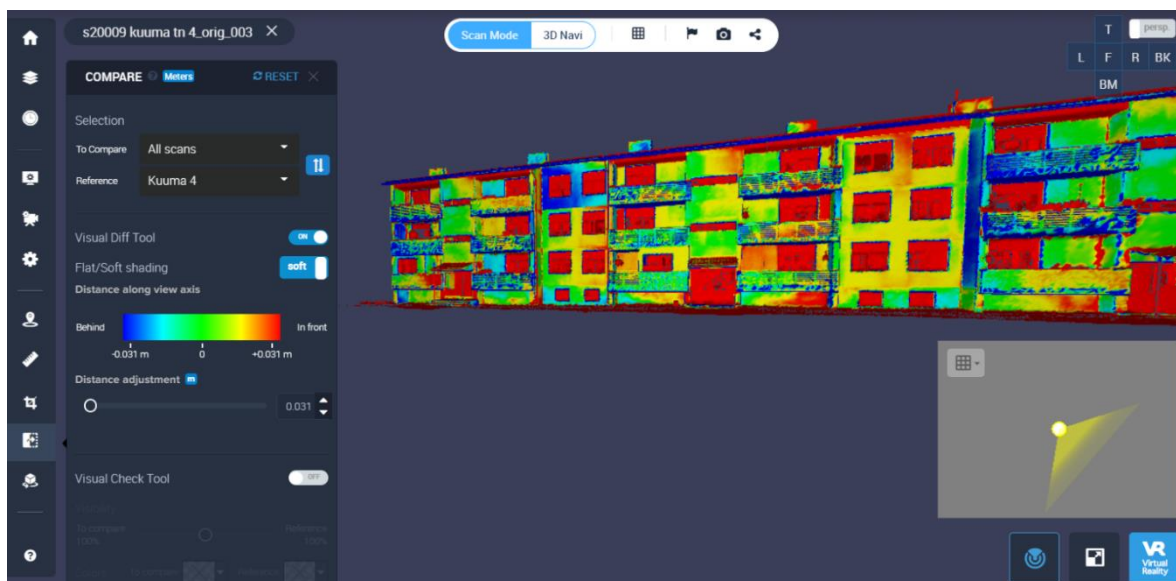
Joonis 3.2 Kõrvalekallete värviskaala millimeetrites koostatud Autodesk Point Layout programmiga

CloudCompare on vabavaraline alternatiiv, mille üks põhilisi funktsioone ongi punktipilvede omavaheline võrdlemine. Tarkvara võimaldab importida kõikvõimalikus formaadis punktipilvesid, võrgustikke ja objekte. Nende geometriat saab omavahel võrrelda ja värviskaalal visualiseerida. Programm on suurepärase igas mahus, muuhulgas ka väga suuremahuliste punktipilvede omavaheliseks võrdluseks, kuid ei võimalda tavapärase BIM mudeli importimist. Probleemi lahendamiseks tehti töö käigus hoone mudelist OBJ formaadis objekt, millega punktipilve võrrelda. Siiski oli selleks vaja läbi teha palju erinevaid samme ja protsess oli seetõttu aeganõudev. Joonisel 3.3 on näitatud hälbeid kirjeldav värviskeem hoone fassaadil, mis on koostatud CloudCompare programmis.



Joonis 3.3 Punkt pilve võrdlus mudeliga Akadeemia tee 5a näitel CloudCompare programmis

Cintoo Cloud on kolmas kasutatud programm, mis toimib täielikult veebipõhisena. Programm on väga lihtsalt kasutatav ja võimaldab põhilisi pilve töötlemise funktsioone. Muuhulgas pakub tarkvara mugavat punkt pilve ja mudeli vahelist võrdlemist ja värviskaalal erinevuste visualiseerimist. Siiski peab punkt pilv olema struktureeritud formaadis ning võrrelda saab omavahel ainult mudelit ja pilve, mitte näiteks kahte pilve omavahel. Tarkvara toomis katsetamisel ootuspäraselt, kuid kuna töö käigus kogutud punkt pilvedest vähesed olid struktureeritud formaadis, siis ei õnnestunud programmi suuremas mahus kasutada. Joonisel 3.4 on näitatud hälbeid kirjeldav värviskeem hoone fassaadil, mis on koostatud Cintoo Cloud programmis.



Joonis 3.4 Punkt pilve võrdlus mudeliga Kuuma 4 korterelamu näitel Cintoo Cloud platvormil

Punktipilvede võrdluseks võib kasutada ka paljusid muid programme. Mõned sellised on veel näiteks BIMcollab Zoom, Leica Cyclone 3DR, BIM & Scan, Pythagoras ja Gexcel Reconstructor.

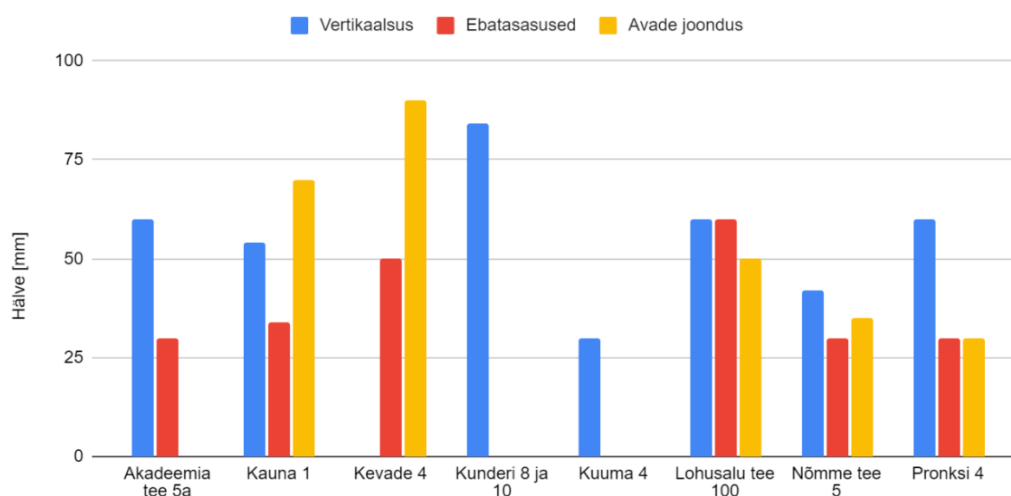
Tabelis 3.1 on esitatud erinevate võrdlustarkvarade tugevused, nõrkused ja maksumus. Kokku võrreldi kolme tarkvara, mille alusel valiti välja Revit Point Layout tööriist. Geomeetria analüüsiks kasutatav tarkvara valiti eelkõige funktsionaalsuse ja kasutusmugavuse järgi. Lisaks pidi välistama programmid, millele puudus tasuta ligipääs.

Tabel 3.1 Hälvete tuvastamiseks kasutatud tarkvara võrdlus

Kasutatud tarkvara	Tugevused	Nõrkused	Maksumus
Point Layout	Töötab otse Revitis, lihtne kasutada	Tulemust ei saa andmefailis salvestada ega digitaalselt analüüsida	Maksumus kõrge Tudengitele tasuta 30 päeva tasuta
CloudCompare	Võimaldab võrdlust täpselt seadistada	Ei saa importida mudelit	Tasuta
Cintoo Cloud	Pilvepõhine, lihtne kasutada	Vajab struktureeritud punktipilve	Maksumus kõrge 30 päeva tasuta

3.1.2 Hälvete suurus

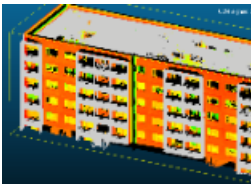
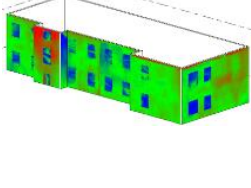
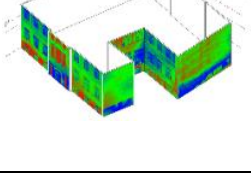
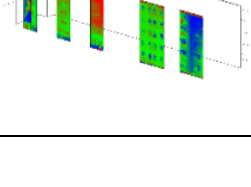

Analüüsi käigus tõi tarkvara välja olulisemad geomeetriliste hälvete piirkonnad ja näitas värviskaala abil hälbe suurusjärku, kuid täpse kõrvalekalde mõõtmiseks tuli Revitis käsitsi mõõt võtta. Järgnevalt on kirjeldatud erinevaid hoonete puhul ilmnenud hälbeid ning nende suurusi punktipilvede alusel. Joonisel 3.5 on väljatoodud tüüpiliste hälvete maksimaalsed suurused erinevatel hoonetel.

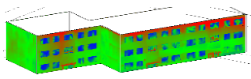
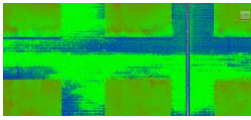
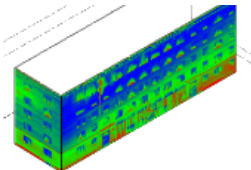


Joonis 3.5 Erinevat tüüpi hälvete maksimaalsed suurused uuritud hoonetel

Geomeetria analüüsi tulemustest selgus, et kõige sagedasem probleem on seina vertikaalne kõrvalekalle referentspinnast, mida esineb mingil määral kõigil hoonetel. Lisaks esineb paljudel hoonetel lokaalseid ebataasasusi, mis on eriti iseloomulikud väikeplokkidest, tellistest või puitkonstruktsioonist välisseintele. Täpsemalt on tulemusi kirjeldatud tabelis nr 3.2.

Tabel 3.2 Geomeetria analüüsi tulemused

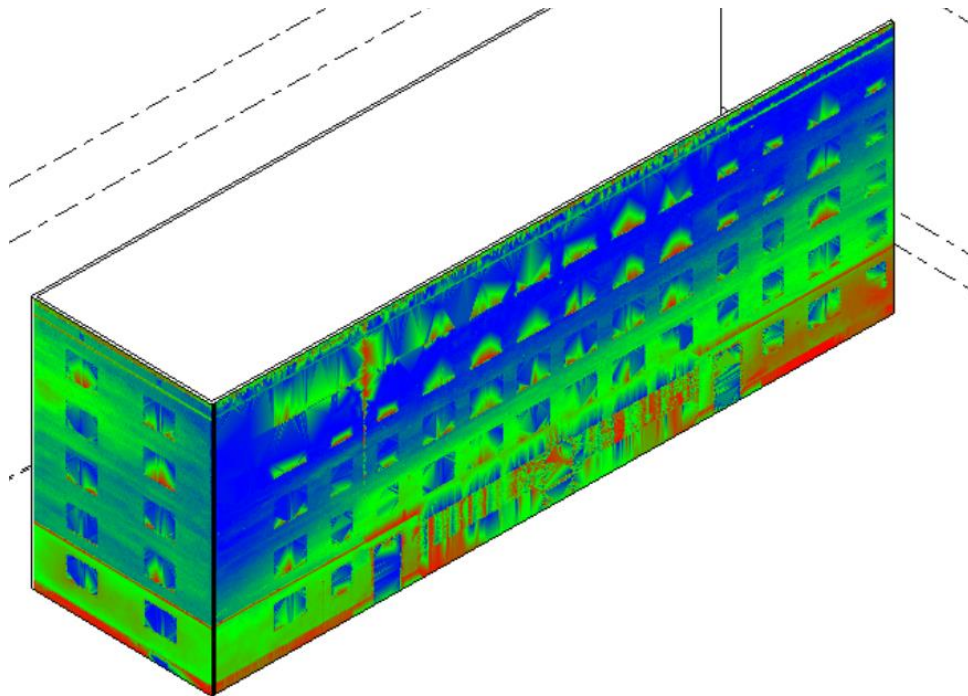
Aadress	Geomeetriliste hälvete pilt	Kande- konstruktsioon	Geomeetria kontroll		
			Fassaadi vertikaalsus	Lokaalsed ebataasasused	Avade joendus
			<i>Seinapinna võrdlus referentstasapinnaga.</i>	<i>Lokaalsete ebataasuste tuvastamine.</i>	<i>Avade horisontaalselt kohakuti asetsemise kontroll.</i>
Akadeemia tee 5a, Mustamäe		Raudbetoon paneel	Vertikaalne hälve kuni 18mm. Rõdu küljeseinte vertikaalne hälve kuni 60mm.	Paneelide nihe kuni 30mm.	Märkimisväärne hälve puudub.
Kauna 1, Kesklinn		Puit	Trepikoja osa tasapinnast väljaspool 55mm (lisaks ettenähtud astmele). Hoone väljaulatuva osa küljesein 54mm sissepoole kaldu ja väljaulatuva osa otsasein 51mm väljapoole kaldu teise korruse ulatuses.	Hoone küljseintel paiguti väljaulatavad muhud 34mm.	2.korruse akende joon ühtlaselt viltu. Erinevus maja erinevates otstes 70mm. Kogu maja on tervikuna viltu.
Kevade 4, Kesklinn		Puit	Suuri ühtlaseid kõrvalekaldeid ei ole.	Palju lokaalseid ebataasasusi kuni 50mm.	Akende kõrguse erinevus kuni 90mm.
Kunderi 8, Kunderi 10 Kesklinn		Tellis	Mõned seinad rõdude vahel kõrgematel korrustel sisse- või väljapoole kaldunud kuni 84mm. Küljesein ühest äärest kuni 37mm kaldu.	Suuri lokaalseid ebataasasusi ei ole.	Märkimisväärne hälve puudub.
Kuuma 4, Saue		Väikeplokk	Vertikaalne hälve kuni 27mm. Ühel 3.korruse paneelil kõrvalekalle u 30mm.	Suuri lokaalseid ebataasasusi ei ole.	Märkimisväärne hälve puudub.

Address	Geometriliste hälvete pilt	Kande-konstrukt-sioon	Fassaadi vertikaalsus	Lokaalsed ebataasasused	Tabel 32 jätk Avade joendus
Lohusalu tee 100, Lääne-Harju vald		Väikeplok	Ühel maja poolel viimase korruse ülemine äär väljapoole kaldu kuni 60mm.	Ühel maja küljel viimase korruse ülemine äär väljapoole kaldu kuni 60mm.	Ühtlased kõrguste erinevused kuni 50mm.
Nõmme tee 5, Kristiine		Tellis	Seina ühtlane kaldumine sissepoole kuni 42mm.	Tellisfassaad lainetab kohati sissepoole kuni 30mm.	Ühel joonel asuvate akende kõrgus kõigub juhuslikult 35mm ulatuses kogu hoone ulatuses.
Pronksi 4, Kesklinn		Tellis	Ühel maja küljel on ülemised 3 korrust terves ulatuses kuni 60mm sissepoole kaldu.	Esineb sujuvaid lokaalseid kõrvalekaldeid kuni 30mm.	Ühes kohas 115mm aste akende kõrguses. Puntipilvest ei saa aru, kas tegemist on hälbega või ettenähtud astmega. Mujal ühtlane erinevus kuni 30mm.

Fassaadi vertikaalsus kujutab endast seinapindade ühtlaseid kaldumisi sissepoole või väljapoole võrreldes esimesel korrusel asuva fassaadi asukohaga. Üldiselt selgus punktivilvide analüüsist, et seinte kõrvalekalded vertikaaltasandist on üldiselt kõige levinum probleem hoonete puhul, mida esineb võrdsest kõigil konstruktsioonitüüpidel. Selliste kõrvalekallete iseloomuliku kuju saab kirjeldada selliselt, et esimeste korruste ulatuses on sein vertikaalne, ning mingist kõrgusest alates hakkab fassaad kalduma sissepoole või väljapoole. Üldjuhul mida kitsam ja kõrgem on seina lõik, seda varem hakkab sein väljapoole kalduma ja seda suurem on kõrvalekalle viimasel korrusel. Sellise kalde tekkimist soodustab lisaks see, kui sein on ühest küljest toetatamata, näiteks rõdu küljeseinte puhul. Käesolevas töös vaadeldi ainult kuni 6-korruseliseid elamuid. Suurema korruste arvu puhul võib eeldada veel suuremaid kõrvalekaldeid.

Kõrvalekalded jäid enamasti suurusjärku kuni 50mm ühes või teises suunas, kuid mõnel juhul ka kuni 84mm. Kõige suuremaid sellised kõrvalekalded esines Kunderi 8 ja 10 majadel (kuni 84mm), kus kitsad ja kõrged seinad rõdude vahel on kolme ülemise korruse ulatuses sisse- või väljapoole kaldu. Sama tüüpi kõrvalekalle esines Kauna 1 hoonel, kuid kuna tegemist on madalama hoonega, siis on kõrvalekalde ulatus ja suurus

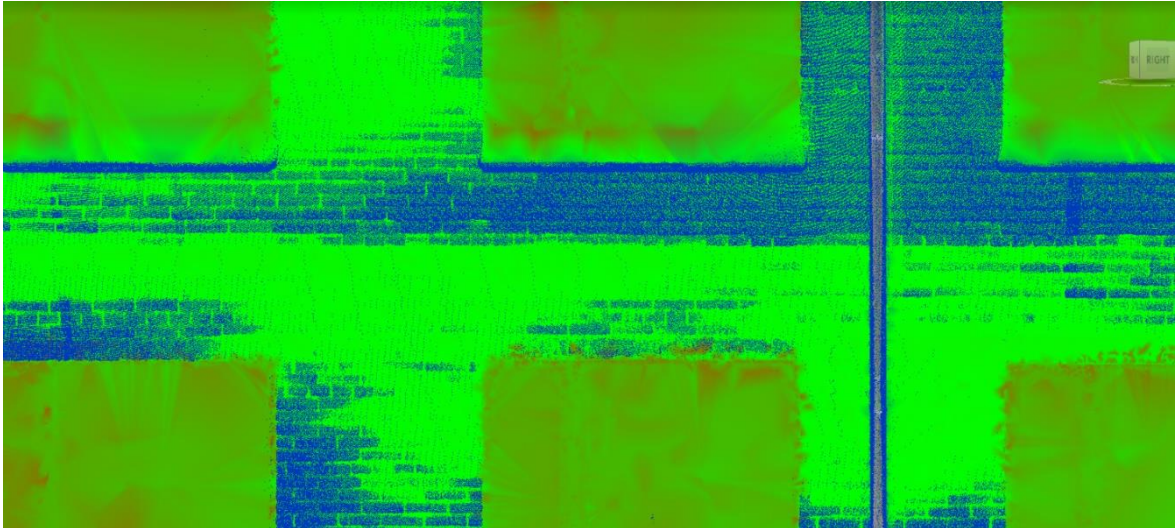
väiksem (kuni 54mm). Lohusalu tee 100 hoonel esines sama tüüpi hälve (60mm) ainult viimase korruse ülemises osas räästa lähedal. Kõige suurema ulatusega sellist tüüpi hälve esines Pronksi 4 hoonel (kuni 60mm), kus ühel seinal oli kolm ülemist korrust täies ulatuses sissepoole kaldunud. Pronksi 4 värviskeem on näidatud joonisel 3.6.



Joonis 3.6 Vertikaaltasapinnast sissepoole vajunud ülemised korrused Pronksi 4 hoonel

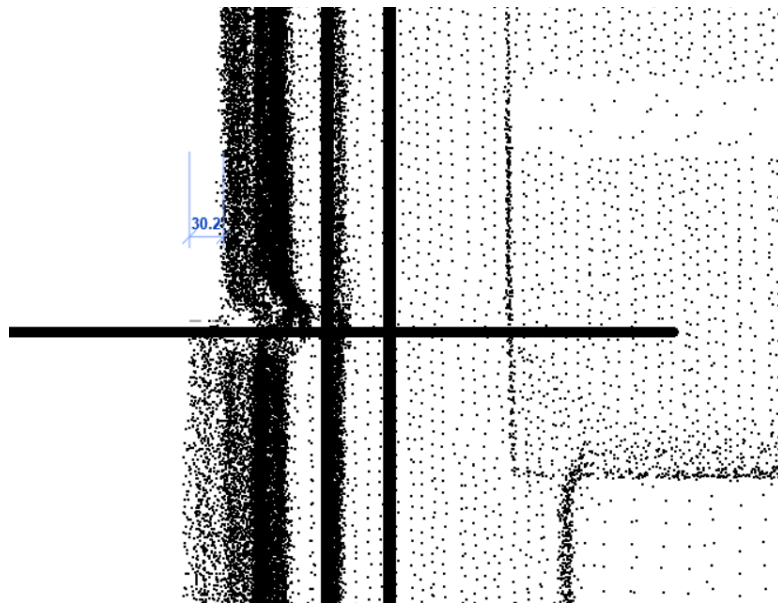
Lokaalsed ebataasused esinevad väiksemal alal. Kuigi need on visuaalsel vaatlusel silmaga paremini nähtavad kui üldised suuremad kõrvalekalded, siis jääb nende absoluutne suurus enamasti väiksemaks. Sellised hälbed esinevad tihti seina keskel ebakorrapärase kuju ja paigutusega. Kõige rohkem esineb lokaalseid ebataasusi tellistest või puiduga kaetud fassaadidel.

Töö käigus tuvastati lokaalseid hälbeid kuni 50mm seina referentstasapinnast, kuid enamasti jäi hälve 30mm suurusjärku. Suurimad lokaalsed ebataasused tuvastati Kevade 4 asuval hoonel (kuni 50mm) ning ning Kauna 1 kortermajal (kuni 34mm). Mõlemad on puitkonstruktsiooniga krohvitud fassaadiga hooned. Samuti leiti tellistest kandekonstruktsiooniga Nõmme tee 5 ühiselamu fassaadilt ebakorrapärased väljapoole vajunud alad (kuni 30mm) hoone keskel akende vahel, mis on näidatud joonisel 3.7.



Joonis 3.7 Lokaalsed ebatasasused Nõmme tee 5 tellisfassaadil

Suurpaneelhoonetel üldjuhul märkimisväärseid lokaalseid hälbeid ei esine. Akadeemia tee 5a hoonel tuvastati vaid väiksemaid paneelidevahelisi astmeid kuni 30mm, mis on näidatud punkt pilve lõikes joonisel 3.8.

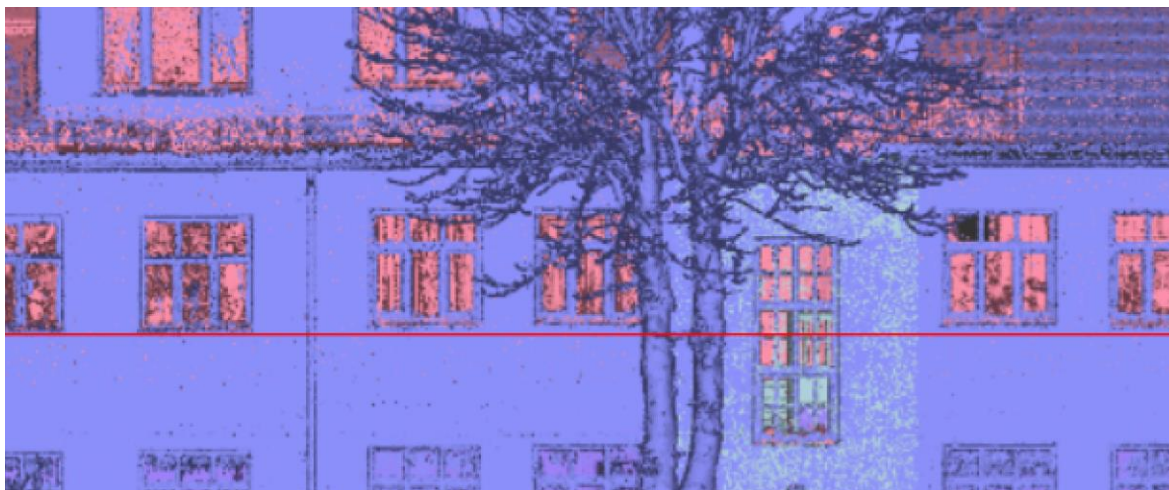


Joonis 3.8 Paneelidevaheline aste 30mm Akadeemia tee 5a fassaadil

Avade joondus on leitud ühe äärmise akna põhjal määratud horisontaalse joone suhtes. Kõige parem on olukord suurpaneelmajadega, kus märkimisväärseid hälbeid ei tuvastatud. Seevastu puidust ja tellistest konstruktsiooniga hoonete puhul esines ühes reas asetsevate akende kõrguses ebakorrapäraseid erinevusi kuni 90mm. Puitmajade puhul esinesid kõige suuremad erinevused akende kõrgusetes Kevade 4 hoonel (kuni 90mm). Ning Lohusalu tee 100 hoonel (kuni 50mm). Kui nende puhul oli tegemist

üksikute akende erinevusega horisontaaljoonest, siis Nõmme tee 5 tellisfassaadis olid peaaegu kõik aknad täiesti juhulikult erineval kõrgusel. Kõrguste kõikumise ulatus oli kuni 35mm.

Teistmoodi joonduse probleem esines Kauna 1 puithoonel, mille akende kekmine kõrgus erines kun 70 mm ühes ja teises maja otsas. Kuna sarnaseid kõrguste erinevusi oli näha ka teistel hoone elementidel samades kohtades, siis võib kahtlustada vundamendi suuremat vajumist ühes hoone otsas. Kauna 1 hoone fassaad koos referentsjoonega vasakpoolsest aknast on näidatud joonisel 3.9.



Joonis 3.9 Akende kõrguste erinevus Kauna 1 punktipilvest

Vuukide korrapärasust uurisin suurpaneelilamute näitel. Valimis oli vaid üks hoone ning selle puhul suuri hälbeid fassaadipaneelide vaheliste vuukide vertikaalsuses ja horisontaalsuses ei tuvastatud. Siiski ühe hoone põhjal ei saa lõplikke järeldusi teha.

3.2 Mudeli genereerimine punktipilvest

Erinevaid tarkvaralahendusi punktipilvede töötlemiseks on saadaval hulgaliselt ja tuleb pidevalt juurde. Iga tööriist on tihti spetsialiseerunud kindlale funktsioonile ja seetõttu sõltub täpne tarkvara valik alati paljudest sisulistest ja tehnilistest teguritest nagu lähteandmete omadused, soovitud tulemus, teised kasutatavad programmid ning töö eelarve.

Mõnikord on soovitud tulemuse saavutamiseks vaja punktipilve töödelda läbi mitme tarkvara. Igas valdkonnas on olemas lihtsamaid ja keerulisemaid lahendusi erineva maksumusega. Mõne töö jaoks leidub ka tasuta programme, kuid nende funktsionaalsus on tihti limiteeritud või ei täida need oma eesmärki piisava kvaliteediga. Kohati tekkis tööprotsessis tehnilisi piiranguid ka väga nutikate programmide töös. Näiteks nõuab

mõni tarkvara töötlemiseks ainult struktureeritud või kindlas formaadis punktipilvesid. Seega kõige kõrgema maksumusega programm ei ole alati kõige parem. Samuti esines mõne programmi töös tõrkeid. Igasugune mudeli koostamiseks kasutatav tarkvara peaks võimaldama mingil kujul punktipilve importimist ja mudeli elementide koostamist manuaalselt punktipilve põhjal või automaatselt. Mõned programmid või tööriistad toimivad lisadena teisele tarkvarale, näiteks Reviti pluginad või eraldiseisvad programmid, mis koostavad hoone mudeli Reviti programmi sisse.

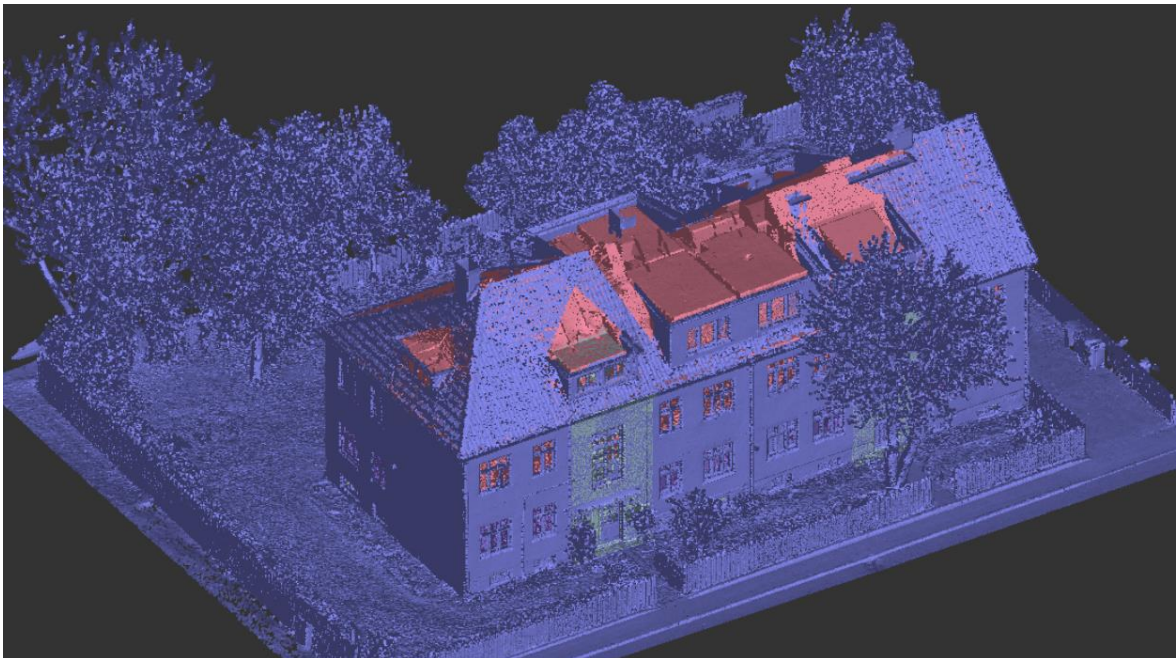
Vastavalt tööetapi eesmärgile on kasutatav tarkvara jagatud kategooriatesse. Järgnevalt on igas kategoorias väljatoodud mõned konkreetset programmid, mida töö käigus katsetati, kuid see nimekiri ei ole terviklik ega lõplik ning tööks sobiva parima tarkvara leidmiseks tuleks alati uurida saadaolevaid lahendusi konkreetset ajahetkel.

3.2.1 Punktipilve töötlus ja ettevalmistus

Selle protsessi käigus valmistatakse punktipilv ette põhilisteks tegevusteks, olgu selleks mudeli genereerimine või lihtsalt andmete visualiseerimine. Selles tööetapis võib vastavalt vajadusele punktipilve puhastada, keerata, muuta koordinaate või muul moel modifitseerida, et lihtsustada edasist andmetöötlust. Punktipilve ettevalmistuse hulka kuuluvad näiteks järgmised tegevused.

- **Indekseerimine** on esimene tegevus peale skaneerimist. Selle käigus punktipilv konverteeritakse üldisemasse formaati ja igale punktile lisatakse vajalik info.
- **Registreerimine** tuleb teostada, kui punktipilv sisaldab rohkem kui ühte mõõdistust. Registreerimisel liidetakse punktipilved omavahel kokku ühiste kindlate punktide meetodil (*target based registration*) või pilvede ühildamise meetodil (*cloud based registration*). Tulemust saab eksportida erinevates formaatides punktipilveks vastavalt sellele, kuidas tarkvara võimaldab.
- **Koordinaatide muutmine** on vajalik näiteks punktipilvede ja mudelite võrdlemisel, et nende koordinaadid ühtiksid ehk oleksid seotud ühise nullpunktiga. Samuti võib koordinaatide muutmine olla vajalik, kui punktipilv on mõõdetud globaalses koordinaadistikus. Siis võib mõnes tarkvaras käsitledes vähendada punktipilve täpsus ja sel juhul tasub pilv üle viia kohaliku koordinaadistikku.
- **Punktipilve pööramine** on vaja, kui modelleerimise käigus on vajadus teha punktipilvest vaateid ja lõikeid. Sel juhul lihtsustab tööd see, kui hoone on pööratud paralleelselt koordinaattelgedega.

- **Failiformaadi konverteerimine** tehakse sellisel juhul, kui järgmine tarkvara nõuab konkreetses formaadis punktipilve. Siis tuleb pilv vastavasse formaati eksportida. Silmas peab pidama seda, kas eksporditav punktipilv on struktureeritud või ühildatud formaadis. Ühildatud punktipilve hiljem enam struktureeritud formaati muuta pole võimalik.
- **Puhastamine** on enamasti vajalik, sest skaneerides on tulnud punktipilve kaasa ebavajalikku infot, mis võib eksitada modelleerimistarkvara automatseid funktsioone või olla visuaalselt häiriv. Sel juhul saab ebavajalikud punktid mudelist kustutada. Joonisel 3.10 on näidatud pilt puhastamata punktipilvest, mis sisaldab puid ja mitmeid muid hoone modelleerimiseks ebavajalikke elemente.



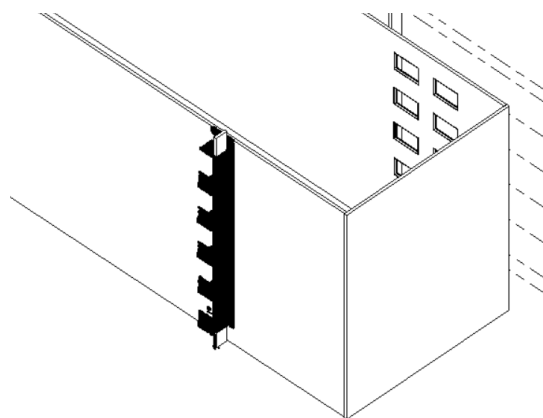
Joonis 3.10 Puhastama punktipilv Kauna 1 hoonest

Autodesk Recap on üks võimalik programm punktipilve ettevalmistamiseks. Tarkvara on ette nähtud punktipilve indekseerimiseks, registreerimiseks, puhastamiseks ja lihtsamaks töötlemiseks. Võimaldab punktipilve kergesti visualiseerida ja presenteerida. Pilve saab eksportida E57, PTS, PCG, RCP või RCS formaati.

Veel võib punktipilvede ettevalmistamiseks kasutada näiteks laserskannerite tootjate poolt pakutud tarkvara nagu Faro Scene või Leica Cyclone. Samuti on saadaval hulgaliselt erinevaid programme, mille funktsionaalsus võib suuresti erineda vastavalt kasutuseesmärgile.

DiRoots on Reviti lisaprogramm, mis ei aita otseselt mudelit ette valmistada, kuid võimaldab punktipilve Reviti programmi sees mugavamalt käsitleda. Näiteks saab

visuaalselt välja lõigata kindla osa punktipilvest, et sellega lähemalt toimetada, ilma et ülejäänud punktipilv segama jääks. Põhimõtte osalisest punktipilve kuvamisest mudelis on näitatud joonisel 3.11.

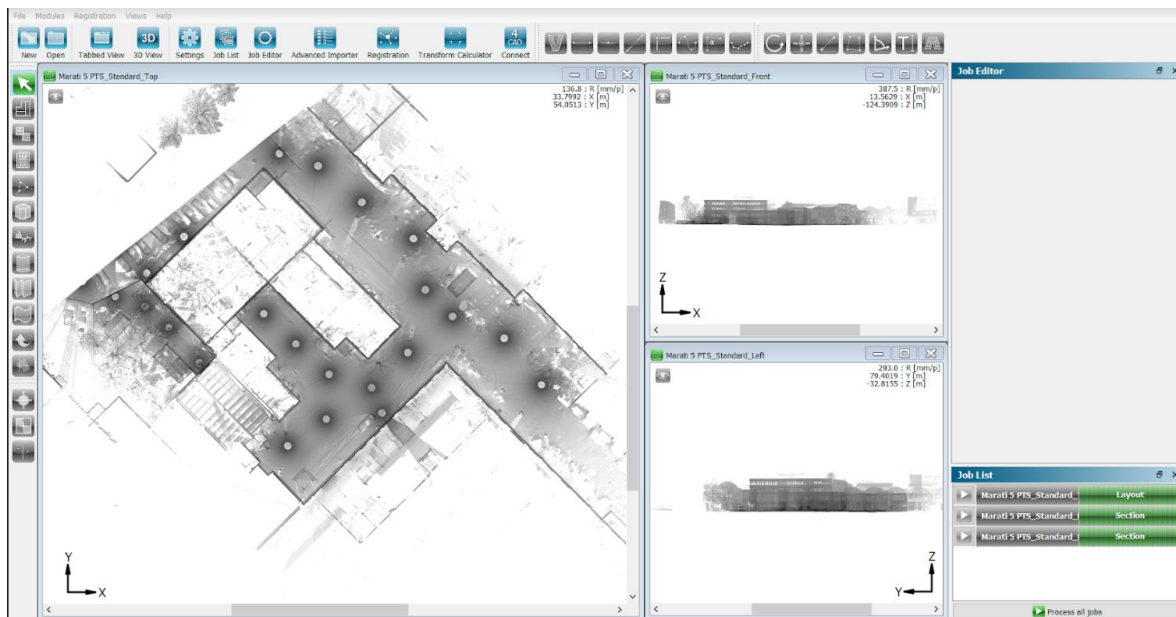


Joonis 3.11 Mudeli koostamisel on nähtav ainult röödude osa punktipilvest (must) Reviti programmis kasutades DiRoots tööriista

3.2.2 Poolautomaatne mudeli koostamine

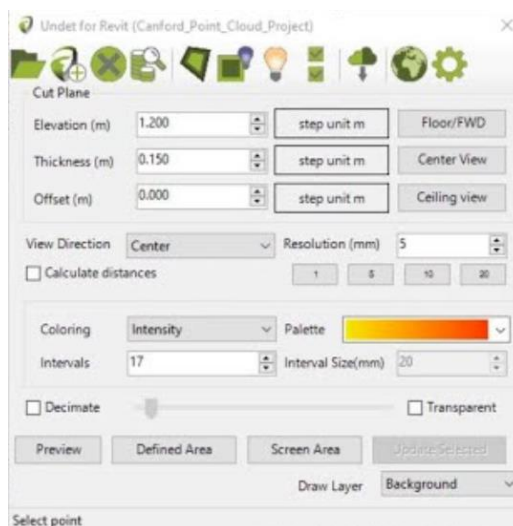
Poolautomaatne mudeli koostamine tähendab, et punktipilve andmeid ei loe tarkvara iseseisvalt, vaid koostab mudeli elemente vastavalt kasutaja sisestatud punktidele. Tarkvara eelis manuaalse mudeli koostamise ees seisneb selles, et punktipilv kuvatakse kasutajale intuiivselt ning pakutakse tööriistu elementide loomiseks minimaalse sisendi andmisega. Sealjuures määrab mudeli täpsuse siiski kasutaja sisestatud punktide täpsus, mistõttu jääb võimalus inimlike vigade tekkimiseks. Poolautomaatse tööprotsessi juures ei ole ilmtingimata vaja struktureeritud formaadis punktipilve, kuid struktureeritud formaadis sisalduva panoraampildi olemasolu skaneerimise asukohast aitab tihti paremini aru saada skaneeritud objektide olemusest.

PointCab oli poolautomaatseks mudeli koostamiseks üks parimaid kasutatud lahendusi. Tarkvara võimaldab koostada hoone mudeli Reviti tarkvarasse ilma punktipilve Revitisse sisestamata. Pointcab avab punktipilve ning genereerib ise esimesed vaated erinevate nurkade all. Vaateid ja lõikeid igas suunas saab ise vastavalt vajadusele lisada. Pointcabi programm on plugina kaudu ühendatud Revitiga ning modelleerib valitud elemendid automaatselt Revitisse. Kasutajal on vaja vaid PointCabi programmis vajalikud punktid valida. Ekraanipilt PointCab programmist on näidatud joonisel 3.12.



Joonis 3.12 PointCab kasutajaliides

Undet on sarnase funktsionaalsusega Reviti lisana töötav programm. See pakub tööriistasid automaatseks elementide loomiseks sisestatud punktide põhjal. Eelnevalt on vaja punktipilv Revitisse importida ning seejärel toimub kogu töö seal programmis. Hoone elemendid luuakse Revitis otse punktipilve sisse. Tänu sellele tekib kohene võrdlus punktipilvega, kuid samas on ekraanil palju infot korraga, mis tiheda punktipilve puhul võib olla visuaalselt segadust tekitav. Ekraanipilt Undet funktsioonide aknast on näidatud joonisel 3.13.

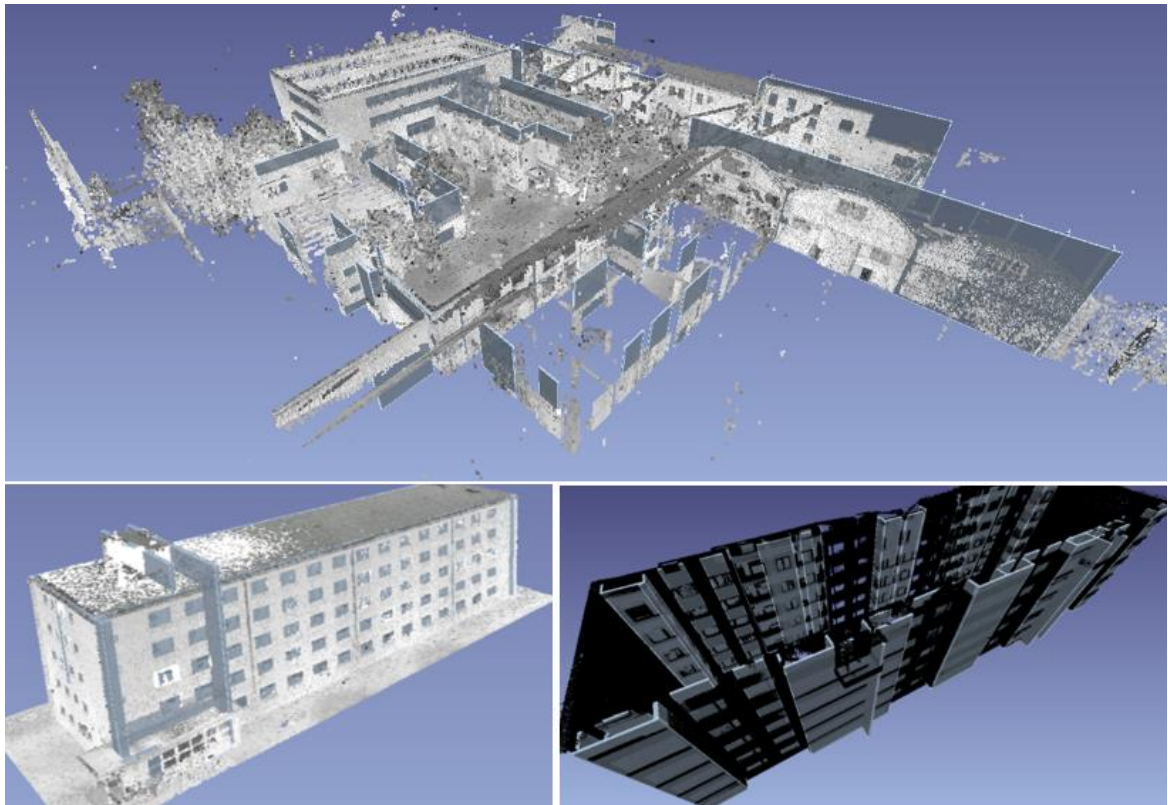


Joonis 3.13 Undet for Revit kasutajaliides

3.2.3 Automaatne BIM mudeli genereerimine

Automaatne mudeli genereerimine tähendab, et vähemalt osa mudelist modelleeritakse tarkvara poolt automaatselt. See nõuab kõige täpsemaid ja mõnikord ka tarkvara jaoks kohandatud lähteandmeid. Näiteks väga sageli on automaatseks genereerimiseks vaja kasutada struktureeritud punktipilve. Samuti nõuab automaatne protsess äärmiselt nutikat tarkvara, mille maksumus võib olla väga kõrge. Seetõttu tasub automaatne genereerimine ära ainult mahukamate tööde puhul ja eeldusel, et lähteandmed vastavad programmi nõuetele. Automaatne genereerimine hoiab kokku väga palju aega ja inimtöö ressursi. Sellegi poolest tuleb sõltuvalt tarkvara võimekusest ja lähteandmete sobivusest tavaliselt genereeritud mudelit mingil määral täiendada. Töömaht on siiski oluliselt väiksem kui poolautomaate või manuaalse töömeetodi puhul.

Ainus töö raames kasutatud täielikult automaatne tarkvara on **ClearEdge EdgeWise Building**. Programm võimaldab automaatselt genereerida elemente, mida saab muuhulgas sisestada Revitisse. Parema tulemuse saavutamiseks soovitab programm kasutada lähteinfona struktureeritud formaadis punktipilve. Tarkvara on esialgselt väljatöötatud torustike ja tehnosüsteemide modelleerimisele, kui selles sisaldub ka seinade ja avatäidete modelleerimise funktsioon. Käesoleva uurimistöö tingimustes ei õnnestunud programmiga ootuspäraseid tulemusi saavutada. Kasutati küll struktureeritud formaadis punktipilvesid, kuid tuvastatud seinaelemendid tulid lünklikud ja vale kõrgusega. Võimalik, et punktipilve eelnev töötlemine ja puhastamine oleks andnud paremaid tulemusi, sest punktipilv oli ise ka lünklik ja sisaldas palju müra. Siiski antud tingimustel osutus tulemus täiesti kasutuskõlbmatuks. Tulemused erinevate punktipilvede näitel on toodud välja joonisel 3.14.



Joonis 3.14 EdgeWise programmiga automaatselt genereeritud seinad erinevatest punktipilvedest

Punktipilvest mudeli genereerimist erineva automatiseerituse tasemega pakuvad veel näiteks sellised programmid nagu Faro As-built Modeller, Pointfuse, Scantobim.xyz, InfiPoints, Vision Lidar, Leica Cyclone Model, Leica Cloudworx, Trimble Realworks, Bimerr ja paljud teised. Igal programmil on oma funktsionaalne rõhuasetus ja pidevalt tuleb turule uusi lahendusi. Seega sobivaima tarkvara valimiseks tuleb alati käesoleval hetkel pakutavaid võimalusi lähemalt uurida.

3.2.4 Mudeli võrdlus punktipilvega

Valminud mudeli täpsuse kontrollimiseks tuleks seda võrrelda algse mudeliga. Selleks sobib sisuliselt iga programm, mis võimaldab korraka importida mudelit ja punktipilve ning neid vajalikul määral võrrelda. Kõige parema ülevaate võrdlusest annab värviskeemi genereerimine, kus erinevad värvid näitavad mudeli ja punktipilve vaheliste hälvete suuruseid. Selliselt tulevad mudelist puuduvad ja vigaselt või ebatäpselt modelleeritud elemendid koheselt välja. Mudeli kontrollimise protsess ja kasutatav tarkvara on üldiselt sarnane peatükis 3.1 kirjeldatud geomeetrilise analüüsiga. Erinevus seisneb vaid selles, et kui hoone geomeetria analüüsimisel tuli referentspind või sein kõigepealt käsitsi luua, siis siin tööjärgus on juba olemas mudel, mida programmi importida ja pilvega võrrelda.

3.2.5 Mudeli genereerimise tarkvara võrdlus

Kokkuvõtlikult on tabelis 3.3 väljatoodud mudeli genereerimiseks kasutatud tarkvarad. Lühidalt on võrreldud nende funktsioone, kasutusmugavust, automatiseerituse taset, tulemuste kvaliteeti ja maksumust.

Tabel 3.3 Mudeli genereerimise tarkvara võrdlus

Tarkvara	Kasutusmugavus ja funktsionaalsus	Automatiseeritus ja mudeli kvaliteet	Maksumus
Undet for Revit	Töötab Reviti sees. Punktide valimine käsitsi. Töö käib punktipilve sees.	Poolautomaatne. On võimalik koostada kvaliteetne mudel.	Madal
PointCab	Töötab koos Revitiga. Punktide valimine käsitsi. Eraldi akendes toimub punktide valimine ja mudeli koostamine.	Poolautomaatne. On võimalik koostada kvaliteetne mudel, kuid osad funktsioonid ei toiminud alati.	Keskmine
EdgeWise Building	Kasutajaliides on keeruline, funktsionaalsus on väga hea.	Genereerib mudeli automaatselt, kuid tulemuse kvaliteet võib olla puudulik.	Kõrge

3.3 Lähtekohad *scan to BIM* rakendamiseks

Järgnevalt toon välja olulisemad töö käigus tehtud järeldused. Tegemist on punktidega, millel on praktiline väärtus paneelkorterelamute renoveerimise juures või käsitletud teemade edasi uurimisel, seega on need punktid oluliseks lähtekohaks *scan to BIM* töömeetodite ja tehnoloogiate rakendamiseks.

3.3.1 Olemasolevate kortermajade geomeetrilised hälbed

Töö käigus tuvastati, et kuni 6-korruseliste hoonete puhul tuleks arvestada suurimate ühtlaste kõrvalekalletega seinareferentstasapinnast kuni 90mm. Siiski nii suured hälbed esinevad üksikutes kohtades ja enamik kaldeid piirduvad hälbega kuni 50mm. Suuremad kõrvalekalded esinevad kitsastel ja kõrgetel seintel hoone ülemiste korruste ulatuses. Samuti ühest küljest toetamata elementidel nagu rõdu küljeseinad.

Lokaalseid kõrvalekaldeid esineb eelkõige puidust või tellistest kandekonstruktsiooniga hoonetel, mida tuvastati suuruses kuni 50mm referentstasapinnast. Suurpaneelide

puhul esineb lokaalne hälve enamasti paneelidevahelise astme kujul, kuid neid esineb harva.

Avatäited on paneelmajadel horisontaalselt üsna täpselt ühel joonel. Küll aga esineb suuremaid akna kõrguse ebakorrapärasusi puidust ja tellistest hoonetel kuni 90mm. Mõne hoone puhul tuleb arvestada ka vundamendi ühtlase vajumisega, mis tähendab, et kogu hoone koos akende joonega on tervikuna horisontaalist kõrvale kaldunud. Siit saab teha täiendava järelduse, et punktipilv on väga hea tööriist hoone vajumite tuvastamiseks.

3.3.2 Nõuded skaneeritavale hoonele

Tavapäraselt *scan to BIM* protsessi ja selle tulemuse põhjal renoveerimisprojekti koostamist saab rakendada, kui hoone vastab kindlatele kriteeriumitele.

Näiteks peab hoone kõrgus ja geomeetria võimaldama valitud tehnoloogia abil piisava täpsusega punktipilve mõõdistada. Seda tuleb arvesse võtta näiteks sellisel juhul, kui on vaja saada struktureeritud kujul punktipilve, mis aga eeldab fikseeritud positsiooniga skanneri kasutamist. Kuna selline skanner paigaldatakse enamasti maapinnale, siis võib kõrgemate hoonete puhul juhtuda, et skanner ei ole võimeline piisava täpsusega ülemisi korruseid skaneerima. Sel juhul tuleks kõrgemate korruste andmete täiendamiseks kasutada drooni, kuid peab arvestama, et struktureeritud punktipilve liikuva skanneriga koostada ei saa.

Samuti peab hoone ümbrus olema puhas puudest ja põõsatest, mis segaksid skanneril punktide kogumist ja hilisemat mudeli loomist. Kõikvõimalikku müra tuleks võimalusel juba skaneerimise käigus välistada. Kui puud, põõsad, sõidukid, inimesed või muud esemed fassaadi varjavad, siis sellest kohast täpseid andmeid koguda pole võimalik.

Kolmandaks ei tohi hoonel olla suuremaid geomeetrilisi häbeid kui renoveerimise tehnoloogia võimaldab. Näiteks Akadeemia tee 5a hoone renoveerimisel kasutatud monteeritavate puitkarkasselementide kinnitused on reguleeritavad suurusjärgus kuni 50mm. Suuremate hälvete puhul on vajalik pinna eelnev tasandamine ja iga suuremat kõrvalekallet tuleb sel juhul eraldi vaadelda ja lahendada.

3.3.3 Nõuded skaneerimisele ja punktipilvele

Enne skaneerimise teostamist on oluline teada ka mudeli genereerimise tööpõhimõtteid. Vastavalt kasutatavale tarkvarale võib mudeli koostamise täpsus ja tõhusus olla suurem, kui juba skaneerimisel saab täita vajalikud tingimused.

Näiteks võib avade tuvastamise lihtsustamiseks olla vajalik uste ja akende avamine enne skaneerimist. Korruste või muude punktipilvest raskesti eristatavate elementide tuvastamiseks võib lisada fassaadile markerid. Samuti eemaldada ruumidest või fassaadi ümbert üleliigsed objektid nagu mööbel, taimestik või inimesed.

Mõni tarkvada eeldab või eelistab stuktureeritud kujul punktipilve. Sul juhul peab kasutama fikseeritud positsiooniga skannerid ning eksportima punktipilve struktureeritud formaadis.

Skaneerimispositsiooni valikul tuleb arvestada seda, et kõik vajalikud elemendid oleksid kaetud ning mõõdistuse täpsus vajalikes kohtades oleks piisav. Vastavalt hoone geomeetria ja mõõdistuse eesmärgile võib olla vajalik mõnes kohas valida tihedamalt ja suurema ülekatttega positsioone.

3.3.4 Scan to BIM protsessi lihtsustamine

Scan to BIM protsess koosneb erinevatest etappidest, millest osad on võimalik suuremal või väiksemal määral automatiseerida ning erinevate tööriistade abil manuaalset tööd lihtsustada. Selge on see, et põhilised otsused ja seadistused tuleb alati inimesel määrata, kuid suurte andmemahutude süsteemsel töötlemisel on suur potentsiaal tehnoloogial ja tarkvaral. Sellegi poolest igasuguste tööriistade kasutamisel on oma maksumus ja seadistusele ning väljaõppele kuluv tööaeg. Seega tuleb alati vastavalt olukorrale otsustada, milline on optimaalne töömeetod ja tehnoloogia kindla ülesande teostamiseks.

3.4 Tulemuste lühikokkuvõte

Olemasolevate hoonete renoveerimistehnoloogiate valimisel tuleb ühest küljest arvestada tavapärase kõrvalekalletega vastavat tüüpi hoone puhul. Näiteks jääb kuni 6-korruseliste hoonete puhul suurem osa hälbeid 50mm piiresse, kuid üksikutes kohtades tuleb arvestada kõrvalekalletega kuni 90mm. Teisest küljest, kui valitud tehnoloogiat ühesuguselt paljudele hoonetele rakendada, peavad hälbed kõigil hoonetel jääma tehnoloogia määratud kriteeriumite piiresse. Näiteks tehases toodetud fassaadipaneelide monteerimisel saab kinnituskohti reguleerida ainult kindlas ulatuses ja see seab piiri lubatud hälvetele. Kui hoone fassaadil on kohti, mis tehnoloogia nõuetele ei vasta, tuleb need kohad eelnevalt korrigeerida.

Sarnaselt renoveerimistehnoloogiate valikule seab ka *scan to BIM* protsessis järgnev protsess eelnevale kriteeriumeid. Modelleerimiseks kasutatav tarkvara määrab

skaneerimise seadmetele ja seadistusele nõuded. Näiteks võib tarkvara efektiivsemaks toimimiseks olla vajalik koostada struktureeritud punktipilv või märkida hoone fassaadile tähiseid, mis lihtsustavad tarkvaral elementide tuvastamist. Lisaks on mõnel juhul vajalik hoone ümbert üleliigseid detaile eemaldada või muul moel skaneeritavat objekti ette valmistada.

Mudeli genereerimise protsessi lihtsustamiseks on oluline otsida võimalusi töö automatiseerimiseks, milles on võtmetähtsus efektiivselt toimiva ja spetsiifilise funktsiooniga tarkvarade kasutusele võtmiseks.

4. ARUTELU

Eestis on väga suurel hulgal tüüpprojektide järgi ehitatud kortermaju, mis on jäämas jalgu tänapäevastele energiatõhususe nõuetele. Aktiivselt kasutusel olevate kortermajade lammutamine ja uute ehitamine on keeruline mitmest vaatenurgast ja muuhulgas mitte kõige keskkonnasäästlikum. Seetõttu on üks võimalik lahendus kortermajade renoveerimine ning kaasajastamine vastavalt tänapäevastele energiatõhususe nõuetele ja kasutajate esteetilistele ootustele. Hinnanguliselt on järgmise 30 aasta jooksul vaja renoveerida ligi 141 000 hoonet, et saavutada Euroopa üleselt rohepöörde eesmärgid. Sedavõrd mastaapne projekt on teostav vaid uute ja tõhusamate tehnoloogiate abiga. Sellised trendid nagu timmitud ehitus, industrialiseerimine ja digitaliseerimine pakuvad hädavajalikke töömeetodeid ja tehnoloogiat süsteemse renoveerimislaine teostamiseks.

Kui otsustatakse minna edasi mastaapse kortermajade renoveerimisega, siis järgmiste tegevustena on selge vajadus kõnealuste kortermajade laiaulatuslikuks kaardistamiseks. Tuleks uurida erinevat tüüpi hoonete geomeetrilisi hälbeid ja paika panna konkreetsed kriteeriumid, milliste iseärasustega peaks arvestama vastava hoonetüübi ja ehitise korruselisuse puhul.

Seejärel tuleks väljatöötada optimaalsed *scan to BIM* protsessid erinevate tüüphoonete jaoks. Protsessi kirjelduses peaks olema väljatoodud, millist infot ja millise täpsusega on laserskaneerimisel vaja koguda, milliseid skaneerimisseadmed on soovitatavad ja sobilikud, millised tingimused tuleb täita enne skaneerimist ja skaneerimise käigus. Seejärel tuleks kirjeldada punktipilvest mudeli genereerimise protsessi. Tuua välja nõuded punktipilvele, nimetada soovitatavad ja sobilikud tarkvaralised lahendused ning nõuded valminud mudelile. Mudeli loomine peaks lõppema selle täpsuse ja kvaliteedi kontrolliga, millele tuleb samuti kriteeriumid püstitada. Kuna hetkel on kõige ebaselgem osa sobiva tarkvara leidmine, siis eeldab optimaalse protsessi koostamine erinevate võimalike tarkvarade sügavamat uurimist ja konsulteerimist programmide tootjatega või koguni tarkvaraarendust spetsiifiliste eesmärkide täitmiseks. Olemasolevad programmid suudavad automaatselt genereerida punktipilvest parimal juhul primitiivse 3D mudeli, kuid terviklikust BIM mudelist on asi kaugel. Võimalik, et mingil määral manuaalset tööd tuleb protsessi käigus teha, kuid selle hulka peaks oluliselt vähendama.

Viimasena tuleks kirjeldada soovitatavaid ja võimalikke renoveerimislahendusi vastava tüüphooni puhul. Siinkohal on oluline koostöö elementmaju tootvate ettevõtetega ja tavapäraseid renoveerimisprojekte teostavate ehitusfirmadega. Nendega koostöös tuleks optimeerida olemasolevaid või arendada uusi renoveerimislahendusi tüüpiliste

kortermajade efektiivseks, kiireks ja säästlikuks renoveerimiseks ning võimalike tüüpiliste probleemide lahendamiseks.

Üldiselt jõudsin töö käigus sarnasele järeldusele muude sarnaste uurimistöödega, et kuigi mitmed programmid suudavad mingil määral tööaega kokku hoida, siis töö käigus ei tuvastatud, et ühtegi protsessi etappi oleks võimalik täiesti automaatselt läbi viia. Parem on olukord punktipilve skaneerimisel, kus tehnoloogia on jõudnud optimaalsele tasemele, mille puhul kasutajal on vaja vaid korrektne seadistus sisestada ning skaneerimisseadmed saavad punktipilve loomisega iseseisvalt hakkama. Keerulisem on punktipilvest mudeli genereerimisega. Teadaolevalt ei ole ükski tarkvara hetkel võimeline suvalisest punktipilvest terviklikku mudelit genereerima. Küll aga on olemas hulgaliselt programme, mis tööd lihtsustavad või osaliselt automatiseerivad. Siiski on isegi nende abiga tihti vaja programmi jaoks valida manuaalselt punkte, sisestada suurel hulgal mittegeomeetrilisi andmeid või elemente klassifitseerida. Samuti ei arvesta programmid tasapindade modelleerimisel kohalike hälvete ja kõrvalekalletega ning modelleerivad seinad vertikaalselt sirgetena. Seetõttu tuleb peale mudeli valmimist teostada võrdlus punktipilvega suuremate hälvete tuvastamiseks. Siinkohal on tehnoloogial ja tarkvaralistel lahendustel arenguruumi. Samas on just mudeli koostamine kõige töömahukam kriitiline lüli *scan to BIM* protsessis, mille eduka automatiseerimise korral oleks võimalik protsessi rakendada tõhusalt paljudes erinevate eesmärkide täitmiseks.

KOKKUVÕTE

Töö käsitleb lahendusi aktuaalsele vajadusele renoveerida Eestis eesolevatel aastakümnetel suurel hulgal eelmisel sajandil ehitatud kortermaju. Sellised hooned ei vasta enam tänapäevastele energiatõhususe nõuetele ning Euroopa Liidu seatud kliimaneutraalsuse eesmärkide täitmiseks tuleb Eestis järgmise 30 aasta jooksul renoveerida umbes 22600 kortermaja. Sellises mastaabis väljakutse eeldab tõhusamate tehnoloogiate ja töömeetodite kasutuselevõtmist.

Töö üks eesmärkidest oli kaardistada olemasolevate eelmisel sajandil ehitatud kortermajade geomeetrist olukorda. Selleks uuriti punktipilvede põhjal erinevat tüüpi hälbeid fassaadidel. Renoveerimiseks kasutatav tehnoloogia peab võimaldama vastaval hoonel esinevate geomeetriste hälvete korrigeerimist. Töö tulemustest on võimalik teha järeldusi renoveerimislahenduste kohandamiseks või uute väljatöötamiseks. Samuti peab hoone vastama teatud kriteeriumitele, näiteks olema piisavalt madal ja sellise kujuga, et valitud mõõdistustehnoloogia suudaks koostada punktipilve nõutud täpsusega.

Teine põhiline eesmärk oli kaardistada BIM mudelisse skaneerimise kontseptsioone, tehnoloogiaid ja töövoogu. Tehnoloogiliselt on protsessis kaks keerulist kohta, milleks on skaneerimine ja BIM mudeli genereerimine. Kui skaneerimise tehnoloogiad on tänapäeval punktipilvede loomiseks juba laialdaselt kasutusel, siis keerulisem on BIM mudeli koostamine punktipilvest. Hoolimata paljude nutikate tarkvarade olemasolust tuleb siiski sageli mudeli koostamiseks kulutada palju töötunde, mis vähendab oluliselt töövoogu efektiivsust ja võimekust rakendada seda tuhandete hoonete renoveerimisel. Hetkel puudub ühene kontseptsioon punktipilvest modelleerimise töövoogu praktiliseks ja tõhusaks rakendamiseks.

Massilise renoveerimise eelduseks on tulevikus optimaalsete *scan to BIM* protsesside väljatöötamine erinevate tüüphoonete jaoks. Selleks aga on vaja sihtotstarbelist tarkvara arendamist ja tehnoloogiate kohandamist spetsiifiliselt renoveerimisprojektide koostamise tarbeks. Samuti tuleb tähelepanu pöörata kasutatavatele materjalidele ja tehnoloogiatele renoveerimiseks vajalike detailide tootmisel. Eriti suurt potentsiaali töövoogu tõhustamisel pakub tehases toodetud elementide valmistamine tavapärase ehitusplatsil ehitamise asemel.

Lõputöö täitis oma eesmärgid kaardistades kortermajade geomeetrist olukorda ja BIM mudelisse skaneerimise võimalusi. Töö on lähtekohaks kortermajade massilisel renoveerimisel, kuid suuremas mahus tehnoloogiate rakendamiseks praktikas on vaja täiendavat uurimist ja ettevalmistusi.

CONCLUSION

This thesis deals with a current need in Estonia to renovate a large number of apartment buildings built in the last century in the coming decades. Such buildings no longer meet modern energy efficiency requirements, and in order to meet the climate neutrality goals set by the European Union, approximately 22600 apartment buildings will have to be renovated in Estonia over the next 30 years. For the challenge on a such large scale there is a need to adopt more efficient technologies and working methods.

One of the goals of this thesis was to map the geometric situation of existing apartment buildings built in the last century. For that purpose, different types of deviations on the facades were investigated based on the point clouds. The technology used for the renovation must make it possible to correct the geometrical deviations on the facade. From the results of the thesis it is possible to draw conclusions for the adaptation of renovation solutions or the development of new solutions. The building must also meet certain criteria, such as being low enough and shaped so that the chosen technology for scanning can produce a point cloud with the required accuracy.

The second main goal of the thesis was to map scan to BIM concepts, technologies and workflows. Technologically, there are two complex parts in the process, which are scanning and generating a BIM model. While scanning technologies are already widely used today to create point clouds, modeling a BIM model from a point cloud is more complicated. Despite the existence of many smart software solutions, it often takes a lot of working hours to build a model, which significantly reduces the efficiency of the workflow and its ability to be used to renovate thousands of buildings. There is currently no single concept for the practical and efficient implementation of modelling from point cloud workflow.

A presumption for massive renovation in the future is the development of optimal scan to BIM processes for different building types. However, this requires the development of customized software and the adaptation of technologies specifically for the preparation of renovation projects. Attention must also be paid to the materials and technologies used in the production of details needed for renovation. The production of factory-produced elements instead of conventional on-site construction offers particularly great potential for increasing workflow efficiency.

This thesis fulfilled its goals by mapping the geometric situation of apartment buildings and the possibilities of scan to BIM application. This work is a starting point for the massive renovation of apartment buildings, but further research and preparation is needed to apply the technologies on a larger scale in practice.

KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

- Adan, A., Quintana, B., Prieto, S. A., Bosche, F. (2018). Scan-to-BIM for 'secondary' building components.
- Anil, E. B., Tang, P., Akinci, B., Huber, D. (2013). Deviation analysis method for the assessment of the quality of the as-is Building Information Models generated from point cloud data.
- Aule, S. (2014). Mittestandardse kujuga ehitiste laserskaneerimine ja punktipilve põhjal modelleerimine TTÜ veetorni näitel.
- Autodesk Knowledge Network. (2022). ReCap -> Scan Project Workflow -> Starting Scan Projects -> Register Scans.
- Badenko, V., Fedotov, A., Zotov, D., Lytkin, S., Volgin, D., Garg, R. D., Liu, M. (2019). Scan-to-bim Methodology Adapted For Different Application.
- Brilakis, I., Lourakis, M., Sacks, R., Savarese, S., Christodoulou, S., Teizer, J., Makhmalbaf, A. (2010). Toward automated generation of parametric BIMs based on hybrid video and laser scanning data.
- Drobnyi, V., Fathy, Y., Brilakis, I. (2022). Generating geometric digital twins of buildings.
- Euroopa Komisjon. (2019). Euroopa roheline kokkulepe.
- Gustavsson, L., Sathre, R. (2011). Energy and CO2 analysis of wood substitution in construction.
- Haljend, E. (2020). Sildkraanatee laserskanneriga mõõdistamise täpsuse aprobeerimine.
- Han, X., Jin, J. S., Wang, M., Jiang, W., Gao, L., Xiao, L. (2017). A review of algorithms for filtering the 3D point cloud.
- Jo, H. J., Jang, Y. J., Lee, J. W., Oh, J. H. (2021). Dense Thermal 3D Point Cloud Generation of Building Envelope by Drone-based Photogrammetry.
- Kalsaas, B. T. (2010). Work-time Waste in Construction.
- Koskela, L., Howell, G., Ballard, G., Tommelein, I. (2002). The Foundation of Lean Construction.
- Larsen, K. E., Lattke, F., Ott, S., Winter, S. (2011). Surveying and digital workflow in energy performance retrofit projects using prefabricated elements.
- Liias, R., Lill, I., Puust, R., Alt, A., Hamburg, P., Siidirätsep, K., Tammaru, E. (2021). Klassifitseerimissüsteem CCI-EE: Olemus ja kasutamine.
- Marhani, M. A., Jaapara, A., Azmi, N., Baria, A., Zawawib, M. (2013). Sustainability through Lean Construction Approach: A literature review.
- Marshall, G. F., Stutz, G. E. (2012). Handbook of Optical and Laser Scanning.
- Miilits, K., Rak, D. (2020). Ettevõtte Timbeco Woodhouse OÜ hetkeolukorra analüüs ja digipöörde teekaardi koostamine.
- Pikas, E., Seppänen, O., Koskela, I., Peltokorpi, A. (2021). Challenges in industrialized renovation of apartment buildings.
- Sacks, R., Eastman, C., Lee, G., Teicholz, P. (2018). BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Designers, Engineers, Contractors, and Facility Managers, 3rd Edition: 10.6 Victoria Station, London Underground.

- Salem, O., Solomon, J., Genaidy, A., Minkarah I. (2006). Lean Construction: From Theory to Implementation.
- Sidani, A., Dinis, F. M., Sanhudo, L., Duarte, J., Baptista, J. S., Martins, J. P., Soeiro, A. (2019) Recent Tools and Techniques of BIM-Based Virtual Reality: A Systematic Review.
- Slattery, K. T., Slattery, D. K., Peterson, J. P. (2012). Road Construction Earthwork Volume Calculation Using Three-Dimensional Laser Scanning.
- Syring, S., Nylund, J. (2018). Introducing UAS and Photogrammetry for Surveying and Surveilling New Project Sites.
- Tallinna Tehnikaülikooli ehituse ja arhitektuuri instituudi liginullenergiahoonete uurimisrühm (2020). Hoonete rekonstrueerimise pikaajaline strateegia, raporti osa.
- Telling, J., Lyda, A., Hartzell, P., Glennie, C. (2017). Review of Earth science research using terrestrial laser scanning.
- Thomson, C., (2018). Common 3D point cloud file formats & solving interoperability issues.
- U.S. Institute of Building Documentation (2016). USIBD Level of Accuracy (LOA) Specification Guide.
- Wang, Q., Guo, J., Kim, M. (2019). An Application Oriented Scan-to-BIM Framework.