

PROGRAMMI VALDKONDLIKU TEADUS- JA ARENDUSTEGEVUSE TUGEVDAMINE (RITA)  
TEGEVUSE 1 TEENUSE OSUTAMISE LEPING nr 7.8-3/18/17

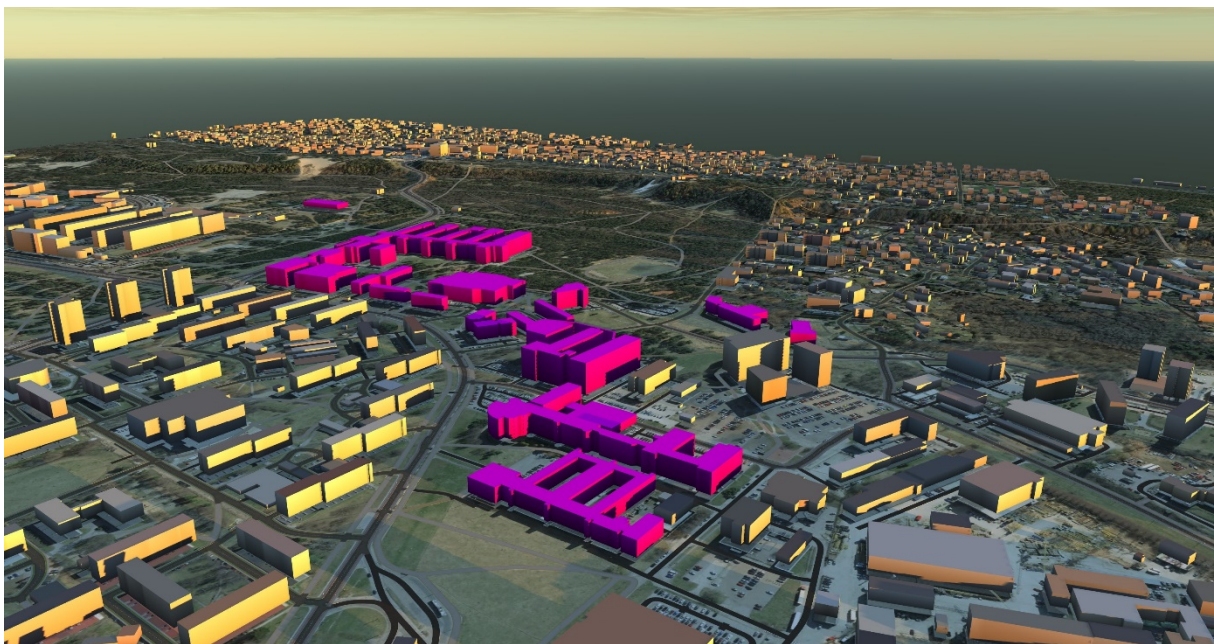
Kaugseire andmete kasutuselevõtt avalike teenuste väljatöötamisel ja arendamisel

Lisa 4

DOI: [10.23673/re-254](https://doi.org/10.23673/re-254)

## Ehitustegevuse planeerimine ja järelevalve

LÕPPARUANNE



Kuvatõmmis Autodesk InfraWorks tarkvarast, milles koondatud Maa-ameti ning Tallinna ruumiandmed

Dokumendi koostas: Raido Puust, Sander Varbla

Tallinn 2020



KESKKONNAMINISTEERIUM



SISEMINISTEERIUM



MAJANDUS- JA  
KOMMUNIKATSIOONI-  
MINISTEERIUM



MAELUMINISTEERIUM

## Sisujuht

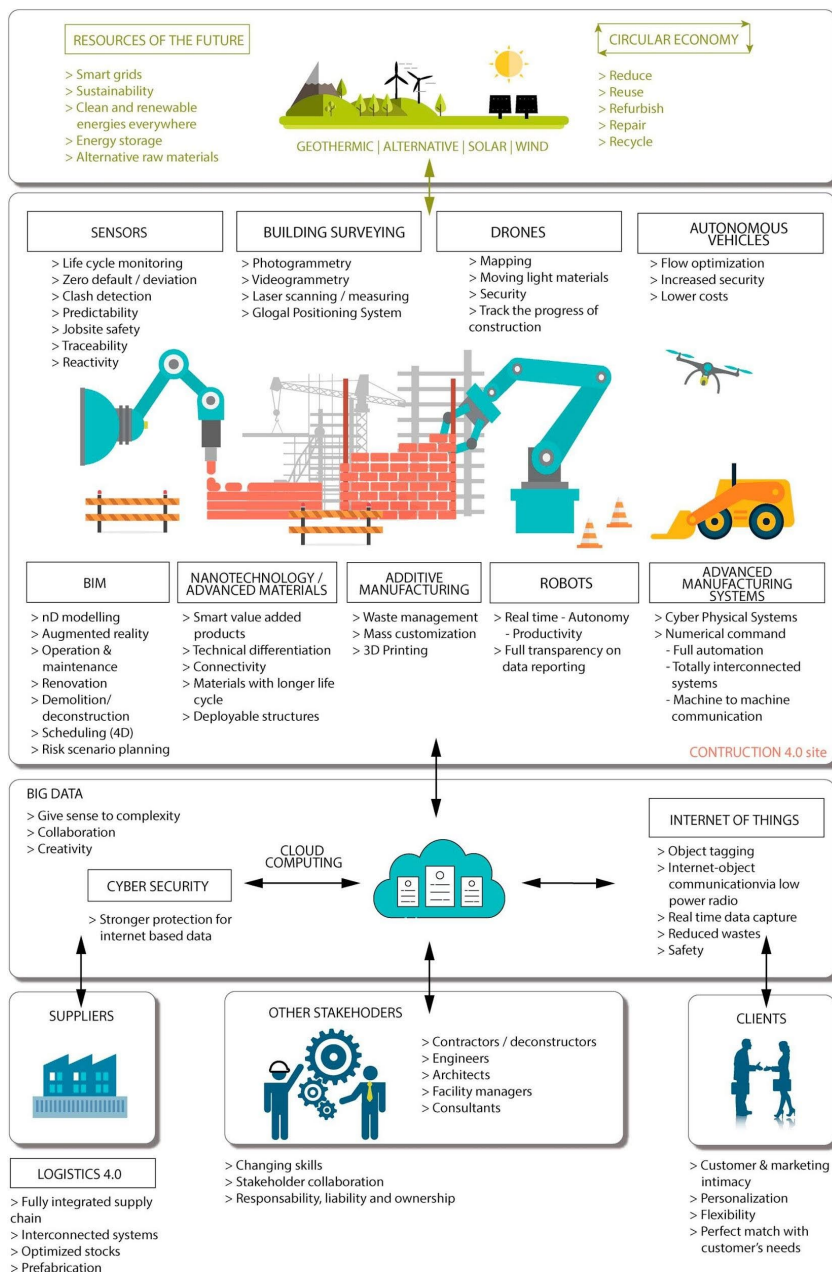
1.	Ehitustegevuse planeerimine ja järelevalve.....	3
1.1	Satelliitseire .....	10
1.1.1	Ladustatud, taaskasutatava ehitusmaterjali mahuline hindamine .....	10
1.1.2	Ehitustegevuste monitoorimine .....	10
1.1.3	Olemasolevate konstruktsioonide deformatsiooni monitooring.....	11
1.1.4	Maapinna (katendi) energiabilansi monitoorimine .....	12
1.2	Aeroskaneerimine .....	14
1.2.1	Linnamorfoloogia uuringud .....	14
1.2.2	3D katuse mudelite progressiivne täpsustamine .....	15
1.2.3	Ehitiste fassaadide päikesekiirgus .....	17
1.2.4	Sõidutee koridori valikuga seotud analüüsid .....	18
1.3	Drooniseire .....	20
1.3.1	Möödistamine .....	22
1.3.2	Möödistamine päästeoperatsioonide planeerimiseks.....	23
1.3.3	Lähteandmete mudel disaini alternatiivide analüüsiks.....	23
1.3.4	Automatiseeritud kontrolltegevused .....	24
1.3.5	Semantiline segmenteerimine .....	25
1.3.6	Infrastruktuuri monitooring .....	26
1.3.7	Energiaaudit .....	29
1.3.8	Deformatsioonide mõõtmised .....	29
1.3.9	Ehitusplatsi monitoorimine .....	30
1.3.10	Ehituse ohutuse monitoorimine.....	31
1.4	Mobiilsed LiDAR-süsteemid .....	34
1.4.1	Üksikute elamute eraldamine .....	34
1.4.2	Infrastruktuuri kontroll.....	34
1.4.3	Sõiduraja märgistuse analüüs.....	37
1.4.4	Nähtavuse ulatuse analüüsid .....	38
1.5	Maapealne laserskaneerimine .....	38
1.5.1	Scan-to-BIM ning Scan-vs-BIM .....	38
1.5.2	Automaatne tellingu platvormide kontroll .....	39
1.5.3	Pragude määramine konstruktsiooni komponentidel .....	39

1.5.4	Niiskustaseme määramine ehitusmaterjalides .....	40
1.6	Ülevaate kokkuvõte.....	41
2.	Metoodika .....	42
2.1	Pilootalade määramine .....	42
2.1.1	Pilootala #1 lühikirjeldus Kose-Võõbu 2+2 maantee.....	42
2.1.2	Pilootala #2 Renoveeritav TalTech õppehoone.....	43
2.2	UAV andmete kogumine .....	44
2.2.1	UAV andmete süstematiseerimine.....	44
2.2.2	Uute mõõdistuste läbiviimine .....	44
3.	Testimine ja veahinnangud .....	47
3.1	Andmeanalüüs.....	47
3.1.1	Piltide analüüs .....	48
3.1.2	Fotogrammeerial baseeruv analüüs .....	51
3.2	Vigade analüüs .....	78
3.2.1	Hoone mõõdistamise veaanalüüs .....	78
3.2.2	Sõidutee mõõdistamise veaanalüüs.....	84
4.	Hinnangud ja soovitusel (kasutusjuhud) .....	87
4.1	Aerolaserskaneerimisel baseeruvad prototüübid.....	88
4.1.1	Prototüüp: Maa-ameti kõrgusandmetel baseeruv 3D pinnamudel .....	89
4.2	Drooniseirel baseeruvad prototüübid .....	92
4.2.1	Prototüüp: Fikseeritud lennuplaaniga ehitusprotsessi kaardistamine .....	92
4.2.2	Prototüüp: Ehitusprotsessi mahuline võrdlus.....	94
4.2.3	Prototüüp: Masinnägemise kaudu objektide äratundmise treenimine.....	95
4.2.4	Prototüüp: Sõidutee deformatsioonide uuring.....	100
5.	Ligikaudne maksumusehinnang .....	102
Lisa 1.	Tänapäevased rakendused (kokkuvõte) .....	103
Lisa 2.	Andmed .....	105
Referentsid	.....	106

## 1. Ehitustegevuse planeerimine ja järelevalve

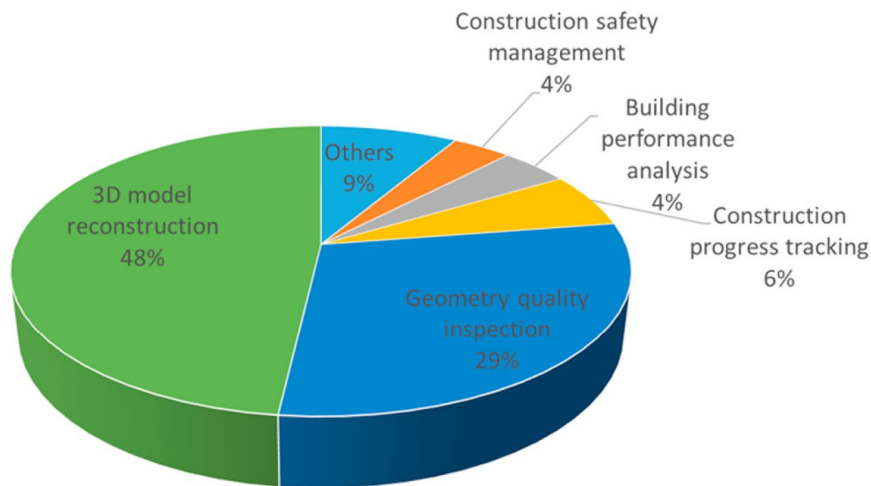
Ehitussektor moodustab olulise osa ülemaailmsest majandusest, jäädes hetkel ligikaudu 6% juurde sisemajanduse kogutoodangust ja kasvades ca 14.7% juurde aastaks 2030 (GCP, 2015). Ehitussektor on väga oluline ka Euroopa majandusele, andes tööd umbes 18-le miljonile elanikule ning selle tootlikkuse kasv 1% võrra tähendaks iga-aastast ehituskulude kogusäästu 100 miljardit USD. Ehitussektor elab muutuste lainel 4-nda tööstusrevolutsiooni poole ning just seetõttu nimetatakse seda ajastut kui "Ehitus 4.0" (ingl "Construction 4.0") (Craveiro *et al.*, 2019). "Ehitus 4.0" tähendab põhimõtteliselt digitaliseerimise suuremat rakendamist läbi ehitusinfo modelleerimise (ingl *building information modelling* ehk BIM) (joonis 1.1). Ehitusinfo modelleerimise peamine eesmärk on integreerida ehitise kohta käiv info elukaareüleselt (planeerimine, projekteerimine, ehitamine, opereerimine, korrashoid, renoveerimine, lammutamine).





Joonis 1.1. "Ehitus 4.0" ("Construction 4.0") kaasab väga palju erinevaid digitaalseid tehnoloogiaid (allikas: Craveiro et al., 2019)

Kaugseire sobitub "Ehitus 4.0" tööprotsessidesse mitmel tasandil. Näiteks saab kaugseiret kasutada ehitustegevuste kaardistamiseks ning nende jälgimiseks. Kaugseirega kogutud suurandmeid (sh pildiline info, punkt pilved) saab omakorda analüüsida tehisintellektil baseeruvate lahendustega, et seeläbi automatiseerida teatud otsuste vastuvõtmist. Punkt pilve kasutamine läbi laserskaneeringu (ingl *light detection and ranging* ehk LiDAR) või fotogrammeetria on ehitussektoris leidnud laialdast kasutust ning see kasvab tänu tehnoloogia arengule veelgi. Erinevate teadusuuringute tähenduses omab punkt pilv, kui kaugseirest saadav üks võimalik tulem, väga laia kasutusvaldkonda, mis on kokku võetud joonisel 1.2.



**Joonis 1.2.** Teadusartiklite arv punktipilve rakenduste lõikes ehitussektoris (allikas: Wang and Kim, 2019). Grupp “Others” sisaldab: hoonete renoveerimist, ehitustegevuste automatiseerimist, pärandiga seotud ning robotiseeritud navigeerimist.

Punktipilvest teostusmudelite (ingl *as-built model*) koostamise meetodid võivad üksteisest suuresti erineda ning Tang *et al.* (2010) on neist teinud väga hea kokkuvõtva artikli. Üldjoontes võib need meetodid jagada kolme suurde gruppi: (a) geomeetiline modelleerimine; (b) objekti tuvastus ning (c) objekt-relatsiooniline modelleerimine.

Üldjoontes võib kaugseirena vaadelda mistahes objekti vaatlust, mis toimub distantsilt ning ei ole vaadeldava objektiga otseses kontaktis (Toth and Józków, 2016). Viimase kümnendi jooksul on kaugseire meetodid ning võimalused oluliselt täienenud ja seda ennekõike tehnoloogia (sh sensorite) arengute tõttu. Näiteks on drooniseire ning mobiilne LiDAR muutunud üha kättesaadavamaks aga ka täpsemaks, mis võimaldab avardada kaugseire poolt kaetavaid kasutusjuhte. Üsna tihti iseloomustatakse kaugseiret läbi kasutatava sensori ja selle rakendusliku iseloomu ehk kasutusjuhtumi kaudu. Just sensorite kiire tehnoloogilise arengu ning pidevalt täiustuvate andmetöötlusmeetodite tõttu on kaugseire kasutus viimaste aastate jooksul pidevalt kasvanud. Kaugseirel on üks peamine eesmärk – määrata mingil maa-alal meid huvitavaid füüsilisi parameetreid ja seda kindla aja jooksul (fikseeritud hetkel või ajaperiood). Tegemist võib olla mistahes inimese poolt loodud objektiga. Kaugseiret saab klassifitseerida mitmeti, kuid ühed olulisemad parameetrid on: (a) objekti vahemik (kaugus „vaatleja“ ning objekti vahel); (b) ruumiline eraldusvõime (ehk ruumiline lahutus) ning (c) vaatluse kordumise vahemik (ajaline lahutus). Sellest lähtuvalt jagame me siinses ülevaates kaugseire nelja suuremasse gruppi, mis on kokku võetud tabelis 1.1.

Tänane tehnoloogia on liikumas multisensor platvormide suunas, mis parendab oluliselt objekti vaatlusvõimalusi kosmosest (õhuruumist) ning samas tõstab objekti vaatlemise efektiivsust ruumis. Lisaks multisensor tehnoloogiatele saab üldise vaatluse parendamiseks kasutada ka koopereeruvat vaatlust. Seda saab lihtsasti võrrelda koopereeruva navigatsiooniga, mis on tänapäeval kättesaadav enamikes lõpp-tarbijale mõeldud toodetes (nt navigeerimist võimaldavad seadmed).

**Tabel 1.1.** Tüüpiline sensori ja platvormi konfiguratsioon ning peamised opereerimise parameetrid (Toth and Jóźków, 2016)

Applicability and operation aspects	Data acquisition platforms			
	Satellite (spaceborne)	Airborne	UAS	Mobile/static (ground)
Maneuverability	No/limited	Moderate	High	Limited
Observation space	Worldwide	Regional	Local	Local
Sensor diversity	MS/HSI/SAR	MS/HSI/LiDAR/SAR	MS (LiDAR/HSI)	MS/LiDAR (HSI)
Environment	Outdoors	Outdoors	Outdoors/indoors	Outdoors/indoors
Scale (inverse sensor range)	Small	Small/medium	Medium/large	Medium/large
Ground coverage	Large (10 km)	Medium (1 km)	Small (100 m)	Small (50 m)
FOV	Narrow	Wide	Wide/super wide	Wide/super wide
Repeat rate	Day	Hours	Minutes	Minutes
Spatial resolution (GSD)	0.30–300 m	5–25 cm	1–5 cm	1–5 cm
Spatial accuracy	1–3 m	5–10 cm	1–25 cm	3–50 cm
Deployability	Difficult	Complex	Easy	Moderate
Observability	Vertical/oblique	Vertical/oblique	Vertical/oblique/360°	Oblique/360°
Operational risk	Moderate	High	Low	Moderate
Cost	\$\$\$\$\$	\$\$\$	\$	\$\$

Märkus: UAS: Unmanned Aircraft Systems (mehitamata õhusõidukisüsteemid), MS: Multispectral (multispektraal), HSI: Hyperspectral image (hüperspektraal pilt), LiDAR: Light Detection and Ranging; SAR: Synthetic Aperture Radar (tehisavaradar)

Satelliidil baseeruvaid seiresüsteeme on väga palju erinevaid ja seda nii kommerts- kui vabakasutuseks, antud ülevaates keskendume ennekõike avatud andmetele (tabel 1.2). Enne satelliitseire võidukäiku toimus kaugseire peajasjalikult õhuseire platvormide kaudu. Tänapäeval on need kaks platvormi aga üha rohkem üksteisele lähenemas ja seda just lahutusvõime tähenduses ning peamiseks erinevuseks saab sensorite valik. Õhuseire eeliseks võib tuua LiDAR-i kasutamise võimaluse ja just seetõttu ka parema punktipilve tiheduse väiksematel lennukiirustel. Seeläbi saab lihtsalt mõõdistada pikki joonobjekte, näiteks sõidutee/raudtee jmt koridore. Tüüpiline õhuseire süsteem saab kasutada nii LiDARit kui ka teisi sensoreid, omab lennukõrgust kuni 5 km ja lennukiirust vahemikus 190 – 360 km/h.

**Tabel 1.2.** Sentinel seeria kaugseire satelliitsüsteemid (allikas: Toth and Jóźków, 2016)

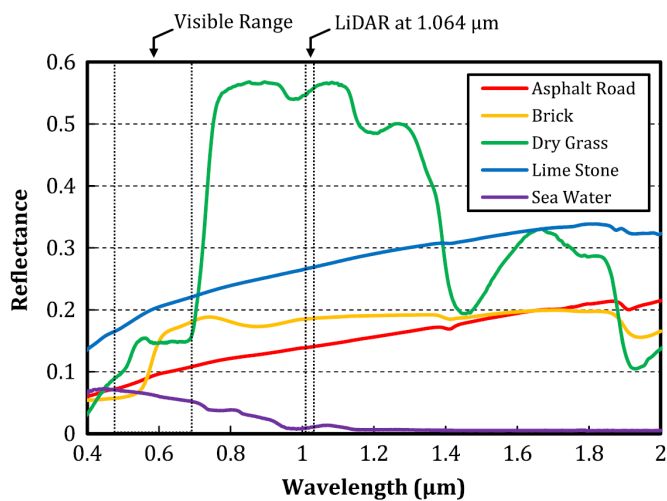
Nimetus	Kasutusel	Konstellatsioon	Sensor	Ruumiline eraldusvõime (m)	Vaalu laius (km)	Kordusseire (päevad)
Sentinel-1	2014 2016	Duaal	C-band	5 x 5	80	12
			SAR	5 x 20	250	6 (duaal)
				25 x 40	400	
Sentinel-2	2015 2016	Duaal	13 MS	10 x 10	290	10
				20 x 20		5 (duaal)
Sentinel-3	2015 2017	Duaal (kolmsus plan.)	21 MS	300 x 300	1270	< 2
			11 MS	500 x 500	1420	
			(IR)	1000 x 1000	750 (nadir)	

Märkus: MS: Multispectral (multispektraal), IR: Infrared (infrapuna), SAR: Synthetic Aperture Radar (tehisavaradar)

Väga hea ülevaate õhuseire klassifikatsioonidest ning õhuseire LiDAR-i rakendusvõimalustest linnakeskkonnas saab artiklist Yan *et al.* (2015) (joonis 1.1).

Kõrglahutusega satelliitpildi ja õhuseire LiDAR-ilt saadud tulemuse peamine erinevus tuleneb pinna jälgitavusest sügishooajal (lehtedega kaetud pinnas). Õhuseire LiDAR-it saab kasutada ka pinnakatte ning topograafia määramiseks (valgala mõõtmed ning kalle).

Üha enam kasutust leidvaks kaugseire platvormiks on mehitamata õhusõidukisüsteemid (ingl *unmanned aircraft systems* ehk UAS), tuntud ka kui mehitamata õhusõidukid (ingl *unmanned aerial vehicle* ehk UAV) ehk droonid. UAS tüüpe on väga erinevaid, näiteks fikseeritud tiivaga ja rootortüüpi droon. Sõltuvalt drooni tüübist, varieeruvad nende maksimaalne õhus oleku aeg, lennukiirus ning stardimass (tabel 1.3). Oluline on ka seireks vajalike seadmete mass. Pildisensorite arv kasvab aasta-aastalt ning droonitootja peab leidma sobiva seadmete kombinatsiooni, mis vastaks kasutusjuhu omapäradele (Colomina and Molina, 2014). Sensorite kategooriaid võib jagada: (a) multispektraal, hüperspektraal kaamerad; (b) termopildi kaamera; (c) laserskanner ning (d) tehisavaradar. Laserskannerid (LiDAR) leiavad ühe rohkem tähelepanu, kuna nende langevad hinnad muudavad nad laiemalt kättesaadavaks.



**Joonis 1.3.** Erinevate materjalide spektraalne peegeldustegur nähtavast valgusest infrapunakiirguseni (allikas: Yan et al., 2015)

Droone opereeritakse üldjuhul vaatlusala lähedusest, mistõttu on ka oluline tähele panna kohalike regulatsioone, mis panevad paika maksimaalse lennukõrguse ning muud piirangud, mis kehtivad drooni opereerimisele. Kuna maksimaalsed lennuajad on kasvanud ning uuringud on muutumas üha keerukamaks, siis on kasvanud droonide kaitsemehhanismide kasutuselevõtt (näiteks optiline kauguse mõõtmine vältimaks kokkupõrkeid).

**Tabel 1.3.** Droonide näidisvalik (allikas: Toth and Józków, 2016)

Total takeoff weight (kg)	Aircraft type/power	Model/manufacturer	Flying time (min)	Flying speed (m/s)	Remote sensing sensors	Georeferencing sensors (besides autopilot)
<5 kg						
0.7	Fixed-wing/electric	eBee RTK/senseFly	40	11–25	Camera	L1/L2 GPS
2.5	Fixed-wing/electric	UX5/Trimble	50	22	Camera	
2.7	Fixed-wing/electric	SIRIUS PRO/Topcon	50	18	Camera	L1/L2 GPS
5	Fixed-wing/electric	Pteryx/Trigger Composites	120	12.5–15	Camera	
1.3	Quadrocopter/electric	Phantom 2/DJI	25	15	Camera	
3.7	Octocopter/electric	X8-M/3DRobotics	14		Camera	
<25 kg						
5.1–5.8	Fixed-wing/electric	AeroHawk/Hawkeye UAV	90	16.5–19.5	Camera	L1/L2 GPS
6.1	Fixed-wing/electric	Puma AE/AeroVironment	210	23	Camera	
6	Quadrocopter/electric	MD4-1000/Microdrones	90	12	Camera/LiDAR	
4.6–6.6	Hexacopter/electric	Aibot X6/Aibotix	30	14	Camera	
9.2	Octocopter/electric	OnyxStar FOX-C8 HD LiDAR/ AltiGator	20		LiDAR	L1/L2 GPS
6.9–9.5	Hexacopter/electric	Li-AIR/TRGS	15	8	LiDAR	L1/L2 GPS, IMU
9.5	Octocopter/electric	Delta X8/Altus UAS	10–14	12	Camera/LiDAR	
25	Octocopter/electric	Ricopter/Riegl	30	22	LiDAR/Camera	L1/L2 GPS, IMU
>25 kg						
38	Fixed-wing/gas	RS-16/American Aerospace	720–960	33	Camera	L1/L2 GPS, IMU
77	Helicopter/gas	Scout B1-100/Aeroscout	90		LiDAR	L1/L2 GPS, IMU
90	Helicopter/gas	Geocopter/Igi	120–180		Camera/LiDAR	L1/L2 GPS, IMU

Selle ülevaade viimaste kaugseire kategooriatena vaadeldakse mobiilseid platvorme ja maapealseid seadmeid, mis on kasutusel koos GPS-i laiema levikuga. Mobiilse platvormina saab vaadata sõidukeid (auto jmt), mis on võimelised kandma erinevat liiki sensoreid, et mõõdistada transpordikoridore tavalistel sõiduki liikumiskiirustel. Maapealseid seadmeid kasutatakse ennekõike olukorras, kus on vaja saavutada suuremat mõõdistustäpsust ning uuritav maa-ala jääb väiksemapoolseks (nt ehitusplats). Mobiilne ja maapealne kaardistus on hoogu juurde saanud tänu ehitusinfo modelleerimise laiemale levikule, kus teostusmudeli loomiseks on vaja koguda suur hulk mõõdistusandmeid, et seeläbi luua tegelikkust peegeldav digitaalne kaksik. Maapealset skaneerimist saab vaadata ka mobiilse seadme alaliigina, milles olemasoleva olukorra kaardistus fikseeritakse kindlast vaatepunktist ja mida saab seejärel kombineerida teistest vaatepunktidest ülesvõetud kaardistustega. Kõik eelnimetatud kategooriad (satelliit-, õhuseire-, droonid, mobiilne ja maapealne) omavad platvormi iseloomust tulenevalt parimaid kasutusjuhte. Väga hea ülevaate laserskaneeringute olemusest ja võimalustest leiab Julge (2018) doktoritööst.

Kaugseiret saab ehitussektoris kasutada mitmeti. Uued kasutusjuhud saavad võimalikuks tänu kaugseire tehnoloogia pidevale täiustamisele. Seda saab kasutada nii ehitustegevuste jälgimisel kui olemasoleva mõõdistamisel. Rahvaarv on globaalselt vaadatuna kasvutrendis, mis on tingitud ka suurema vajaduse parema, efektiivsemalt loodud infrastruktuuri järele. Küsimus pole mitte ainult selles, kuidas oleks võimalik efektiivsemalt ehitada aga ka selles, kuidas seda hilisemas etapis nutikamalt hallata. GPS seadmed ühes satelliitidelt saadud pildiinfoga on juba aastaid aidanud vältida liiklusummikuid. Nutikad valgusfoorid on heaks näiteks, milles info- ja kommunikatsioonitehnoloogiad (ingl *information and communication technologies* ehk ICT) aitavad ellu viia nutika linna kontseptsiooni. Nutika linna loomises leiavad rakendust väga paljud erinevad tehnoloogiad ning kaugseire on vaid üks neist (Mohamed, *et al.* 2018). Põhjaliku ülevaate info- ja kommunikatsioonitehnoloogiate kasutusest ehitussektoris leiab artiklist Alsafouri and Ayer (2018).

Kaugseire tähenduses on üha kuumemaks teemaks muutuste analüüs. See kehtib ka ehitusega seotud tegevustele, milles on oluline jälgida tööde efektiivsust, kinni pidada ajakavast ning hoida silma peal käimasolevatel tegevustel. Muutuste tuvastamist võib jagada 2D ja 3D analüüsideks ning nende erisused on välja toodud tabelis 1.4.

**Tabel 1.4.** 2D ja 3D muutuste tuvastamise peamised erisused (allikas: Qin et al., 2016)

	2D muutuste tuvastamine	3D muutuste tuvastamine
Andmeallikad	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 2D pankromaatilise/spektraalse, 2D vektor</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 3D punktipilv, digitaalne pinnamudel, stereopilt, stereo-panoraamid, mitmik-vaatepunktiga pildid, 3D mudel jpt.</li> </ul>
Rakenduse ulatus	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Maa-ala madal-ning keskmise resolutsiooniga kaardistus</li> <li>• Piiratud rakendusvõimekus kõrgematel resolutsioonidel, sh ehitise tasandil kasutamine</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Üldiselt rakendatav mistahes andmetele (erinevate resolutsioonidega)</li> <li>• Võimalus kasutada erinevate vaatenurkade alt</li> </ul>
Eelised	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Väga hästi läbi uuritud</li> <li>• Lihtne andmehõive</li> <li>• Lihtne kasutusele võtta</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kõrgusinfot saab filtreerida valgustugevusest lähtuvalt</li> <li>• Perspektiiviga seotud moonutuste vaba</li> <li>• Mahulised erisused</li> </ul>
Puudused	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sõltub valgustatusest ning atmosfääri tingimustest</li> <li>• Piiratud vaatenurgad, perspektiivi moonutused</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ebausaldusväärne 3D info võib kaasata tehislisku infot</li> <li>• Osaliselt tegemist veel endiselt kuluka andmehõive- ja töötlusmeetodiga</li> </ul>

3D vaatlused on ehitussektori omapära silmas pidades väga väärtuslikud, kuna kõiki mõõdistusi saab analüüsida lähtuvalt ehitusinfo mudelistest. Olles alustanud 3D muutuste analüüsiga, tuleb arvestada kahe väga olulise nüansiga: (a) kogutud pildiinfo tuleb omavahel liita, et oleks võimalik luua 3D andmestikku ning (b) objektide tuvastamiseks on vaja kasutada masinõpet, et lihtsustada võrdleva analüüsi läbiviimist. Selle valdkonna tuleviku arendused on ennekõike seotud just eelnimetatud kahe olulise vajadusega, et 3D muutuste analüüse saaks laialdasemalt ehitussektoris kasutusele võtta.

Ühest varasemast uuringust (Jazayeri *et al.*, 2014) võib leida kokkuvõtva märkuse, et kaugseire tähenduses on liialt keskendunud hoone välisele karbile ning vähem tähelepanu on leidnud kaugseire võimalused, milles oleks integreeritud nii ehitise sisene kui väline informatsioon. Sellest lähtuvalt jagatakse nimetatud uuringus erinevad 3D andmehõive meetodid kahte suurde gruppi: (a) geomeetrilised ning (b) semantilised komponendid. Geomeetriliste alla kuuluvad näiteks krundi asukoht ja selle piirid, ehitise gabariidid, ehitise ruumiline paiknemine, siseperimeetri kaardistus ning maa-ala ja ehitise ruumilised analüüsid. Semantilise kategooria alla kuulub maa-ala täpsem informatsioon ning ehitist puudutavate komponentide lisainfo (nt fassaad, katus jne). Kokkuvõttena tuuakse välja, et õhuseirelt (droonidelt) saadud andmete kombineerimine maakatastri infoga aitab tagada maa-ala geomeetrilist ning semantilist infot 3D-s ehitusregistri tarvis. Eeliseks tuuakse ennekõike

madalad kulud ning väga hea taaskasutus. Järgnevates alapeatükkides vaatleme erinevaid kaugseire kasutusjuhte ehitise elukaareüleselt.

## 1.1 Satelliitseire

Satelliitidel kasutatakse väga erinevaid sensoreid. Just multispektraalpiltide kasutamisest nähakse suurt potentsiaali ka ehitatud keskkonnaga seotud uuringutes. Linnades on peamiseks probleemiks ehitistelt langevate varjude olemasolu ning piiratud võimalused neid välja filtreerida. Välja on pakutud mitmeid ehitisega seotud varjuindekseid, mida on võimalik analüüsidel kasutada, kuid mis hakkaks piirama näiteks täna kasutusel olevate multispektraalsensorite kogutud infoküllasust (nt Sentinel-2A). Seetõttu on leitud võimalusi, kuidas varasemaid varjuindekseid omavahel kombineerida, et infokadu vähendada (Sun *et al.*, 2019). Uue meetodi eeliseks on varjude efektiivsem määratlus nii selge kui ka pilves ilma korral. Näiteks võimaldab see eristada ehitiste varju veetasapinnalt madalama pinna peegeldumisnäitaja korral ühes suurema spektraalse selektiivsuse indeksi väärtustega (ingl *spectral discrimination index* ehk SDI).

### 1.1.1 Ladustatud, taaskasutatava ehitusmaterjali mahuline hindamine

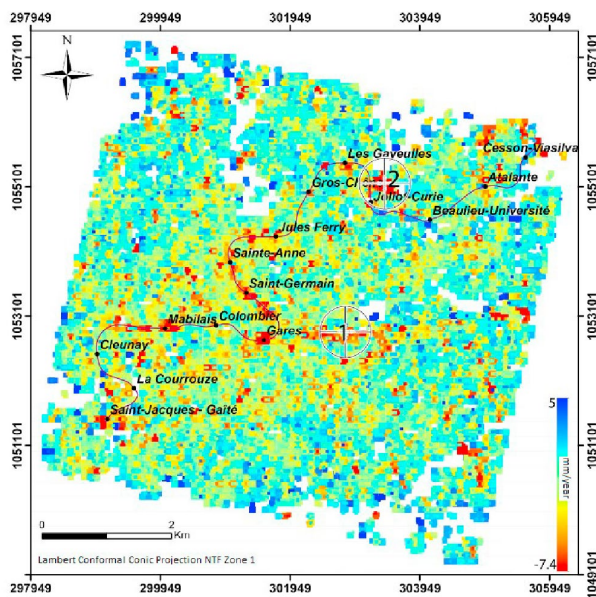
Google pakub vabavaralist rakendust Google Earth Pro, mis võimaldab digitaalse kõrgusmudeli analüüsi võimekust ühes distantside (sh kõrgus) ning mahtude väljavõtetega (El-Ashmawy, 2016). Antud analüüsi täpsust on võrreldud terrestriliste mõõtmistega ning keskmiseks ruutveaks kõrguslikus tähenduses (erinevas piirkonnas) on saadud 1.85 – 5.69 m. Juhul kui ladustamine ei oma suuri kõrguslike muute (lamedamad), on täpsus suurem. Näiteks maapinnale, mis omab kõrguslikku erinevust kuni 5 m, saab luua kontuurkaarte kontuurjoone intervalliga > 4 m. Google kasutab kõrgusliku info jagamiseks NASA Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) andmeid. Lähtuvalt iga-aastastest missioonidest, saab läbi viia ajaloolisi analüüse, mille näiteks vaadeldakse taaskasutatava asfaltfreespuru ladustamisplatse (Ashtiani *et al.*, 2019). Taaskasutatavuse protsent antud materjalile on USAs ca 20% uue asfaldi koostisest, mistõttu lihtne meetodika leidmaks kindlas asukohas ladustatavaid jääkmahtusid, aitab optimeerida materjali taaskasutust. Kuna pindala mõõtmine digitaalsetelt piltidel on üsna elementaarne, siis peamine vea tekkimise ja seega ka ebatäpsuse koht on kõrguse hinnang. Kasutades ajaloolist hinnangut saab laiemalt vaadelda ka materjali taaskasutatavuse dünaamikat ajas.

### 1.1.2 Ehitustegevuste monitoorimine

Suuremamahulisi maapinna liikumise kiiruseid saab väga täpselt arvutada satelliidipiltide aegreast läbi PSInsar (ingl *permanent scatter in synthetic aperture radar interferometry*) meetodi. Maapealsete kontrollmõõtmiste tulemusena on saadud keskmiseks vertikaalse liikumise tuvastamise täpsuseks 0.75 mm (Voormansik, 2013). Antud meetodit on rakendatud nii hoonete (Voormansik, 2013), sildade (Varik, 2017) kui tunneli ehituse monitooringute juures (Nahli *et al.*, 2018). Näiteks, Nahli *et al.* (2018) kasutas Sentinel-1 andmeid, et monitoorida tunneli ehitusega kaasnevat maapinna liikumist, mille käigus tunneli ehitamine võib põhjustada nii horisontaalset kui vertikaalset liikumist mõne millimeetri ulatuses. Antud meetodit saab ennekõike kasutada pikemaajaliste uuringute juures, milles maapinna info pole



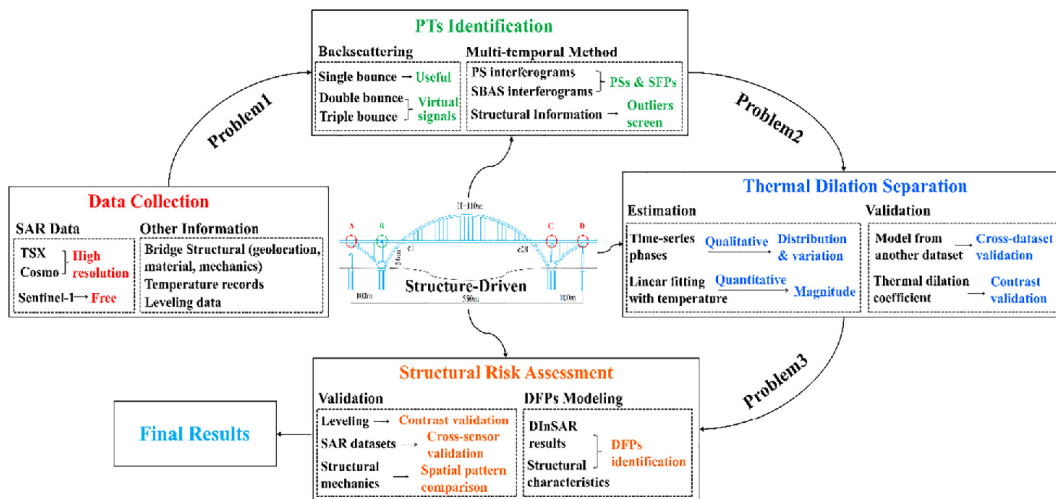
kättesaadav (joonis 1.4). Tunneliehituse näites leidsid autorid, et vahetult tunnelikoridori peal olid maapinna liikumised suuremad ning seda tuleks kontrollida ning vastavusse viia maapinnal tehtud mõõdistustega, et oleks võimalik teha kindlamaid järeldusi.



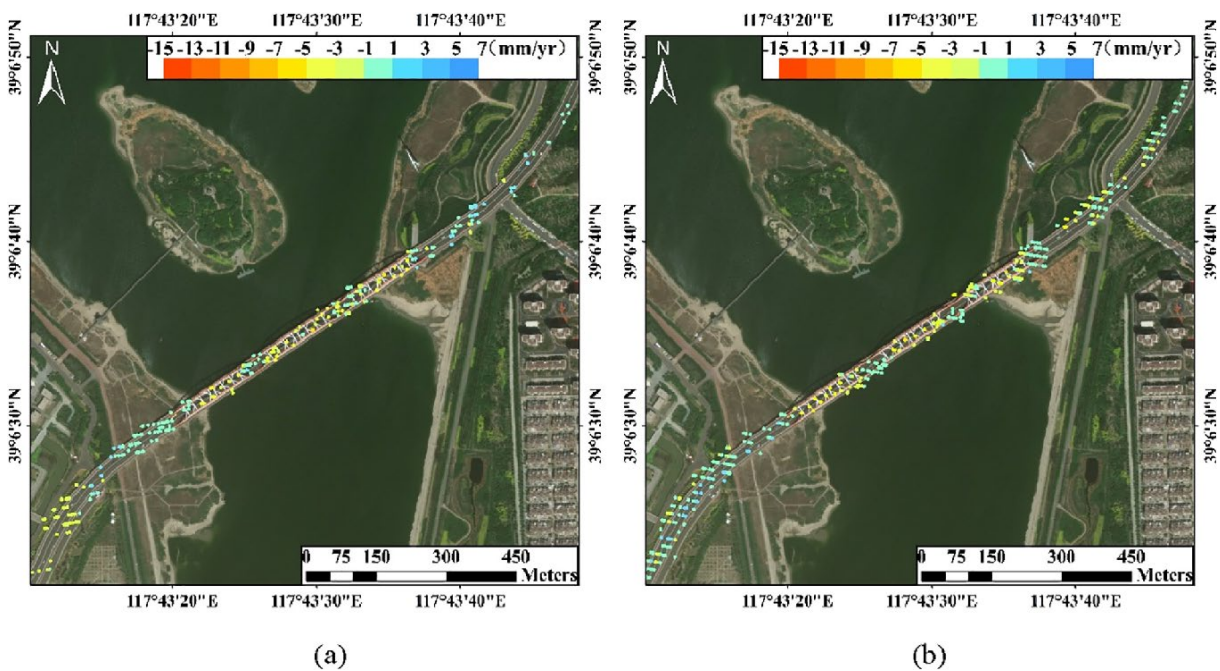
**Joonis 1.4.** Deformatsiooni kiirus (mm/aastas) vahetult metrooliini ümbruses (joonisel märgitud tumeda joonena) (allikas: Nahli et al., 2018)

### 1.1.3 Olemasolevate konstruktsioonide deformatsiooni monitooring

Olemasolevate konstruktsioonide konstruktsioonilist korrasolekut on võimalik hinnata satelliitseiret kasutades. Qin *et al.* (2018) kasutab DInSAR (ingl *differential synthetic aperture radar interferometry*) meetodit, et leida sildade juures nende väiksemaid deformatsioone suhteliselt väikeste kuludega. Nad kasutasid Cosmo-SkyMed ning Sentinel-1 satelliitpilte ning järgisid silla plaati 128-s erinevas punktis. Seejuures on oluline märkida, et sõltuvalt silla konstruktsioonist (nt kaarsillad), on need mõjutatud korrelatsiooni probleemidest (nt vibratsioon, mis tingitud keskkonnaga seotud faktoritest) ning punktide põhists analüüsi on oluliselt keerukam läbi viia kui näiteks mõne teist liiki ehitusobjekti juures. Lahenduseks oleks erinevate meetodite omavaheline kombineerimine (sealhulgas soojuspaisumisest tingitud erisustega arvestamine) saamaks terviklikumat analüüsi (joonis 1.5). Näidisdeformatsioonide kaart on esitatud joonisel 1.6.



Joonis 1.5. Üldine tehniline raamistik konstruktsiooni vaatluseks läbi mitme-aastase DInSAR meetodi (allikas: Qin et al., 2018)



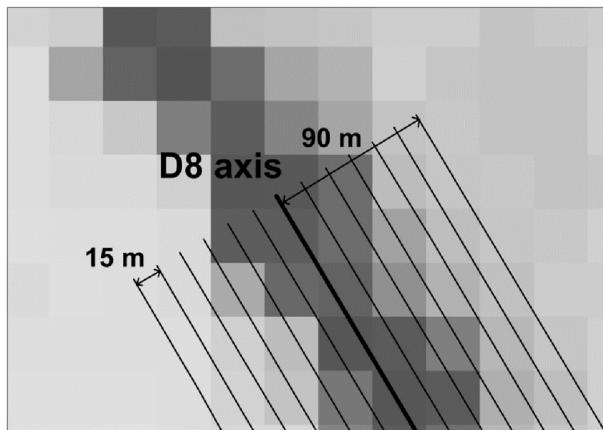
Joonis 1.6. Deformatsiooni kiiruste kaart kaarsilla näitel: (a) tõusva ning (b) langeva orbiidi Sentinel-1 andmestikult (allikas: Qin et al., 2018)

Lähtuvalt teostatud analüüsides on võimalik hinnata konstruktsioonidega seotud riske vastavalt hetkel kehtivatele tehnilistele nõuetele (võrrelduna projekteerimisest saadud deformatsioonide tolerantsidega).

#### 1.1.4 Maapinna (katendi) energiabilansi monitoorimine

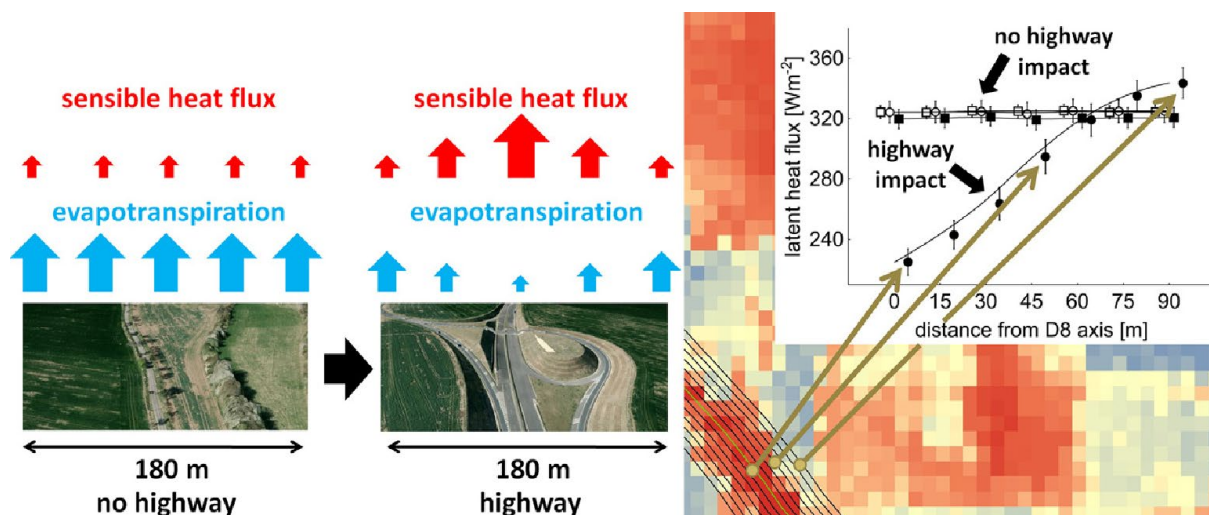
Sõidutee ehitus (kiirtee) võib oluliselt mõjutada maastikku ja selle struktuuri, mis omakorda võib mõjutada kohalikku kliimat ning energiabilansi ehitatava ala vahetus läheduses (Nedbal and Brom, 2018). Ennekõike on see seotud taimkatte eemaldamisega, kuna sellega vähendatakse päikesekiirgusest tingitud energia kasutust taimestiku poolt. Satelliitseire andmeid (Landsati multispektraalsed pildid ruumilise lahutusega 30 m nähtava valguse ja

lähisinfrastruktuurilainel ja 120 m termoinfrastruktuurilainel korral) ning ehitusala meteoroloogiliste mõõtmisandmete kombineerimisel saab leida erinevaid kasutusfunktsioonidega seotud parameetreid (taimkatte rohkus, pinna niiskustase, pinna temperatuur, peidetud soojusvoog, tajutav soojusvoog, maapinna soojusvoog) ning energiabilanss enne ja pärast ehitustegevuste lõppu (joonis 1.7, joonis 1.8).



Joonis 1.7. Iga parameetri jaoks arvatud keskmisi piksliväärtuseid esitavad jooned. Ruumiline lahutus on peamiseks täpsust piiravaks asjaoluks. (allikas: Nedbal and Brom, 2018)

Kokkuvõttena toodi välja (lähtuvalt Tšehhi Vabariigis teostatud uuringust), et maapinna energiabilanss muutub kiirtee telgjoonest 90 m ulatuses (risti sõiduteega) ning 75 m kiirtee servast. Suvise päeva kontekstis võib vee aurustumine väheneda kuni  $43.7 \text{ m}^3$  / kiirtee kilomeetri kohta. Väheneva jahutusefekti tõttu (keskmiselt  $29.7 \text{ MWh}$  võrra) võib sõidutee pinna temperatuur kasvada kuni  $7 \text{ }^\circ\text{C}$  (suvepäeval). Soovitusena tuuakse välja, et selle efekti minimeerimiseks oleks oluline tagada sõidutee vahetus ümbruse haljastuse olemasolu (põõsad, puud).

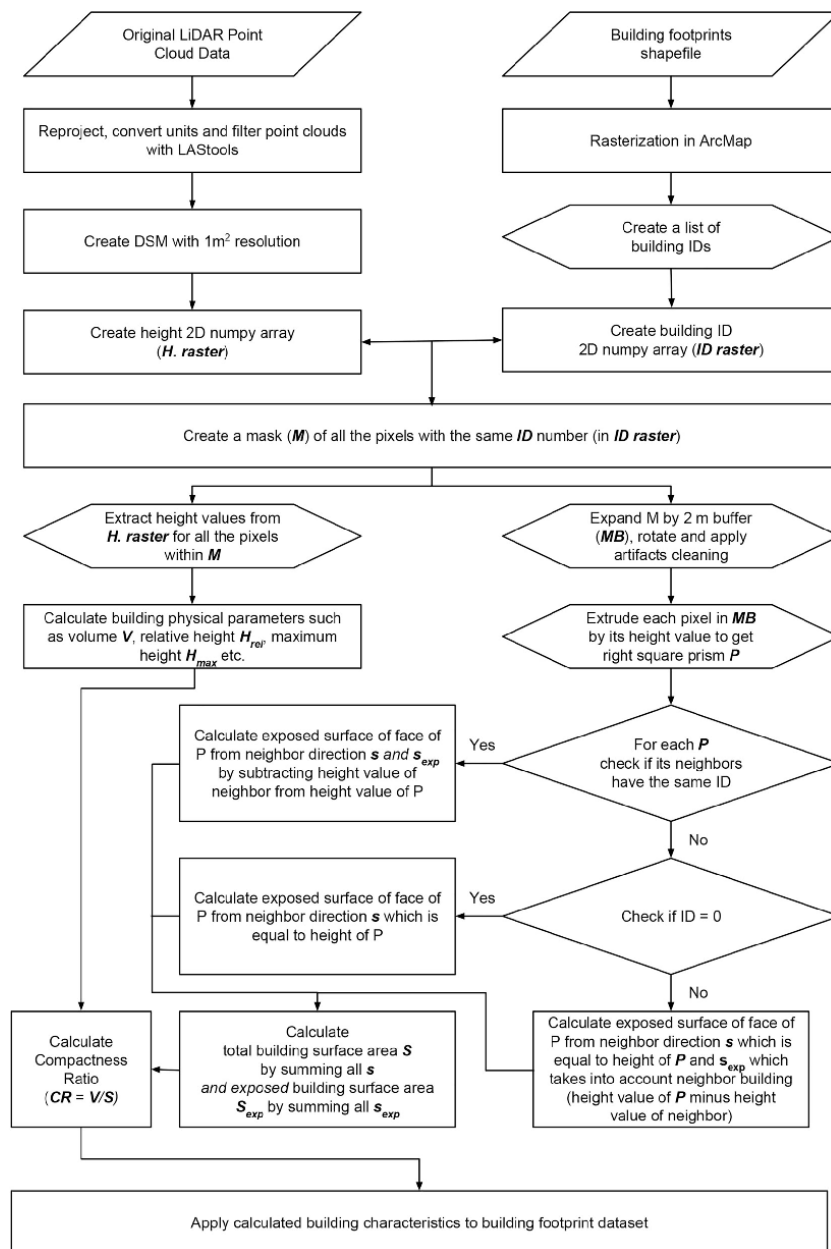


Joonis 1.8. Kiirtee mõju energiabilanssile (allikas: Nedbal and Brom, 2018)

## 1.2 Aeroskaneerimine

### 1.2.1 Linnamorfoloogia uuringud

Linnamorfoloogia püüab mõista suurlinnapiirkonna ruumilist struktuuri ja iseloomu läbi ehitiste, kruntide, sõiduteede jmt mustrite uuringute. Näiteks on Bonczak ja Kontokosta (2019) uurinud ehitiste kompaktsuse suhet ning nende poolt kaetavat maa-ala. Kasutatakse vokselitel (punktid) baseeruvat meetodit, et eraldada disainiga seotud parameetreid keerukamate linnaruumidest (valitud näidislinn - New York, hoonete arv – 1 miljon, maa-ala – 800 km<sup>2</sup>) (joonis 1.9). Disainiga seotud parameetriteks võivad olla hoone maht, kõrgus, ruumala, kaetav maa-ala ja kompaktsuse suhe.

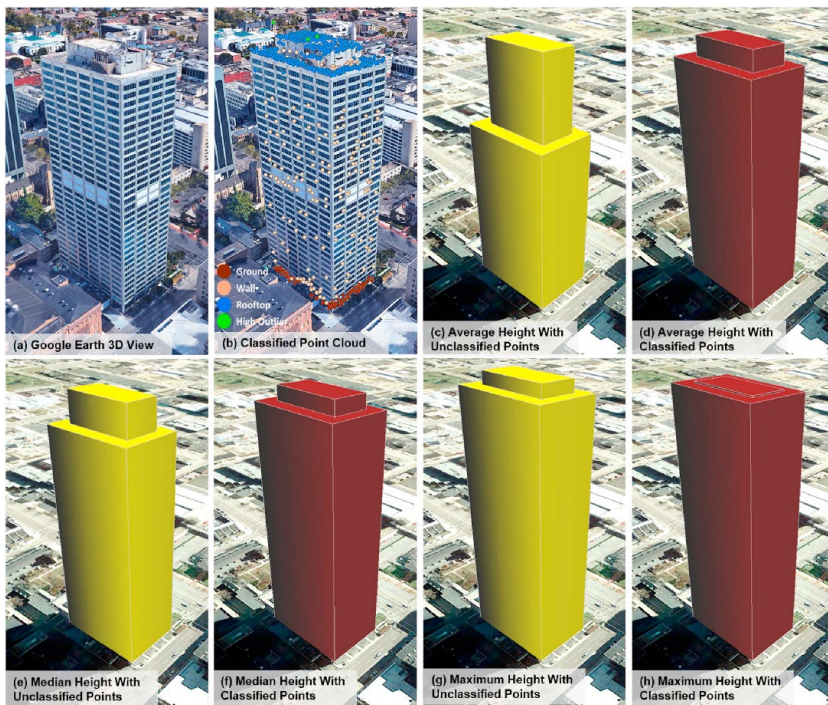


Joonis 1.9. Andmetötluse protsess (allikas: Bonczak and Kontokosta, 2019)

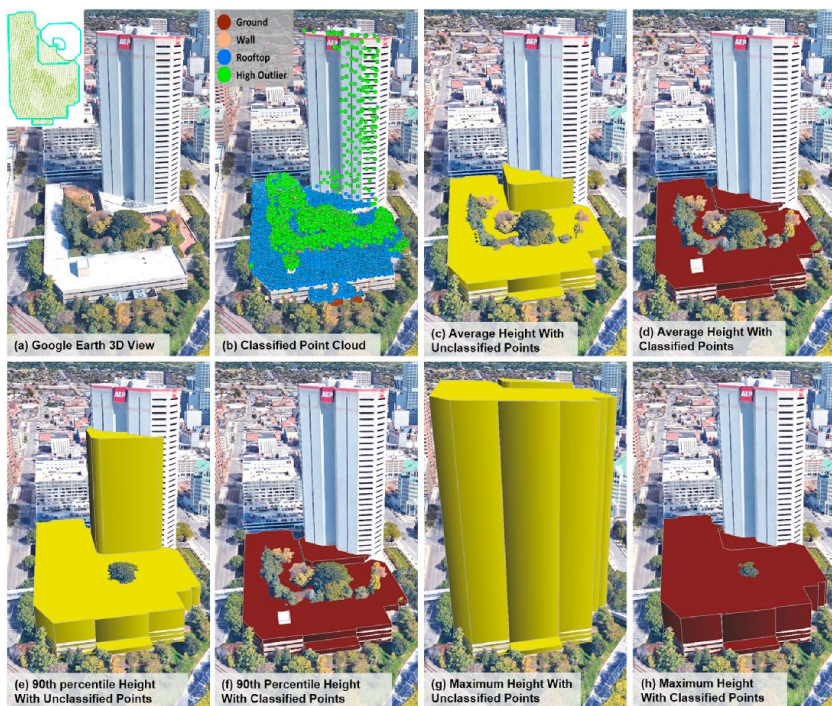


### 1.2.2 3D katusemodelite progressiivne täpsustamine

Kirjandusest leiab mitmeid artikleid LiDAR andmestiku ja ehitise perimeetri ühildamisest, et luua seeläbi automaatseid hoone 3D esitusi (Du *et al.*, 2017), kusjuures keskmiseks ruutveaks on tüüpiliselt 0.8 m. Kui sellele lisada punktipilve klassifitseerimine ning arvestada ka erinevate hoone tüüpidega, saab keskmise täpsuse viia kuni 96.5 % juurde (Park and Guldman, 2019). Klassifitseerimine omab eeliseid just kõrghoonete juures (97.3 %), tüüpilisemate kortermajade korral jääb täpsus 93 % juurde (joonis 1.10, joonis 1.11).

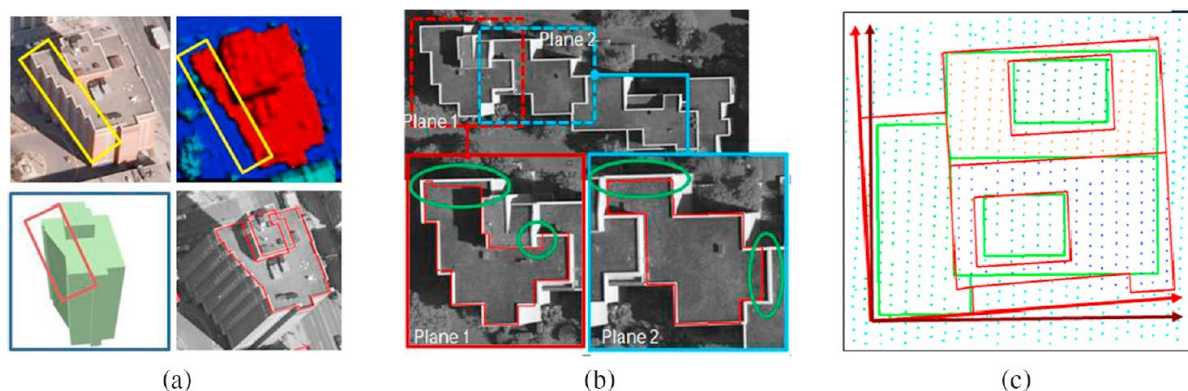


Joonis 1.10. Visualiseering: kõrghooned (allikas: Park and Guldman, 2019)



**Joonis 1.11.** Visualiseering: keskmise kõrgusega hooned (parkimismaja) ühes kõrghoonetega, et võrrelda punktipilve klassifitseerimise eeliseid (allikas: Park and Guldman, 2019)

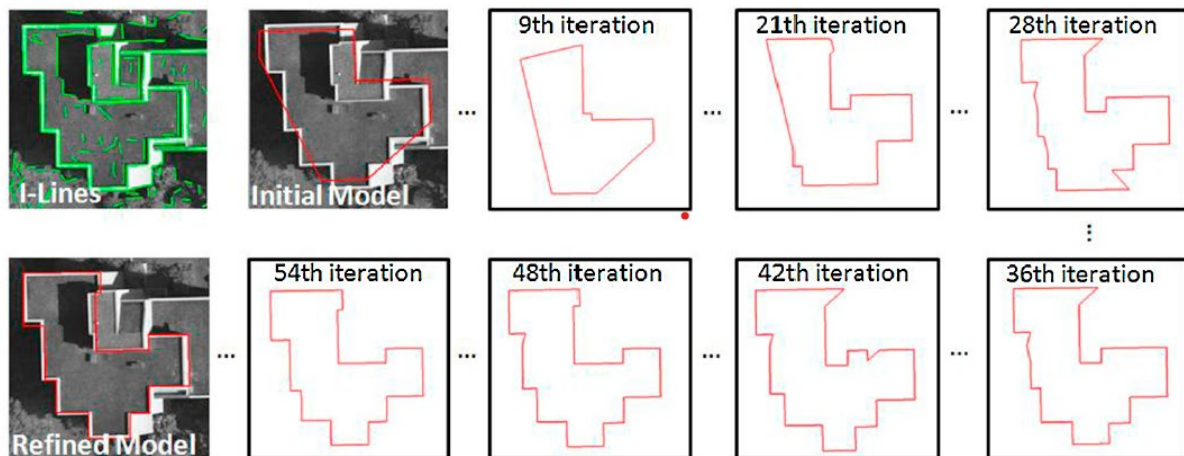
Linnaruum on pidevas muutumises. On ilmne, et 3D linnaruumi digitaalne kaksik peegeldab hetke, mil see loodi. Samas, dünaamiliste analüüside läbiviimiseks tuleb mudelit pidevalt uuendada. Kuna aeroskaneerimist (LiDAR) kasutatakse paljudes omavalitsustes saab kogutud infot kasutada progressiivseks 3D katusemodelite uuendamiseks (Jung and Sohn, 2019). Suuremate linnamudelite loomisel kasutatakse üldjuhul mõningaid lihtsustusi, ja seda just hoone kuju tähenduses. Kuna ehitisi aja jooksul renoveeritakse ja ehitatakse ümber, peab ka linnamudelit uuendama. Lisaks tuleb arvestada, et esmane linnamudel võis sisaldada vigu, mida tuleb samuti korrigeerida. Mõned enamlevinud modelleerimisest tulenevad vead lähtuvalt LiDAR andmetest on esitatud joonisel 1.12.



**Joonis 1.12.** Modelleerimisest tingitud vead LiDAR andmetest loodud katusemodelite juures: (a) kuju deformatsioon; (b) perimeetri nihe; ning (c) orientatsiooni viga (allikas: Jung and Sohn, 2019)

Vigade olemasolu mudelis ei võimalda seda kasutada analüüside läbiviimiseks. Uuemate LiDAR süsteemide pilte on võimalik kasutada eelnimetatud vigade vältimiseks. Selleks

eraldatakse pildilt joon- ning punktandmestik, viiakse see 3D ruumi ning võrreldakse olemasoleva 3D katuse mudeliga. Mistahes erisusi analüüsitakse läbi globaalse optimeerimise meetodi, et leida parim täpsustus (joonis 1.13).



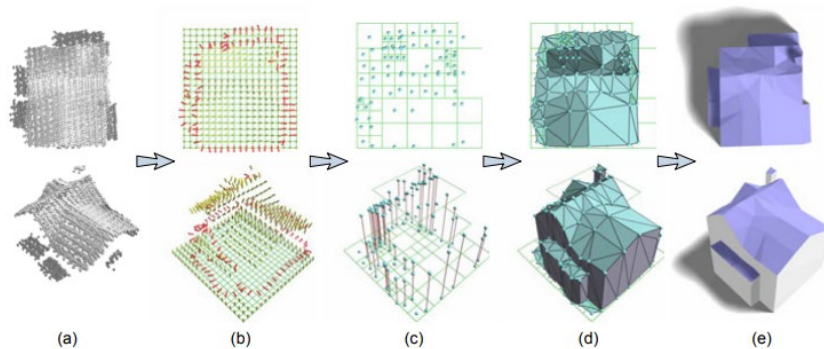
Joonis 1.13. Paranduste tulemus (üle-lihtsustatud juht) ning mudeli erinevad esitused läbi mitmete variatsioonide (allikas: Jung and Sohn, 2019)

Korrektse katuse tüübi määramiseks (näiteks lamekatuse, varjualune, viilkatuse, püramiidkatuse jt) pakub Lingfors *et al.* (2017) välja täiustatud meetodika nimetusega *co-classing* (kaas-klassifitseerimine), mida rakendati LiDAR toorandmetele ja mille tulemusel suudeti katuse tüübi korrektset määramist tõsta 78%-ilt 86%-ni (võrrelduna eelnevate meetoditega, mida sama andmestiku juures kasutati). Algne andmestiku lahutus oli 0.5-1 punkti/m<sup>2</sup> (madal resolutsioon). Huvitaval kombel, kui lahutust tõsteti (6-8 punkti/ m<sup>2</sup>), ei paranenud sellest katuse tüübi klassifitseerimise edukuse määr. See tagab välja pakutud meetodika kasutuse suurematel aladel. Tänu sellele meetodile on võimalik täpsemalt planeerida regionaalseid päikeseenergiasüsteeme.

### 1.2.3 Ehitiste fassaadide päikesekiirgus

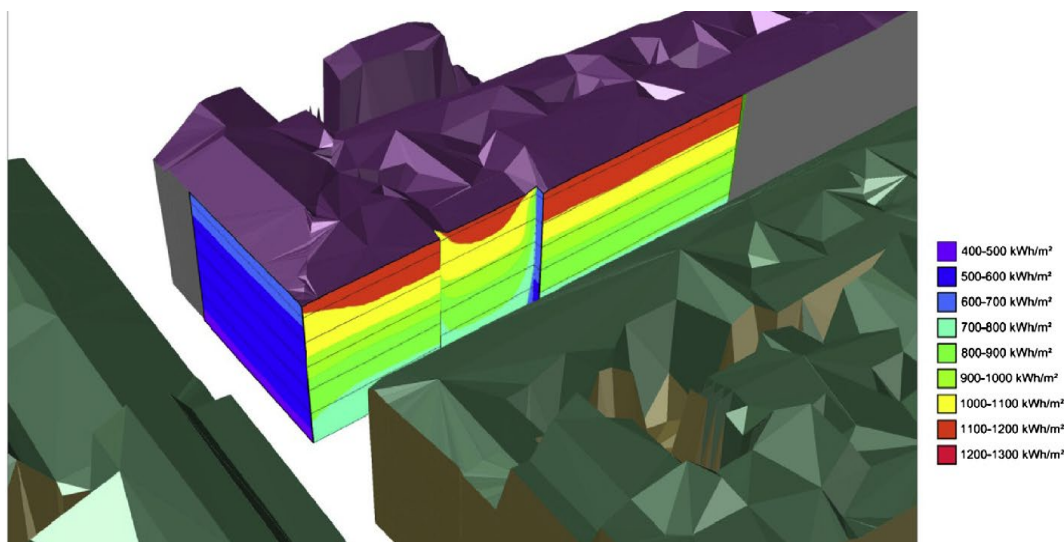
Ehitise fassaade saab kasutada päikesekiirguse kogumiseks, et seeläbi toota kohapealset energiat ja katta majapidamise energiavajadusest isegi kuni 100%. Aeroskaneerimisel saadud LiDAR andmestikku (0.5 punkti/m<sup>2</sup>) võib kaasata päikesekiirguse (kWh/m<sup>2</sup>) potentsiaali hindamiseks lähtuvalt kuupõhistest kiirgusandmetest (Martínez-Rubio *et al.*, 2016) (joonis 1.14).





**Joonis 1.14.** Mudeli loomise protsess, mida kasutati artiklis Martínez-Rubio et al. (2016) (allikas: Zhou and Neumann, 2010)

Kiirguse gradienti mõjutavateks peamisteks faktoriteks on: (a) ehitise enda vari; (b) varjud heidetuna kõrval olevatelt hoonetelt; ning kõige olulisem, (c) fassaadi orientatsioon (joonis 1.15).



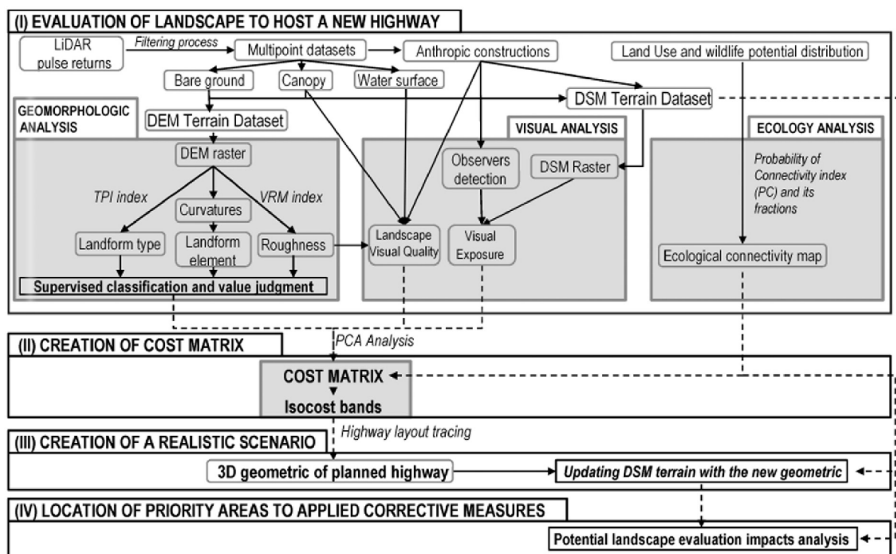
**Joonis 1.15.** Aastane summaarne päikesekiirgus ehitise fassaadil (adapted from Martínez-Rubio et al., 2016)

Kiirguskaartide olemasolu aitab läbi viia keskkonnasäästlike ning CO<sub>2</sub>-neutraalsete planeeringute analüüse. Nagu märgitud ka Martínez-Rubio *et al.* (2016) poolt, saab seda rakendada: (a) ehitiste energiaefektiivsuse analüüsimisel; (b) materjalide valimiseks lähtuvalt kiirguspunktide väärtustest fassaadi erinevates asukohtades; (c) päikesepaneelide tasuvuse hindamisel; (d) huvitavamate fassaadilahenduste kasutamisel (esteetikast lähtuvalt); (e) ehitiste renoveerimisel parendamaks energiaefektiivsust ning elektri tootmist; (f) degradeerunud linnapiirkondade uuendamisel ja taastamisel ning (g) uute, keskkonnasäästlike arenduste planeerimisel.

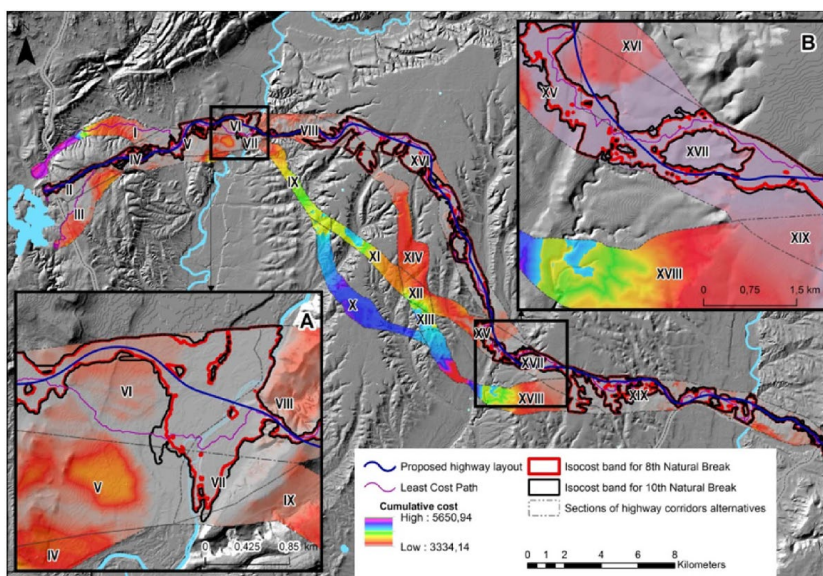
#### 1.2.4 Sõidutee koridori valikuga seotud analüüsid

Infrastruktuuri planeerimine peab arvestama erinevaid mõjutegureid nagu (a) finantsilised; (b) keskkonda puudutavad ning (c) sotsiaalsed. Selleks, et keskkonnamõju oleks uue sõidutee koridori planeerimisel minimaalne, on oluline kaaluda maastiku ökoloogilist killustatust ja

visuaalset mõju. Seetõttu tuleks leida väiksema mõjuga alternatiivid, mida omakorda on võrreldud teiste faktoritega nagu kaevemahtude minimeerimine. Optimaalset maapinna tuvastamist läbi LiDAR andmestiku on vaadeldud Loro *et al.* (2017) poolt. Samakulujoone (ingl *isocost*) meetodi abil saab planeerida ning võrrelda erinevaid sõidutee koridore (joonis 1.16, joonis 1.17). LiDAR andmeid kasutati digitaalse maapinna kõrgusmudeli loomiseks. Samakulujoone meetod pakub realistlikumat hinnangut kui vähima maksumuse rajal (ingl *least-cost path*) baseeruv analüüs, kuna arvesse võetakse samamaksumuse jooned ning sõidutee laius, mis omakorda võimaldab vältida pudelikaelade tekitamist. LiDAR andmestikku saab kasutada ökoloogiliste aspektide uurimisel, tuues välja nende mõjualad teemakaartidena.



Joonis 1.16. Ühe sõidutee rajamise mõju analüüsi raamistik, mis kaasab geomorfoloogilist, nähtavuse ja ökoloogilist analüüsi, ning nende omavahelisi kombinatsioone ning lõpphinnangut (allikas: Loro, et al., 2017)



Joonis 1.17. Samakulujoonte kaart erinevatele sõidutee koridori alternatiividele ühes minimaalse nõutava laiusega (30 m) (allikas: Loro, et al., 2017)

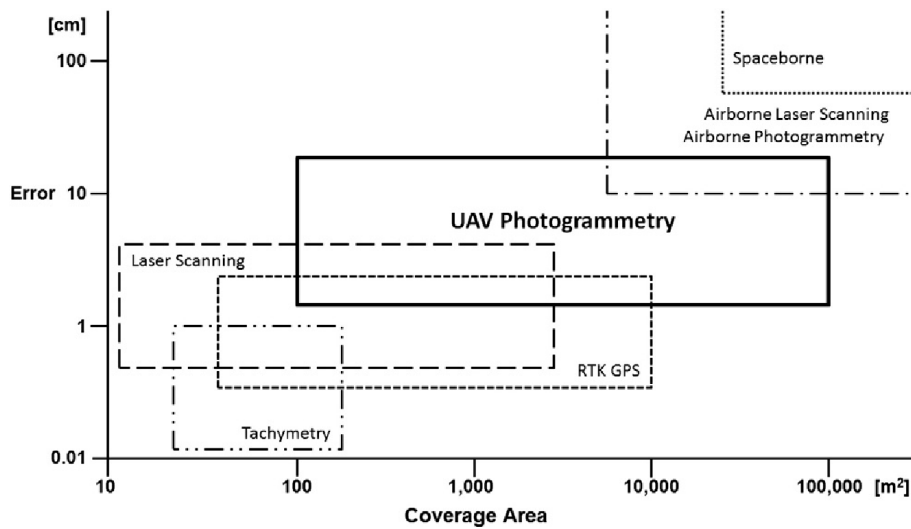
### 1.3 Drooniseire

Drooniseire on ennekõike alguse saanud militaarvaldkonnast aga seda on kasutatud ka planetaarsete uuringute ja päästeoperatsioonide läbiviimisel. McKinsey & Company (2017) poolt teostatud uuring tõi välja, et aastal 2016 toimus esimene suur hüpe kommertskasutuseks mõeldud droonide rakendustes. Täpsemalt 31 miljardilt USD-lt 46 miljardi USD peale. Droonide kasutuse kasvulavana nähakse 2026. a perspektiivis just ehitussektorit (Autodesk, 2018). Droone võib liigitada mitmeti, selle kohta on avaldatud erinevaid artikleid, näiteks Abdelkefi (2017). Droonides nähakse ühte jõulisemat tehnoloogilist arengut just ehitustegevustega seotud andmete kogumisel, monitoorimisel ning analüüsil. Kuna andmehõive tulemiks võib olla pilt, video või 3D mudel, saab seda väga lihtsalt siduda ülejäänud projektdokumentatsiooniga ja mängib seeläbi olulist rolli ehitusinfo modelleerimisega seotud teemades. Kirjandusest võib leida mitmeid artikleid, mis käsitlevad droonide kasutust ehitussektoris laiemalt (Dupont *et al.*, 2017; Tatum and Liu, 2017; Li and Liu, 2018). Drooninduse seos ehitusinfo modelleerimisega on kokku võetud tabelis 1.5.

**Tabel 1.5.** Soovituslik droonidel baseeruva ehitusinfo modelleerimise tööprotsess (allikas: Dupont *et al.*, 2017)

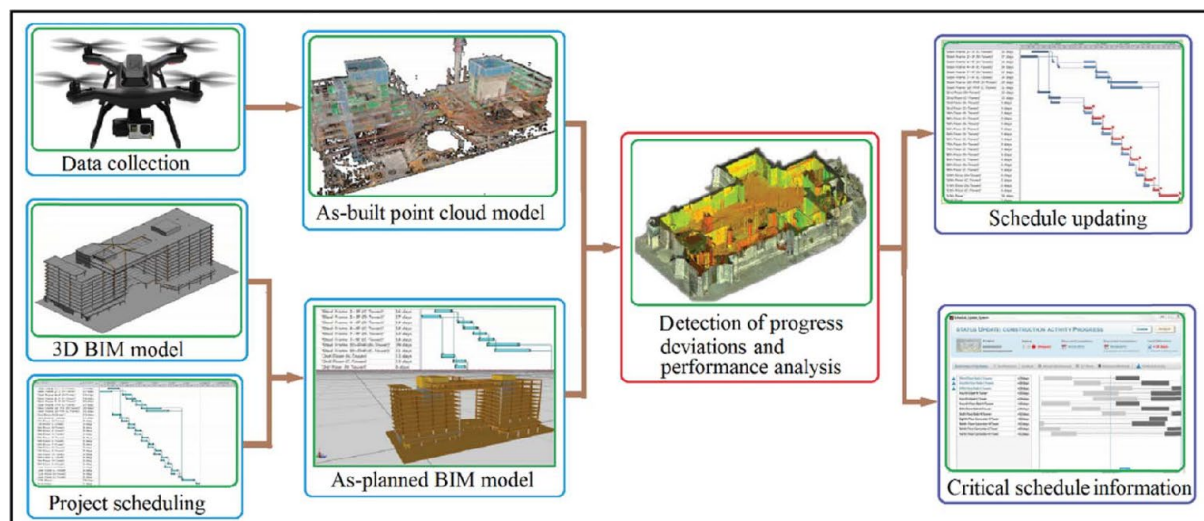
Tegevus	Ehitusplatsi mõõdistus	Tegevuse monitooring	Varustuse ja materjalide jälgimine	Ehitustegevus	Ehitise korrashoid
Kasutaja vajadus	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Täpse ning sobiliku projektlahendi loomine, et vähendada lisakulu</li> <li>· Projekti kommunikatsioon eelpakkumise ajal</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Ajaplaanist kinni pidamine</li> <li>· Tegevuste täpne, ajalooline logi võimalike nõuete tekkimisel</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Ressursside optimaalsem kasutus</li> <li>· Inventuuri kiirem läbi viimine</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Ehita kiiremini ning odavamalt, tagades töötajate ohutus</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Olemasolevate ehitiste monitoorimine</li> </ul>
Olemasolevad lahendused	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Kvalitatiivne, visuaalne jälgimine (fotod)</li> <li>· Manuaalne kõrguse mõõtmise (teodoliit)</li> <li>·</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Ehitusplatsi kaardistused (mõõdistused, joonised, fotod)</li> <li>· Gantti diagrammid</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Manuaalne logimine (ribakoodid)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Mõned robotid on ehitusplatsidel kasutusel</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Kasutatakse visuaalse hinnangu saamiseks kõrgustest</li> </ul>
Droonide lisaväärtus	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Laiapõhjalised numbrilised mudelid</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Autonoomne &amp; regulaarne 3D andmete kogumine</li> <li>· Teemakaartide loomine (3D mahud &amp; fotod)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Autonoomse inventuuriga seotud tegevused</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· N-ö linnuvaatlus teistele robotitele</li> <li>· Ligipääs kohtadesse, kuhu inimesel on pea võimatu minna</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Kiire ja lihtne ligipääs enamikesse kohtadesse</li> </ul>
Olemasolev võimekus	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Autonoomne väline vaatlus (GPS)</li> <li>· Tarkvaralised lahendused mõõtmete võtmiseks (maht, pindala)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 3D kaardistus lasertehnoloogial</li> <li>· Ehitise sisesed lennud piloteerimises</li> <li>· Olemasolevad lahendused pakuvad tuge andmete, aja-graafikute ning 3D projekt-mudelite vahel</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Autonoomne navigeerimine RFID koodi järgimisega ja logimisega</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Autonoomne buldooser, mis kasutab drooni andmeid</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Video ülesvõte ning 3D rekonstruktsioon</li> <li>· Autonoomne lennuvõimekus väliskeskonnas</li> </ul>
Edasised arengud	<ul style="list-style-type: none"> <li>· GPS-i vajaduse vähendamine ehitiste sees toimuvatel uuringutel</li> <li>· Raamistiku koostamine 3D andmete ja BIM-i põhiste rakenduste vahel</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Autonoomsete, ehitiste sees läbi viidavate lendude usaldusväärsuse parendamine</li> <li>· Arvutusmahukate realistlike tiheduskaartide loomine otse drooniplatvormil</li> <li>· Automaatse liidese loomine linkimaks kogutud andmed, ajagraafik ning mudelid.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Luua tõmbemeetodil töötav väärtusahel läbi RFID tähiste</li> <li>· Olemasolevate integratsioonide parendamine, milles seireandmeid kaasatakse otsuste vastu võtmiseks, tegevusteks</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Vajalik leida uusi kasutusjuhte</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Autonoomse lennuvõimekuse parendamine, tagamaks parem ligipääs keerulistesse aladesse</li> </ul>

Potentsiaalne droonide rakenduste ulatus mõõdistustöödel on kokku võetud joonisel 1.18 ning tööprotsess, mis ühendab ehitusinfo mudeli ning punktipilve, joonisel 1.19.



Joonis 1.18. Potentsiaalne droonide rakenduste ulatus mõõdistustöödel võrrelduna teiste kaugseire tehnoloogiatega (allikas: Siebert ja Teizer, 2014)

Iga droonitehnoloogia omab teatud eeliseid (hind, täpsus, kasutusjuht), seetõttu on vaja alati lähtuda konkreetsetest vajadustest. Droonide tähenduses on kõige rohkem käsitletud leidnud fotogrammeetriaga seotud alateemad (Köök, 2018). Droonide täpsus on ennekõike paranenud RTK (ingl *real time kinematic*) droonide ilmumisega ja hoogustunud nende kasutuslihtsuse tõttu. RTK droonitehnoloogiate arengut on täpsemalt käsitletud Reimann (2019).



Joonis 1.19. Monitoorimise protsess läbi punktipilve ning BIM mudeli võrdluse (allikas: Li and Liu, 2018)

Drooni lennutamine eeldab esmalt missiooni simuleerimist. Droonisimulaatoreid (missiooni planeerimiseks) on üksjagu ja nende kohta leiab võrdluse artiklist Mairaj *et al.* (2019).



Droonide peamine eelis on nende kasutusvõimalus keerukates ja ohtlikes situatsioonides ning raskesti ligipääsetavates asukohtades. Neid saab kasutada andmehõiveks aga ka jooksvate uuringute läbiviimiseks. Jooksvate uuringute käigus saab teha nii reaaliajase ülekandeid, kus siis operaator analüüsib nähtut või kaasata tehisintellekti, milles andmete analüüs toimub lähtuvalt teatud kriteeriumitele ja seeläbi automatiseerida teavitust ohtlikest olukordadest. Pildistamine ja otseülekannete tegemine on vaid üks võimalus. Kogutud suurandmete analüüsiks saab juba täna kasutada tehisintellekti (Allam and Dhunny, 2019).

Üheks peamiseks piirajaks drooniandmete kasutusele on nende ebatäpsus geograafilise koordinaadi tähenduses. Kirjandusest võib leida mitmeid meetodeid, mida saab kasutada geomeetrilise täpsuse defineerimisel. Näiteks võrdleb Padró *et al.* (2019) nelja erinevat meetodit: (a) drooni platvormil olev GNSS navigeerimissüsteem; (b) ühe sagedusala PPK (ingl *post-processed kinematic*) süsteem koos korrektsiooniga referentsjaamalt, mis asub mõõdistusalast 4 km kaugusel; (c) kahe-sageduslik PPK süsteem koos korrektsiooniga mõõdistusalal paiknevalt baasjaamalt; ning (d) maapinna kontrollpunktid (ingl *ground control points* ehk GCP) ning sõltumatud kontrollpunktid. Uuringus leiti, et GCP meetod oli kõige täpsem. Samas on selle meetodi puuduseks selle kohmakas kasutamine, eeldab maapealset tuge ning on ajamahukas. GCP meetodit võrreldaks üha enam RTK-GPS droonidega, mis elimineerib GCP kasutamise vajaduse ning seeläbi saab ehitussektori kasutusvõimalusi veelgi laiendada.

### 1.3.1 Mõõdistamine

Droonidel baseeruv geodeetiline mõõdistus on kõige levinum kasutusjuht ehitusega seotud projektides. Mõõdistusega saab koguda kaardistusandmeid kolmemõõtmelisena ja selle baasil luua tekstuuridega 3D mudeleid ning digitaalseid maapinnamudeleid. Ehkki tänastel kaameratel on väga kõrge lahutusega piltide tegemise võimekus, tuleb arvestada ka teiste asjaoludega, sealhulgas võimalike vigadega, mis tulenevad geosidumisest (Congress *et al.*, 2018). Droone kasutatakse väga palju just 3D rekonstruktsioonide loomiseks. Nende abil on võimalik hinnata pinnase eemaldamise ning täitmise mahtusid. Langhammer *et al.* (2018) võrdles droonide fotogrammeetriast saadavat täpsust LiDAR andmetega mahajäetud reservuaari mahu määramisel. Kokkuvõttena toodi, et kõige probleemsem asjaolu droonimõõdistuste juures on taimestikuga arvestamine ja võimetus näha taimkatte alla. Samas leiti, et täpsusklass on sellest hoolimata väga hea (üldise ruumala leidmisel). Erenoglu *et al.* (2017) võrdleb kultuuripärandiga seotud maa-ala rekonstrueerimist läbi kolme erineva kaamera (digitaalne, soojuslik, multispektraalne). Täpsusklassid olid vastavalt 2-3 cm digitaalkaamera, 10-15 cm soojuskaamera ning 5-7 cm multispektraalkaamera kasutamisel. Näidati, et multispektraalkaamera eeliseks on materjalide klassifitseerimise võimekus.

Kirjandusest võib leida mitmeid kasutusjuhte, kus peamine rõhk on olnud odavamate droonide kasutamisel väga laialdase haljastuse tingimustes (Akturk and Altunel, 2019). Keskmine ruutviga on sellistel puhkudel jäänud 0.57 m juurde. Seeläbi saab välja tuua ka peamised piiravad asjaolud droonide kasutamises. Lõpp-järeldusena toodi välja, et RTK droonide kasutamine koos maapinna kontrollpunktidega võimaldab keskmist ruutviga

vähendada 6 cm võrra, mida ei ole palju, kuid on suuremat täpsust nõudvate projektide juures siiski märkimisväärne.

### 1.3.2 Mõõdistamine päästeoperatsioonide planeerimiseks

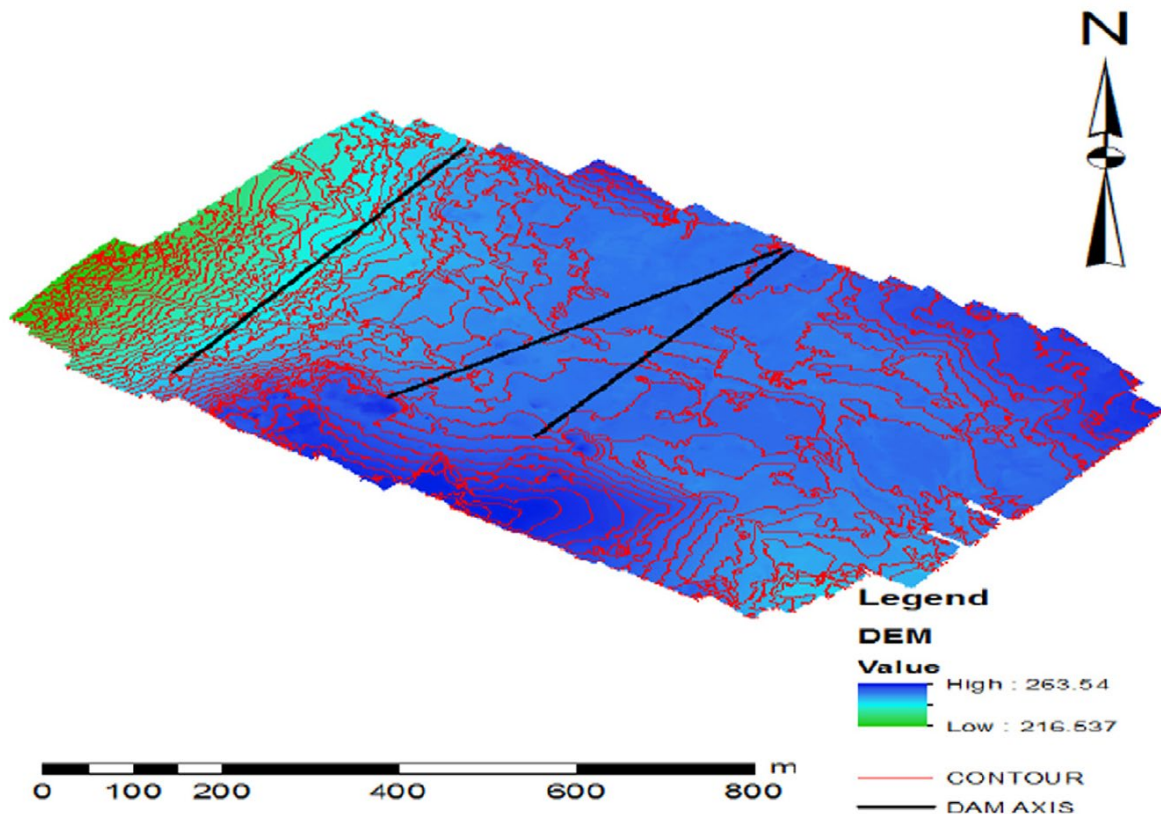
Rekonstrueerimist võib vaadelda kriisijuhtimise alamtegevusena, milles on väga olulise tähtsusega kaardistada olemasolev olukord 3D mudelina, mis on piisavalt detaile, et selle abil oleks võimalik planeerida päästeoperatsioone. Mõõdistuse kiirus võib sõltuda väga paljudest faktoritest, nagu näiteks: (a) ala suurus (laius, pikkus, kõrgus, perimeeter); (b) droonide suutlikkust esitavad parameetrid nagu liikumis- ja manööverdamiskiirus; (c) kasutatava kaamera parameetrid (vaateulatus, pildistamise intervall) ning (d) 3D rekonstrueerimisele seatavad lisanõuded (piltide ülekatte tingimus) (Zheng *et al.*, 2018). Näidisenä teostati staadioni ülesmõõdistus, milles arvestati mitmete erinevate parameetritega (pikkus: 130 m; laius: 116 m, perimeeter: 473 m, kõrgus: 30 m), mis on kokku võetud tabelis 1.6.

**Tabel 1.6.** Andmete kogumise kiiruse võrdlus erinevate meetoditega (allikas: Zheng *et al.*, 2018)

Andmehõive meetod	Piltide arv	Andmehõive kestus	Rekonstruktsioonile kuluv aeg	Rekonstruktsiooni tulem
Manuaalne opereerimine	1068	80 min (ühe drooniga)	~ 5 h	Referents
Ühe drooni kasutamine	515	42 min (ühe drooniga)	~ 1 h	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Keskmine viga &lt; 20 cm</li> <li>• Standardhälve &lt; 11 cm</li> </ul>
Mitme drooni kasutamine	515	15 min ( 3 drooni)	~ 1 h	

### 1.3.3 Lähteandmete mudel disaini alternatiivide analüüsiks

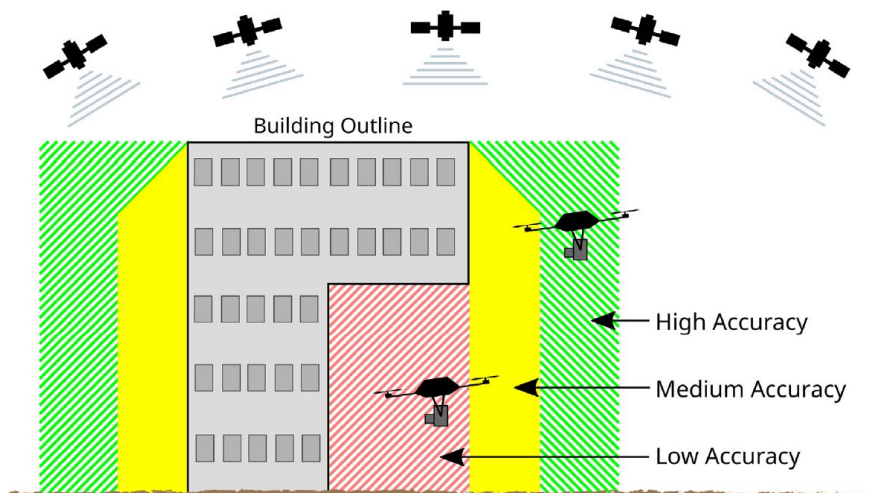
Enne mistahes suuremahulist projekteerimistöö algust tuleb võrrelda omavahel mitmeid erinevaid võimalikke alternatiivseid lahendeid (ka mahtude tähenduses). Siia alla kuuluvad sõidutee- ja raudtee koridoride võimalike variantide analüüs ühes sildade või viaduktide paiknemisega (Ajayi *et al.*, 2018). Droone võib rakendada väga suurte maa-alade mõõdistamisel ning just seetõttu on neid väga hea kasutada projekti alternatiivsete lahenduste omavaheliseks võrdluseks (joonis 1.20).



Joonis 1.20. Võimalikud tammide asukohad (joontena) lähtuvalt maapinna kontuurjoontest digitaalse kõrgusmudeli järgi (allikas: Ajayi et al., 2018)

### 1.3.4 Automatiseeritud kontrolltegevused

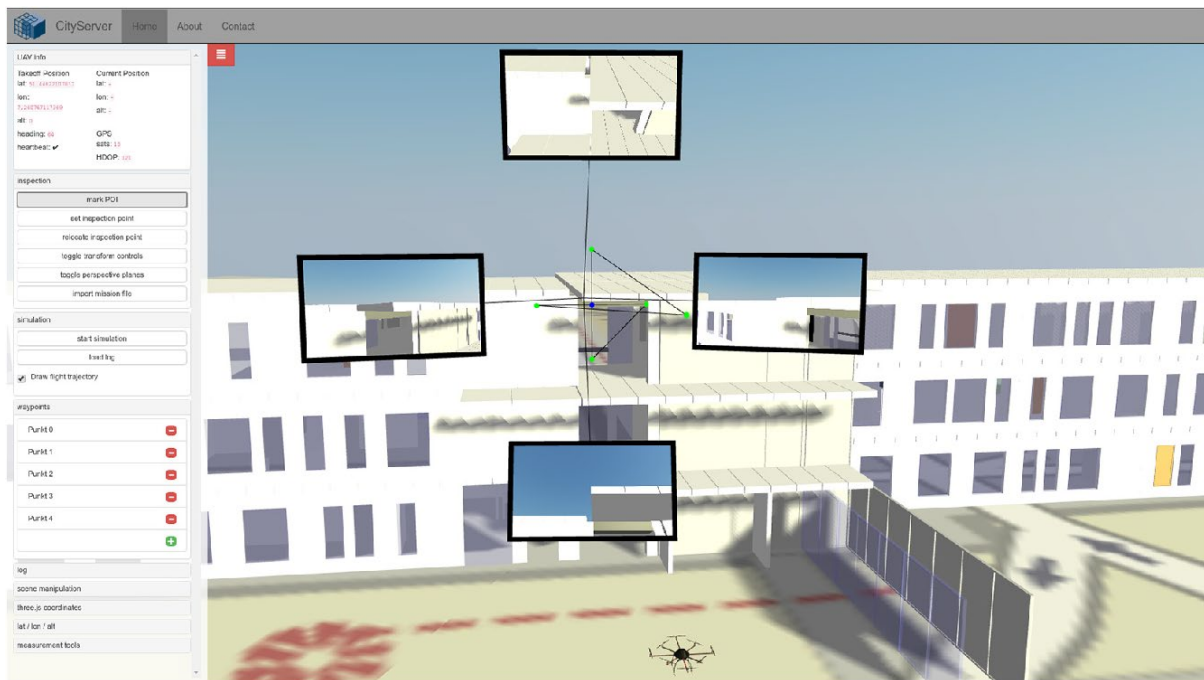
Droone on võimalik rakendada automatiseeritud kontrolliks, milles ehitusinfo mudelid on kaasatud optimaalsete 3D liikumistrajektoride koostamiseks (Freimuth and König, 2018). Eelnev missiooni planeerimine, milles kasutatakse teostatud ehitusprojekti digitaalset kaksikut ehk 3D mudelit, aitab võimalikke kokkupõrke-olukordi minimeerida. Oluliseks saab GPS signaali kvaliteet olukorras, kus droon satub mõõdistuse tegemisel kehva levi piirkonda (joonis 1.21).



Joonis 1.21. Eeldatav positsioneerimise täpsus ehitiste läheduses (allikas: Freimuth ja König, 2018)



Mudelipõhist drooni missioonide planeerimist saab rakendada ka olukorras, kus on oluline tagada õiged monitooringu vaatenurgad (joonis 1.22). See eeldab ehitusinfo mudel teisendamist õigetes geodeetilistes koordinaatidesse.

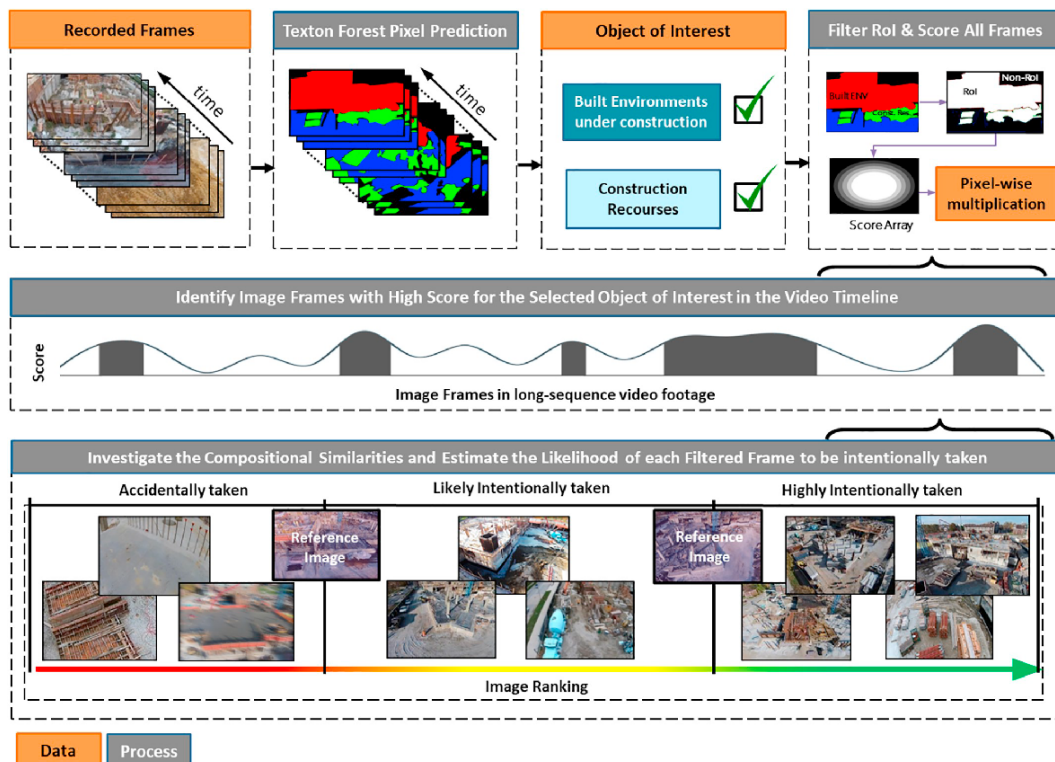


Joonis 1.22. Eelvaadete pildid, mida droon peab monitoorimise käigus üles võtma (allikas: Freimuth and König, 2018)

Lisaks vaatenurkade eelnevale läbi mängimisele ning leviaukude vältimisele keerukamate ehitise korral, saab kasutada droonidele paigutatavaid takistuste vältimise süsteeme või täpsemaid positsioneerimise tehnoloogiaid (*simultaneous localization and mapping* ehk SLAM, GPS RTK).

### 1.3.5 Semantiline segmenteerimine

Droonide abil on väga lihtne koguda palju andmeid, kuid nende tegelik kasu ilmneb alles andmete tõlgendamisel ja analüüsil. Semantilist segmenteerimist kasutatakse pildi iga piksli klassifitseerimisel. Ühe ehitusprojekti kaardistus võib andmehõive tulemusena toota mitusada gigabaiti andmestikku. Selleks, et kogutud andmed oleksid kasutatavamad ning neis oleks võimalik teostada otsingut, saab kasutada visuaalseid filtreid, et eristada pilte ja pildi osasid, mis sisaldavad endas just ehitusele omast sisu (Ham and Kamari, 2019). Semantilist segmenteerimist tuleb trennida mõne varasema pildiga, kus objektid on tuvastatud. Iga pildile saab anda teatud väärtuse, iseloomustamaks väärtusliku info osakaalu. Seeläbi saab pilte filtreerida, et jätta alles vaid olulise infoga pildid (joonis 1.23).



Joonis 1.23. Pildi filtreerimisprotsessi ülevaade, kus lähtematerjaliks on ehitusobjektilt kogutud pildimaterjal (allikas: Ham ja Kamari, 2019)

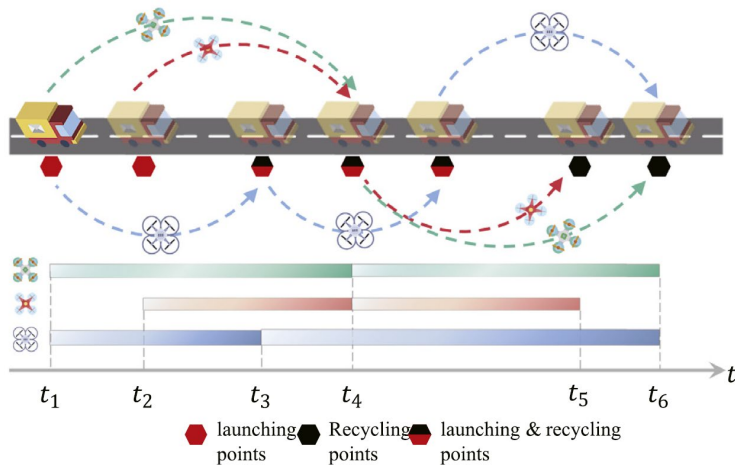
Antud meetodi peamiseks puuduseks on aga asjaolu, et ehituses saame rääkida väga paljudest erinevatest objektidest ja nende võimalikust tuvastamisest, mistõttu oluliseks saab kui suures mahus on seda võimalik automatiseerida.

### 1.3.6 Infrastruktuuri monitooring

Vaatlusel baseeruv infrastruktuuri monitooring on leidnud laiemat kasutust just viimastel aastatel (Spencer Jr. et al, 2019). Pildilise info kasutus võib olla keerukas, samas ka infoküllane (ruumiline, tekstuur, konteksti põhine). Seda saab väga lihtsalt koguda. Täiesti omaette küsimus on, kuidas sellest kõigest saada kasulikku informatsiooni.

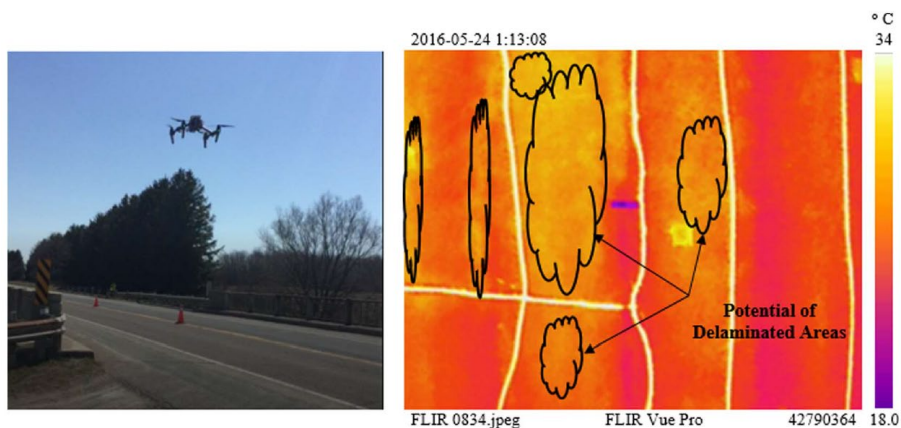
Droone saab kasutada sildade, elektriliinide, torustike ning suurte hoonete vaatlusel. Seeläbi välditakse riskantseid juhtumeid, kus ohtu võib sattuda inimelu või kaasnevad muud kulukad tagajärjed. Drooniseire algatus ei nõua suurt ettevalmistust, mistõttu saab seda pidada efektiivseks meetodiks võimaliku probleemi tuvastamiseks, kas siis jooksvalt seire käigus või läbi kogutud andmete hilisema analüüsi (Mohamed, et al. 2018). Üheks peamiseks piiranguks suurte infrastruktuuri objektide monitoorimisel on endiselt droonide lühike lennuaeg, mis ei luba kõiki andmeid ühe lennuga koguda (Erdelj et al., 2017). Monitooringu pidevust saab aga vaadelda mitmeti, näiteks, kuidas ja millal „vahetatakse“ drooni aku (laaditakse, märgitakse laadimisele kindlal ajahetkel, vahetatakse välja või asendatakse teise drooniga) ning kas see välja vahetamine toimub vahetult või ajalise nihkega. Laadida/asendada saab fikseeritud või mobiilse droonikeskuse abil, mis eeldab droonide juhtimiseks teatud algoritmilist lähenemist. Hu et al (2019) esitab mobiilset multi-drooni (ingl vehicle-assisted multi-UAV) kasutamise algoritmi, milles lahendatakse korraga nii drooni missioonide planeerimine kui nende ajaline

kasutus. Meetod võimaldab kaasata korraga mitut drooni, mis peale missiooni täitmist naasevad mobiilsele platvormile (erinevates asukohtades), võimaldades seeläbi hoida kokku monitooringule kuluvat aega nii droone kui mobiilse platvormi liikumist silmas pidades (joonis 1.24).



Joonis 1.24. Näide droonide ajalisest planeerimisest (allikas: Hu et al., 2019)

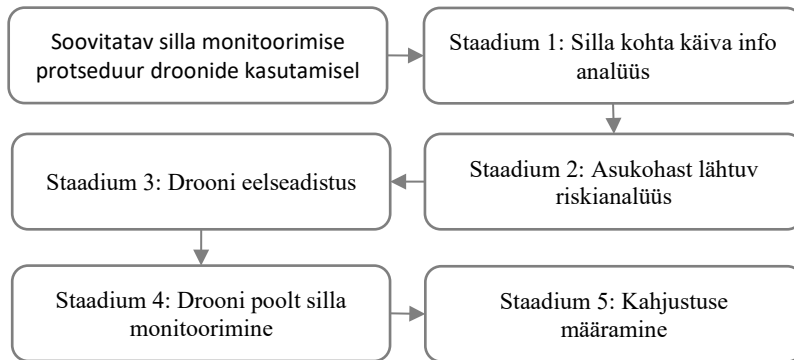
Droonide juures saab kasutada väga erinevaid kaamera tüüpe. Näiteks soojuskaamerat on kasutatud aluspinna vajumiste mõju uurimisel silla plaadile (Omar and Nehdi, 2017). Eeliseks on mittepurustav tehnoloogia, mis ei häiri liiklust ja ei ole füüsilist kokkupuudet mõõdetava objektiga. Seeläbi saab teha ülikiireid silla seisundi hinnanguid elukaareüleselt, mis võiks omakorda aidata tagada silla õigeaegse hoolduse ning selleks vajalikud finantsid tulevikus (joonis 1.25).



Joonis 1.25. Väljavõte drooniga tehtud silla monitooringust (vasakul), kus soojuskaamera andmete analüüsil saab eristada võimalikke aluspinna vajumise mõjusid silla plaadile (parem) (allikas: Omar and Nehdi, 2017)

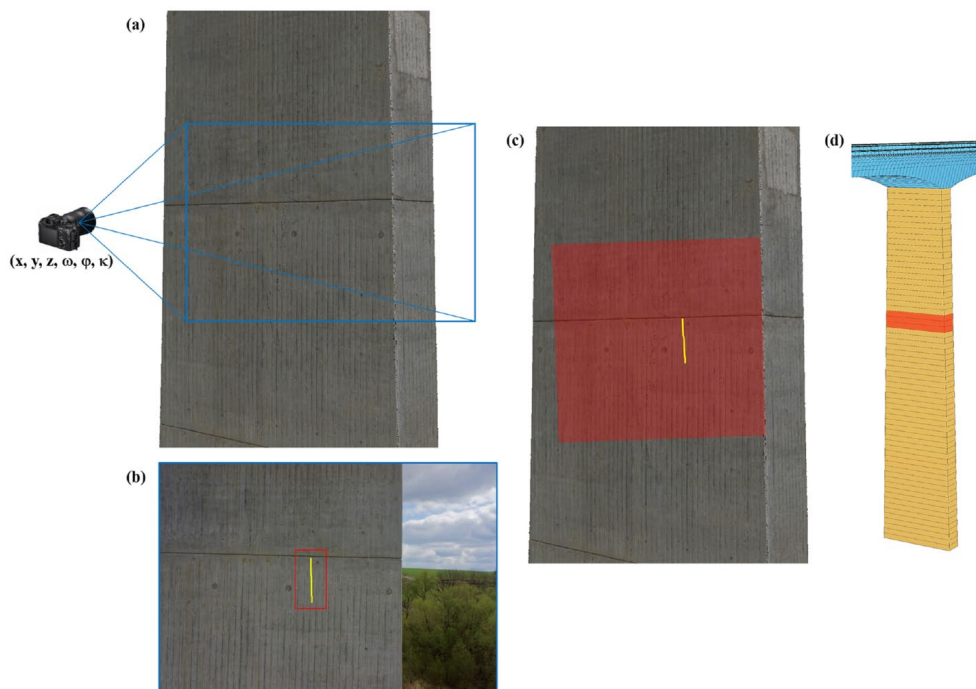
Multispektraalsensoreid saab ennekõike kasutada maakatte kaartide koostamisel. Ehitussektorit silmas pidades saab neid edukalt rakendada ehitusplatsi (sh kaevanduste restaureerimine) restaureerimise monitoorimisel (Padrò *et al.*, 2019).

Sildade monitooringu kohta võib leida veel mitmeid artikleid (Seo *et al.*, 2018; Morgenthal *et al.*, 2019). Näiteks pakuvad Seo *et al.* (2018) viie-astmelise, droonil baseeruva, silla monitoorimise meetodika, mida võrreldi n-ö tavapärase meetodikaga, mida transpordiamet oli seni kasutanud (joonis 1.26). Kokkuvõttes leiti, et droonide kasutamine võimaldab kulusid oluliselt vähendada.



Joonis 1.26. Viie-astmeline silla monitoorimise meetodika drooni abil (allikas: Seo *et al.*, 2018)

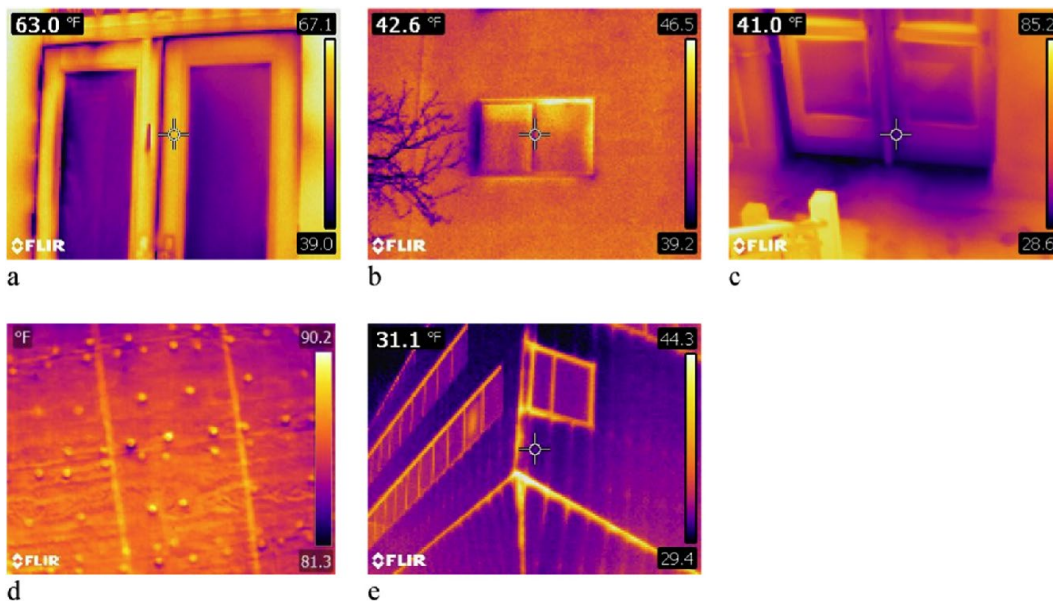
Morgenthal *et al.* (2019) tõid välja, et kõrg-lahutusega pildimaterjali saab kasutada koormuste mõju uurimiseks konstruktsiooni elementidele (joonis 1.27). Joonise 1.27 kohaselt on raamistik jagatud neljaks põhisammuks: (a) kaamera vaatepunkti valik; (b) ülesvõetud piltidelt anomaaliate tuvastamine; (c) punktide kindlaks tegemine pildil; (d) geosidumisega anomaalia asukoha ülekandmine lõplike elementide mudelile, mille kaudu saab teha konstruktsiooni kontrollarvutuse.



Joonis 1.27. Anomaalia arengu jälgimine (varasemalt leitud asukohtade järgi) ning pragude laiuse ning ulatuse (pikkuse) jälgimine (allikas: Morgenthal *et al.*, 2019)

### 1.3.7 Energiaaudit

Soojuskaod akendelt, pragudelt, korstendelt ning räästakastidest võivad ulatuda kuni 40%-ni kõigist eluhoonet puudutavatest energiakadudest. Infrapunakaamerat on kasutatud väga paljudes valdkondades (põllumajandus, kaevandus), kuid selle kasutusvõimalusi ehituses on mõnevõrra vähem uuritud ning ka alahinnatud. Entrop ja Vasenev (2017) pakuvad välja juhised ehitiste termograafilisteks uuringuteks. Näiteks tuleks termograafilist uuringut külmasildade kindlaks tegemiseks fassaadil teostada just enne päikesetõusu, et seeläbi vältida päikesekiirgusest tulenevaid efekte. Samas, päikesepaneele puudutavad uuringud tuleks läbi viia just päikeselisemates tingimustes. Arvestada tuleb nii kaamera enda parameetritega kui ka pildistamise kauguse ja pildi tegemise nurgaga. Joonis 1.28 esitab hoone karbil jälgitavaid soojuslekked läbi termopiltide.

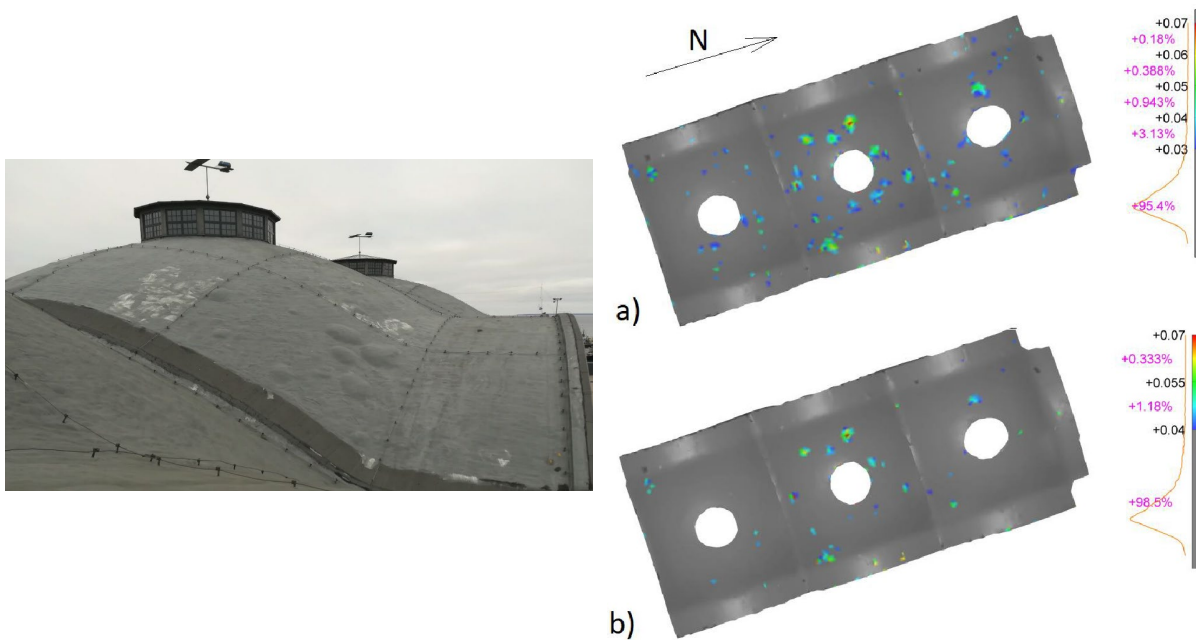


**Joonis 1.28.** Probleemid hoone karbil nähtuna läbi termokaamera: (a) akna pale/raami infiltratsiooni/exfiltratsiooni potentsiaal; (b) akna raami külje kahjustus, luues infiltratsiooni/exfiltratsiooni olukorra; (c) ukse infiltratsioon, mõjutades oluliselt põranda temperatuuri; (d) külmasild põhjustatud naelutamistest, mis omab selget mõju katusele ning (e) soojusleke tingitud soojustusega seotud probleemidest (allikas: Rakha and Gorodetsky, 2018)

### 1.3.8 Deformatsioonide mõõtmised

Droone on kasutatud deformatsioonide hindamiseks ehitise katusel (Resev, 2019). Ehkki võimalikke deformatsioone ning anomaaliaid läbi fotogrammeetria saab analüüsida mitmeti (sh visuaalne hindamine), kasutati eelnimetatud töös kõrvalekallete analüüsi, et leida olulisi deformatsioone (joonis 1.29). Meetodi puuduseks on aga sõltuvus drooni andmete täpsusest ning väga tihti võib ette tulla olukordi, kus kõrvalekalde tolerantsi on vähendatud teatud miinimumväärtuseni. Seejärel saab teatud konstruktsioonilisi eripärasid hakata näitama kui deformatsioone. Deformatsioonide kindlaks määramise täpsust on võimalik suurendada erinevate modelleerimistehnikatega (nt „best fit“ – parim sobitavus), eriti olukorras, kus konstruktsioonide geomeetria on keerukas.



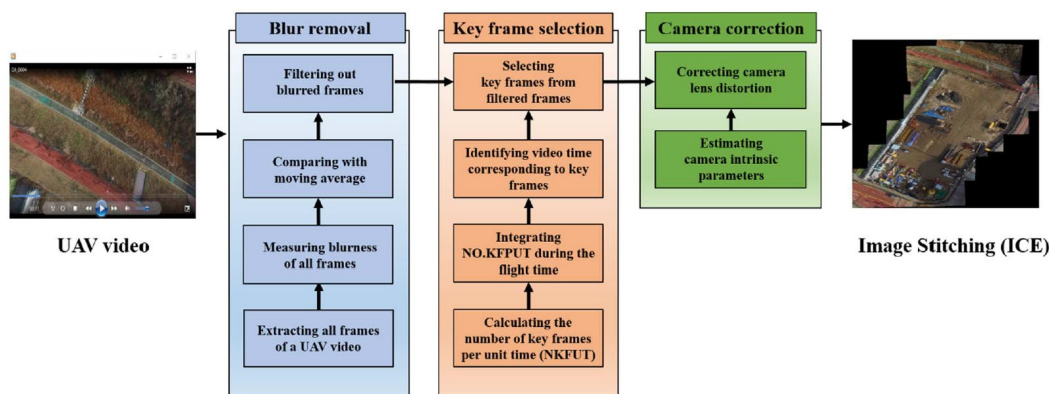


**Joonis 1.29.** Keeruka geomeetriaga katus (vasakul) ning deformatsiooni määramine kõrvalekallete analüüsiga (paremal)

### 1.3.9 Ehitusplatsi monitoorimine

Ehitusplatsil toimuv võib ajas väga kiiresti muutuda, mistõttu võib selle hetke olukorda olla väga keerukas analüüsida (Bang *et al.*, 2017). Tänapäevane tehnoloogia võimaldab väga lihtsalt ja kiiresti koguda ehitusplatsi kohta hulganisti andmeid. Lähtuvalt kogutud andmetest, saab ehitusplatsi ajalist arengut jälgida. Ehitusplatsi hetke olukorda saab iseloomustada läbi pildi, panoraami või videolõigu. Kogutud andmete baasil saab luua 3D mudeli ning seejärel võrrelda seda ehitusinfo 4D mudeliga (3D mudel + aeg), mis annab aimduse, kas ehitus on ajagraafikus. Juhul kui soovitakse luua panoraamvaadet, on üheks probleemiks piltidelt hägusate osade eemaldamine nii, et nad ei mõjutaks piltide kompositsiooni (Bang *et al.*, 2017).

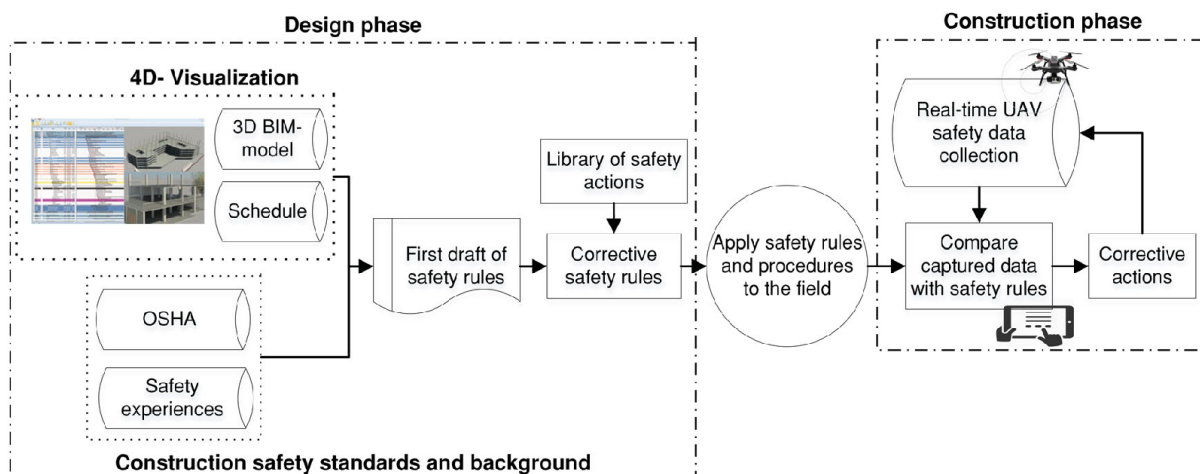
Ehitusplatsi ajaline monitoorimine võimaldab analüüsida ohutusega seotud küsimusi, tootlikkust ning ehitise seisundit. Kuna panoraami loomine sõltub kogutud piltidest ning nende kvaliteedist, saab alternatiivina kasutada droonidelt üles võetud videomaterjali. Sealäbi saab rohkem kaadreid ehitusplatsi olukorra kohta ja mistahes moonutusi on lihtsam eemaldada (joonis 1.30).



Joonis 1.30. Droonivideo baasil panoraami loomise protsess (allikas: Bang et al., 2017)

### 1.3.10 Ehituse ohutuse monitoorimine

Riskijuhtimine ehitussektoris on olnud aktuaalne üle maailma. Riskide suutmatu või ebapiisav haldamine ehitustegevuste käigus võib paratamatult tekitada probleeme projekti eesmärkide täitmisel. Kirjanduses on mitmeid näiteid, milles riski juhtimist ehitusinformatsiooni mudelitega saab vaadelda nii reaktiivse kui ennetava meetmena (Zou *et al.*, 2017; Alizadehsalehi *et al.*, 2018). Kaugseire tähenduses võimaldab ennetav tehnoloogia andmeid koguda ning analüüsida reaalajas, andes seejärel kohest (või ligilähedaselt reaalajale) tagasisidet ehitusplatsil olevate võimalike ohuolukordade kohta. Ohutuse juhtimise mudel läbi 4D BIM mudelite nii projekteerimise kui ehitamise staadiumis on esitatud joonisel 1.31. Selles on 4D (3D mudel + aeg) BIM mudel viidud kokku ohutusstandarditega, et seeläbi määratleda võimalikud ohud ning elimineerida need läbi ohutuseeskirjade kontrollsüsteemi.

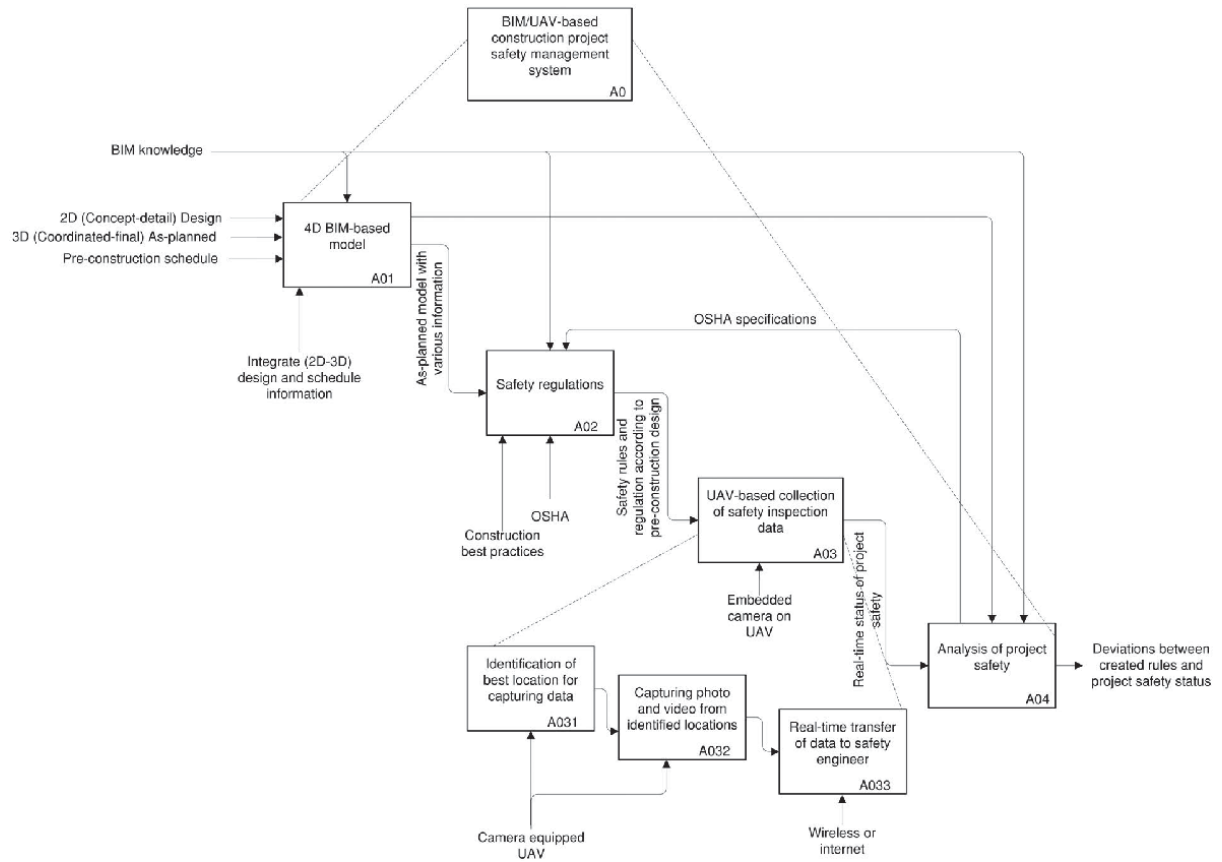


Joonis 1.31. 4D BIM kasutamine ohutuse juhtimiseks nii projekteerimise kui ehitamise staadiumis (allikas: Alizadehsalehi et al., 2018). OSHA- Occupational Safety and Health Administration.

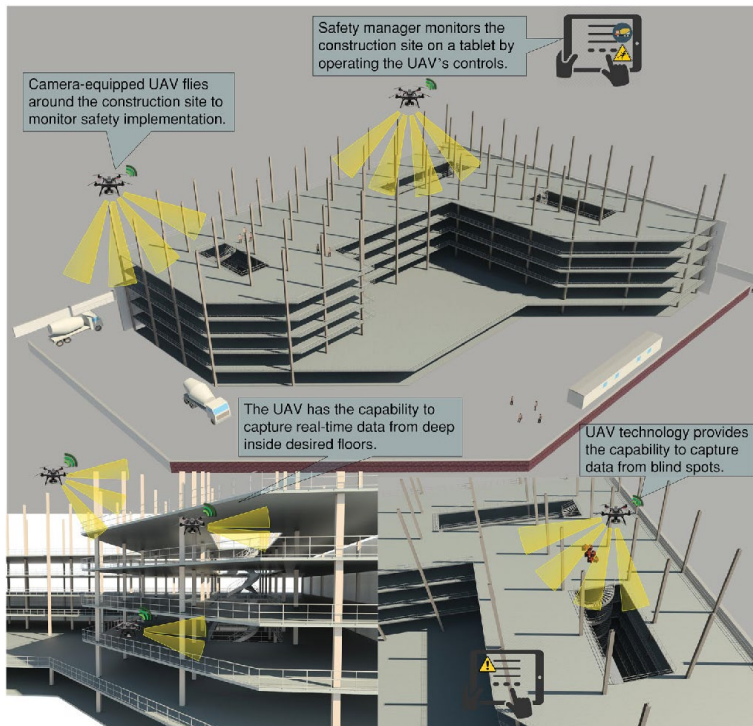
Joonis 1.32 esitab 4D BIM mudelite ning droonide omavahelise lingi, kuidas seeläbi hallata ohutusega seotud küsimusi ehitusplatsil. Peale 4D BIM mudeli koostamist, mis vastab töötervishoiu ja tööohutuse eeskirjadele ning milles on arvestatud ohutusinseneri eelnevaid teadmisi, saab just droonide kaudu koguda ohutusega seotud andmeid ehitusstaadiumis (joonis 1.33). Peale andmete kogumist, edastatakse nad ohutusinsenerile projektiga seotud



ohutusküsimuste hindamiseks ning edasisteks analüüsideks, andes seeläbi võimaluse elimineerida ohtlikud olukorrad enne kui võivad juhtuda õnnetused.



Joonis 1.32. 4D BIM/UAV ohutuse juhtimine ehitusplatsil (allikas: Alizadehsalehi et al., 2018)



Joonis 1.33. 3D simulatsioon monitoringust ehitusstaadiumis, mida varasemalt on määratud ohtlikuks (allikas: Alizadehsalehi et al., 2018)

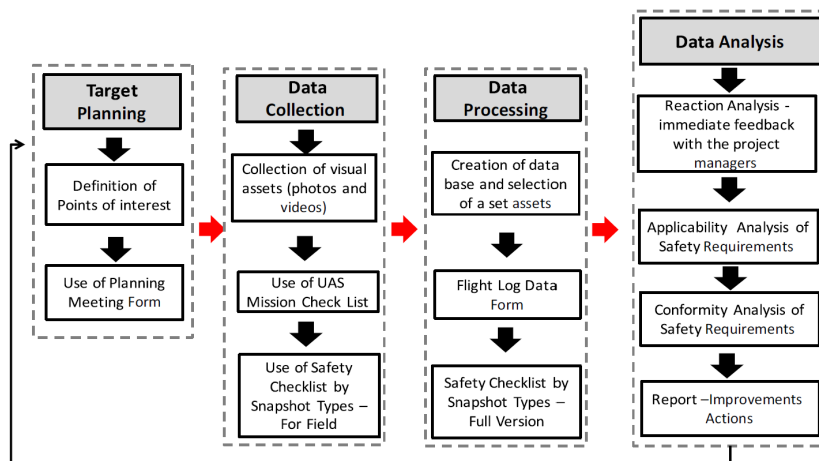
Ohutusinspektorid saavad kasutada droone, et monitoorida ehitustegevusi reaalsajas või kasutada hilisemat andmeanalüüsi, milles on muuhulgas kaasatud tehisintellekti võimekus. Soltanmohammadlou *et al.* (2019) annab põhjaliku ülevaate ehituse ohutusega seotud küsimustest. Reaalsajas monitoorimise süsteemi saab kasutada: (a) tööliste ohutuseks; (b) varustuse ohutuseks, ning varustuse ja tööliste ohutuseks; (d) töökeskkonna ohutuse monitoorimiseks.

Santos de Melo et al (2017) defineerib 3 erinevat drooni ülesvõtete tasandit (tabel 1.7), mis kõrvutatakse erinevate ohutusega seotud nõuetega.

**Tabel 1.7.** Ohutusega seotud nõuete nimekiri lähtuvalt ülesvõtte tüübist (allikas: Santos de Melo et al., 2017)

Ülevaatic	Keskmine	Lähedalt vaade
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Piirdeaed</li> <li>• Varustuse, materjali ning personali liikumisteed</li> <li>• Armatuuri ja raketise koostealad</li> <li>• Materjali ladustamisalad</li> <li>• Parkimise ning evakueerimisega seotud ligipääsuteed</li> <li>• Jäätmekonteinerid</li> <li>• Erosioonikontroll</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tööliste kaitstud kukumisohu eest</li> <li>• Turvavõrgud, turvaplatvorm ning piirded</li> <li>• Kaldteed, trepid, liikumisrajad</li> <li>• Töötajate turvavarustuse kandmine</li> <li>• Jäätmete eemaldamine läbi liugtee/torude</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nähtaval oleva terase otste turvakorgid</li> <li>• Tööplatvormid</li> <li>• Vormide koostamine, lahti võtmine</li> <li>• Varustuse tankimise- ning hooldusalad</li> <li>• Tellingud</li> <li>• Koormate vastuvõtuala signaliseerimine</li> <li>• Liiva ja kruusa kogumisalad</li> <li>• Jäätmete ja detriidivabad töökohad</li> <li>• Koormate tõstmine</li> <li>• Materjalide ladustamine</li> <li>• Lastimisala eraldus</li> <li>• Rasketehnika</li> <li>• Kraanad, vintsid ning kraanaga auto</li> </ul>

Kokkuvõttena toodi välja, et droone saab väga edukalt kasutada regulaarseteks ohutusealasteks kontrollideks (joonis 1.34), kuid tuleb arvestada teatud takistustega. Näiteks füüsilised takistused (seotud ehitise keerukusega), ilmastikutingimused, drooni operaatori koolitamine, eelnev ohutusalane kompetents, oskus visuaalseid andmeid analüüsida, vastumeelsus (tehnofoobia) mistahes uue tehnoloogia osas ning droonide integreerimine projekti tervise- ja ohutusjuhtimissüsteemiga.



Joonis 1.34. Ohutuse kontrollimise protokoll droonide abil (allikas: Santos de Melo et al., 2017)

Gheisari ja Esmaeili (2019) viisid läbi kvalitatiivse analüüsi droonide kasulikkusest ohutusega seotud tegevustes ning leidsid, et ohutusjuhid hindavad väga kõrgelt just järgmisi võimalusi: (a) kraanade tööraadiuste hindamine elektriliinide läheduses; (b) ehitustegevuste monitoorimine, mis jäävad kraanade töotsoonidesse ning (c) kaitsmata servade ja avade monitoorimine.

#### 1.4 Mobiilsed LiDAR-süsteemid

Mobiilse LiDAR-süsteemi kasutamine võimaldab koguda väga kiirelt täpset ning geoseotud, tihedat punktandmestikku 3D punktipilvena (Guan, 2013). Kohalikud omavalitsused ei pruugi sellistest võimalustest teadlikud olla, mis võimaldaks kogutud 3D punktipilvi üle kanda BIM mudeliteks ja teha seeläbi erinevaid analüüse. Selles alapeatükis vaatame mõningaid olulisemaid tehnoloogilisi võimalusi, mis kaasavad mobiilset LiDAR-süsteemi kui kaugseire meetodit andmete kogumiseks ja tingimuste analüüsiks.

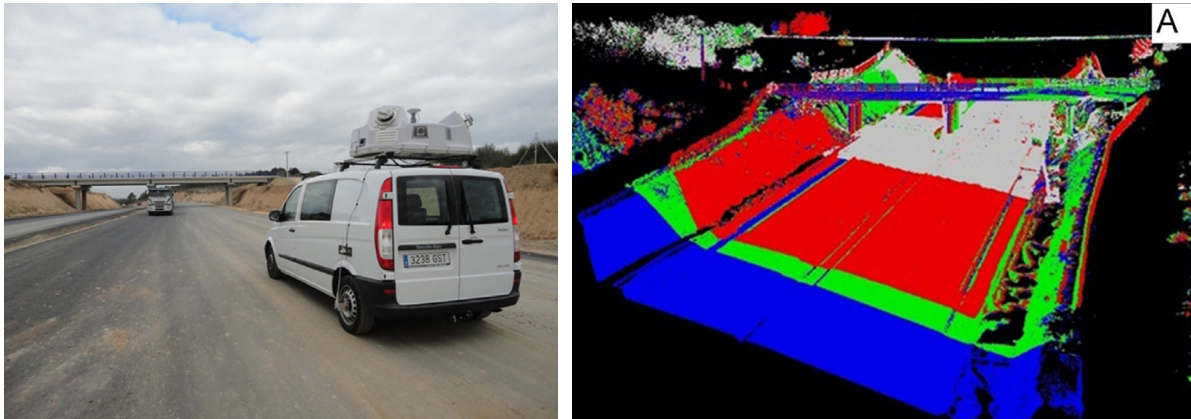
##### 1.4.1 Üksikute elamute eraldamine

Aeroskaneerimise (LiDAR) andmed pole tihti piisava täpsusega, et selle baasil saaks eraldada üksikuid ehitisi. Mobiilne LiDAR võimaldab koguda detailset infot ehitise fassaadi kohta täiendamaks aeroskaneerimist. Xia ja Wang (2018) pakuvad välja meetodi, kuidas eraldada üksikuid ehitisi LiDAR andmestikust. Esi- ja tagaplaani segmenteerimist kasutatakse selleks, et meetodit oleks võimalik kasutada tiheasustuse piirkonnas väga kõrge täpsusastmega (terviklikkus kuni 100 % ning täpsus 96.3 % sõltuvalt andmestikust). Meetodi peamiseks piiranguks on olukorrad, kus ehitised puutuvad väliskonstruktsioonides üksteisega kokku (nt ridamajad, paarismajad).

##### 1.4.2 Infrastruktuuri kontroll

Teekatendi hooldus on teedeametite peamine murekoht. Sõidutee õigeaegne remont omab väga suurt mõju sõidutee ohutusele ning remondikuludele. Sõidutee olukorra hindamiseks on välja töötatud mobiilset LiDAR-it kasutatavad mõõdistuse meetodid, mida saab kasutada läbi erinevate riistvaraliste lahenduste. Tänu selle mittepurustavale tehnoloogiale, kus mobiilse LiDAR-süsteemiga varustatud sõidukiga kaardistatakse sõidutee tavapärasel liikumiskiirustel, on võimalik ohutult hinnata nii kulumiskihi paksust kui ka vajalikke mahtusid.

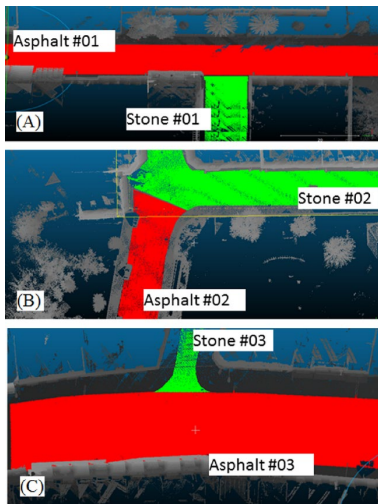
Kulumiskihi paksus on üks olulisemaid sõidutee kvaliteedinäitajaid, kuna selle vähenemine mõjutab sõidutee eluiga (Puente *et al.*, 2013). Meetodi mõõtmisviga katendikihi paksuse määramisel on uute sõiduteede korral alla 15 mm (joonis 1.35).



**Joonis 1.35.** Lynx Mobile LiDAR (vasakul) ning selle kasutamisel saadud katendikihi mudel läbi punktipilve (paremal) (allikas: Puente *et al.*, 2013)

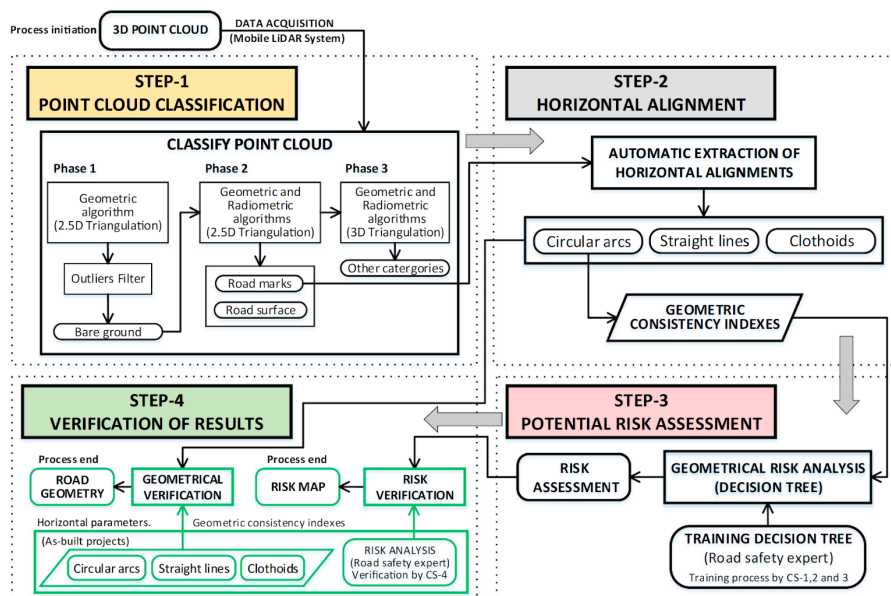
Sõidutee rekonstrueerimise projekti juures on tähtis esmalt olemasolev olukord kaardistada ja teha vajalikud mõõtmised. Siia alla kuulub nii sõidutee pind kui ka selle telg- ning servajooned. Husain ja Vaishya (2018) leidsid, et mobiilse LiDARi kasutamise terviklikkus sõidutee pinna määramisel ulatub 93.91 %-ni ning täpsus 96.94 %-ni. Järelikult saab sõidutee hooldamiseks vajalikku andmestikku saab väga lihtsalt koguda, analüüsida ning peale projekteerimist kasutada ka masinjuhtimises, et teostada uut sõidutee pindamist (sh eelnevat freesimist).

Mobiilset LiDARit on kasutatud ka sõidutee semantiliseks analüüsiks. Äärekivi eraldust sõidutee LiDAR-mõõdistusest on vaadeldud Rodríguez-Cuenca *et al.*, (2015). Leiti, et eraldamise täpsus on suurem kui 95%. Díaz-Vilariño *et al.* (2016) esitab võimaluse katendi tüüpide liigitamiseks läbi pinna erinevate kareduste. Meetodit saab kasutada erinevat liiki pindade tuvastamiseks (nt asfalt ning kivi/betoon), kuid erisused erinevate asfaldi liikide juures on liiga väikesed, et neid oleks võimalik üksteisest eristada (joonis 1.33). Eraldi toodi välja, et meetodit saaks laiendada kaasates LiDARi RGB ning intensiivsuse andmed. Seeläbi oleks võimalik tuvastada ka erinevaid sõidutee katendeid (objekte).



Joonis 1.36. Sõidutee klassifitseerimise lõpptulemus, mis on saadud punktipilve analüüsimisel (allikas: Díaz-Vilariño et al., 2016)

Mobiilne LiDAR-tehnoloogia võimaldab analüüsida sõidutee ohutust lähtuvalt selle telgjoonest (Martin-Jiménez et al., 2018). *European Road Assessment Program (EuroRAP)* jälgib sõidutee ohuindeksit (ingl *risk index* ehk RI), kuid seejuures arvestatakse peamiselt vaid õnnetuste statistikaga ning liikluse intensiivsusega. Sõidutee üldine ohutus (geomeetrisest vaatepunktist) omab väga olulist rolli ning seda on võimalik parendada standardset, mobiilset LiDAR-tehnoloogiat kasutades. Üldine meetodika sõidutee ohutuse automaatseks hindamiseks on toodud joonisel 1.37.



Joonis 1.37. Üldine meetodika sõidutee ohutuse automaatseks hindamiseks läbi sõidutee telgjoone (allikas: Martin-Jiménez et al., 2018)

Lähtuvalt analüüsist (vt joonist 1.37) saab koostada sõidutee erinevatele lõikudele nende ohutuse kaardi (joonis 1.38).



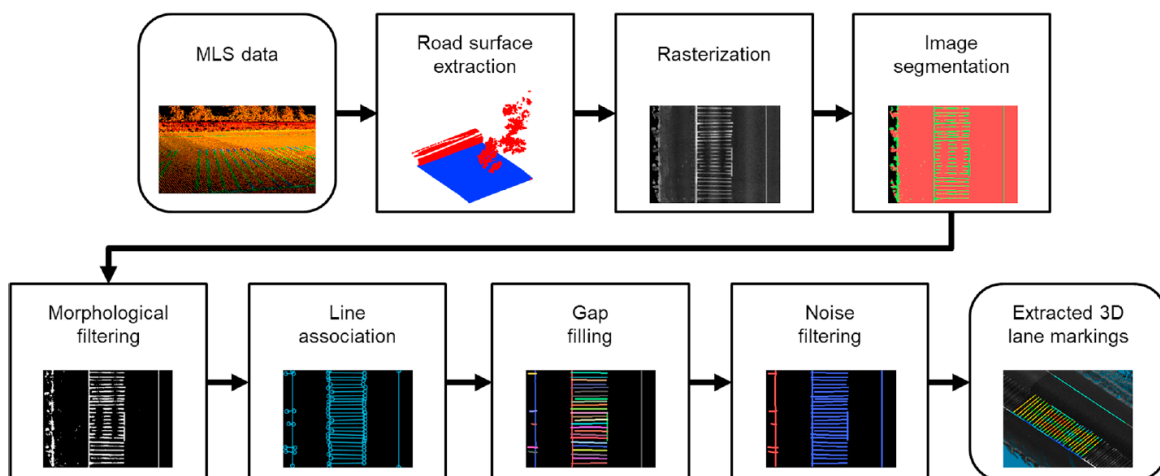


**Joonis 1.38.** Ohutuse kaardistamine läbi sõidutee telgjoone jagamise üksikuteks lõikudeks. Punane joon: kõrge riskimäär. Oranž joon: keskmine riskimäär. Roheline joon: madal riskimäär. (allikas: Martin-Jiménez et al., 2018)

Peamiseks erisuseks võrreldes teiste kaugseire meetoditega, mida saab ka kasutada sõidutee ohutuse hinnangutel, on mobiilse LiDAR-tehnoloogia oluliselt suurem täpsus. Sisuka analüüsi jaoks on vaja tagada sentimeetrine täpsus. Lisaks telgjoone mõõdistustele saab mobiilset LiDARit (koos inertsiaalanduriga) kasutada ka kurvilisuse määramiseks ja piki- ning ristkallete mõõdistusteks (Luo and Li, 2018).

### 1.4.3 Sõiduraja märgistuse analüüs

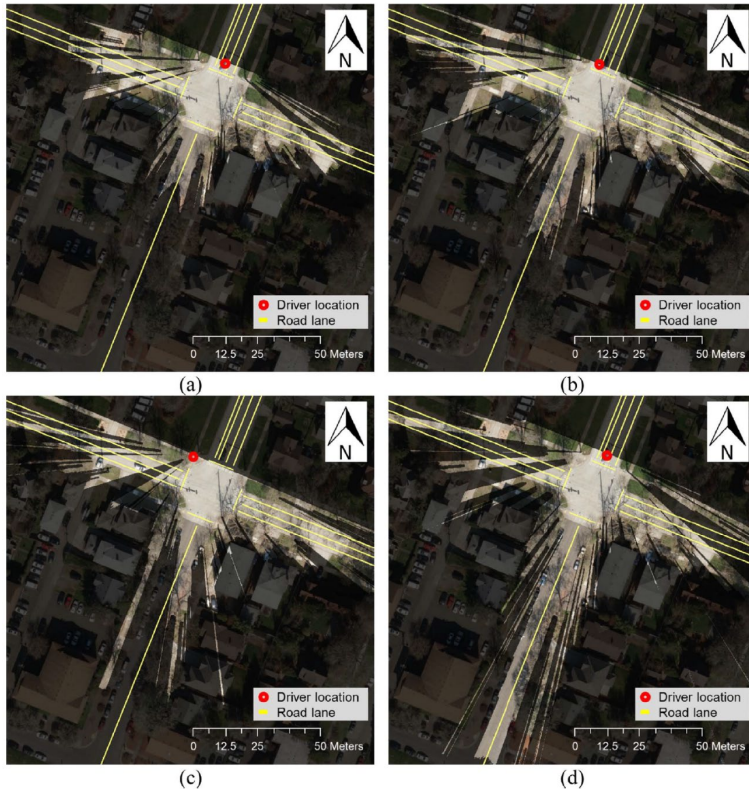
Sõiduraja märgistuse analüüse võib leida mitmetest artiklitest (Guan, 2013; Guan *et al.*, 2014; Guan *et al.*, 2015; Guo *et al.*, 2015; Kumar *et al.*, 2014; Soilán *et al.*, 2017; Yang *et al.*, 2018). Jung *et al.* (2019) kasutab mobiilset LiDAR-süsteemi, et kogutud andmetest eraldada teekattemärgistused. Seejärel saab andmeid analüüsidest leida need lõigud, kus teekattemärgistused on kaotanud oma peegelduvusvõime ja vajaks teehoolduse mõttes kohest sekkumist, et suurendada liiklusohutust (hinnang viidi läbi üksikute triipude tasandil). Meetodi eeliseks on võimalus eristada kehvast seisust teekattemärgistusi (joonis 1.39). Kasutatakse spetsiaalset mõõdikut, mis kombineerib omavahel saagise (tõeselt positiivsete ning valenegatiivsete eristus) ning täpsuse (tõeselt positiivsete ja valepositiivsete suhe) ja leiti, et see jääb vahemikku 89-97 %.



**Joonis 1.39.** Ülevaade teekattemärgistuse eraldamise töövoost (allikas: Jung et al., 2019)

#### 1.4.4 Nähtavuse ulatuse analüüsid

Mobiilset LiDARit saab kasutada laiapõhjaliseks ohutushinnangute läbiviimiseks juhi vaatevälja ja nähtavuse ulatuse tähenduses (Jung *et al.*, 2018). Väljatöötatud simulatsiooni meetod võimaldab virtuaalselt hinnata nähtavuse ulatust väga erinevate sõidukitüüpide ja objektidega (joonis 1.40).



**Joonis 1.40.** Nähtavus läbi juhi silmade lähtuvalt erinevatest liikumisvormidest. Heledamad alad tähistavad nähtavat osa: (a) sõiduauto (vaate kõrgus: 1.067 m) (kattumine 51.7 %); (b) jalgratas (vaate kõrgus: 1.372 m) (kattumine 55.3 %); (c) jalakäija (vaate kõrgus: 1.70 m) (kattumine 52.3 %); ning (d) raskeveok (vaate kõrgus: 2.316 m) (kattuvus 59.1%). (allikas: Jung *et al.*, 2018)

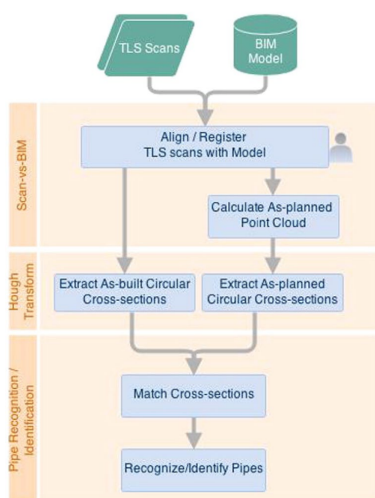
#### 1.5 Maapealne laserskaneerimine

Terrestriline laserskaneerimine (ingl *terrestrial laser scanning* ehk TLS) on täpsem kui droonidel baseeruv andmehõive. Kirjandusest võib leida kahe meetodi omavahelist võrdlust (TLS ning UAV), mis on heaks taustainfoks, millal üht või teist eelistada. Mõningatel juhtudel kasutatakse ka kahe meetodi omavahelist kombineerimist. Näiteks olukorras, kus soovitakse genereerida lähteandmed automatiseeritud seadmete/masinate maapealseteks töödeks (Moon *et al.*, 2019). Üldisemas plaanis on TLS-i kasutamisest ehituskonstruksioonide mõõdistuste juures vaadeldud Mill (2017). Ühe kokkuvõttena tuuakse välja, et suurt geomeetrilist täpsust nõudvate mõõdistuste juures on vajalik andmeid kontrollida täpsema seadmega (nt geomeetriline nivelleerimine, tahhümeetria).

##### 1.5.1 Scan-to-BIM ning Scan-vs-BIM

Maapealse laserskaneerimise tulemusel saadavat punktipilve saab kasutada teostatud olukorra (ingl *scan-to-BIM* ehk skaneerimine ehitusinfo mudeli tegemise eesmärgil) andmeanalüüsideks. Ehitussektoris kasutatakse mõistet digitaalne kaksik, milles füüsilist (nt

ehitatud hoone) tulemit võrdsustatakse selle digitaalse ekvivalendiga (digitaalne ehitise mudel). Lisaks punktipilve lihtsamale analüüsile on oluline, et sellest suudetakse ära tunda erinevaid objekte, mis loob lisaväärtuse kogu ehitusprotsessile, kuna ajamahukaid tegevusi nagu rutiinseid kvaliteedikontrolle, saab automatiseerida. Bosché *et al.* (2015) kaasab punktipilvest objektide äratundmise protseduuri eeldefineeritud toru elementide kaudu (projekteeritud andmestik ehk mida soovitakse punktipilvest ära tunda). Selle meetodi eripära ei ole mitte ainult objektide ära tundmine vaid ka nende korrektse asukoha otsimine lähtuvalt projekteeritud lahendusest. Seeläbi saab valideerida ehitustöid võrreldes projekteeritud lahendiga oluliselt lihtsamalt (ingl scan-vs-BIM ehk skaneerimine vs ehitusinfo mudel) (joonis 1.41).



**Joonis 1.41.** Meetod, mis võimaldab TLS andmestikust ära tunda ümara ristlõikega (nt torud) objekte, mida on kasutatud projektlahenduses ehk BIM mudelis (allikas: Bosché et al., 2015)

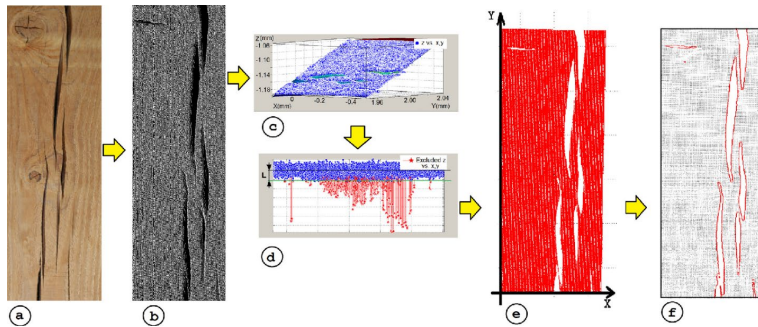
### 1.5.2 Automaatne tellingu platvormide kontroll

Wang (2019) uuris LiDAR-andmete kasutusvõimalust tellingu tööplatvormide konfiguratsioonide kontrollis. Peamine fookus oli veenduda, kas tellingute konfiguratsioon on tagatud kukkumisohtu vähendavaid meetmeid (varbalaudade olemasolu, varbalaudade kõrgus, kõige kõrgema kaitsepiirde kõrgus, kaitsepiirete omavaheline vertikaalne kaugus ning kaitsepiirde kõrgus tööplatvormist). Peamiseks eeliseks sedalaadi analüüsis just LiDAR andmete baasil, toodi selle automatiseeritus. Samas jäid lahtiseks küsimused, kuidas antud meetod töötab keerukamate tellingu platvormide analüüsimisel, kuna antud piloot viidi läbi piiratud tellingute lahendusega (pikkus vähem kui 4 m). Lisaks tuleb arvestada asjaoluga, et maapealset lasermõõdistust ei ole igasse kohta mugav üles seada. Ehkki läbi TLS-i saab kõrgekvaliteedilise punktmassiivi, mis võimaldab erinevaid analüüse, siis droonitehnoloogia täpsuse suurenedes saab neid kasutada just keerukamatel puhkudel ning seeläbi kiirendada andmehõivet ja ohutusega seotud küsimuste kontrolli.

### 1.5.3 Pragude määramine konstruktsiooni komponentidel

LiDAR-andmestikku on kasutatud pragude hindamiseks puitkonstruktsiooni elementidel (Cabaleiro *et al.*, 2017). Praod konstruktsiooni elementidel võivad viidata konstruktsioonilistele probleemidele ning nende mittepurustav monitoorimine võimaldaks

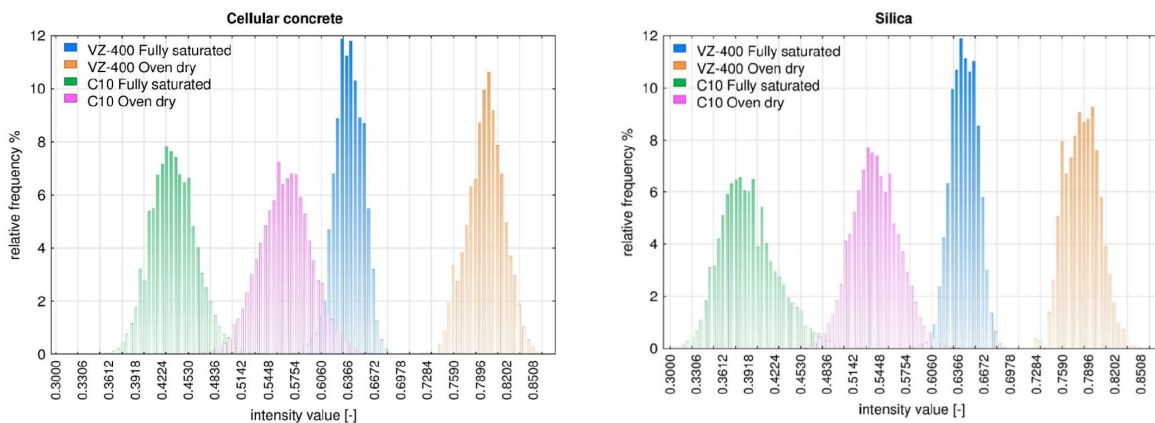
õigeaegselt sekkuda. Uuringus toodi välja, et punktipilvest (lahutusega 1 mm) on võimalik eristada pragusid, mis on laiemad kui 3 mm (eeldades uuringualana 7.5 x 7.5 m<sup>2</sup> ning skaneerimise kaugust 7.5 m)(joonis 1.42). Tänapäevane tehnoloogiline lõhe seisneb ennekõike selles, et prao laiust võidakse ülehinnata, mis on tingitud punktipilve lahutusest ning algoritmilistest keskendamistest.



**Joonis 1.42.** (a) Puitkonstruktsiooni küljevaade, mis sisaldab pragusid; (b) Punktipilv vastavast puitkonstruktsioonist; (c) Polünoompinnad paigutatud segmenteeritud punktipilve küljele; (d) Punktid, mis eemaldatakse lähtuvalt teatud distantsi, L, ületamisest polünoompinna suhtes; (e) Punktid projekteerituna risttasapinnale; (f) Leitud prao läbi alfa-kujundite kasutamise. (allikas: Cabaleiro et al., 2017)

#### 1.5.4 Niiskustaseme määramine ehitusmaterjalides

Lisaks objektide geomeetriselise asukoha määramisele saab laserskaneerimist kasutada ka skaneeritava objekti omaduste uurimiseks (Suchocki and Katzer, 2018). Näiteks saab laserskaneerimist kasutada ehitusmaterjalide niiskustasemete määramiseks, milles on analüüsitud materjali karedust, värvitooni ning vee olemasolu. Karedama pinnaga objektid on niisketena tumedamad ja seega peegeldavad vähem valgust võrreldes kuivade pindadega. Samas tuleb rõhutada, et sama materjali tingimuste hinnanguks ajas tuleks kasutada samu tehnilisi vahendeid, et mõõteseadmete erisused ei mõjutaks ajalist võrdlust (joonis 1.43).



**Joonis 1.43.** Valitud materjalide intensiivsused, mõõdetuna kahes erinevas küllastuse olekus ja kahe erineva seadmega (Riegel VZ-400, Leica C10) (allikas: Suchocki and Katzer, 2018)



## 1.6 Ülevaate kokkuvõte

Sensortehnoloogiate kiire areng on võimaldanud avardada kaugseire kasutusvaldkondi. Kirjanduse ülevaate koostamise käigus selgus, et just viimasel aastakümnel on tekkinud hulgaliselt erinevaid ehitusvaldkonnaga seotud kasutusjuhte, milles kaugseire täidab olulist rolli. Siinkohal saab positiivse asjaoluna tuua näite, kus paljud organisatsioonid on võimaldanud vaba juurdepääsu kaugseirega teostatud andmetele, mis võimaldab omakordi uusi kasutusjuhte välja töötada ning seeläbi hoogustada nende laialdasemat levikut (nt ESTHub, Copernicus avaandmed, Maa-ameti LiDAR andmed). ESTHub osas on teostatud omaette raport CGI Eesti AS poolt, milles on kokku võetud ka ehitusektorit puudutav hetkseis (CGI Eesti AS, 2020). Avaandmete tulevikuvaadet satelliitseire poole pealt käsitleb ka Tech & Space OÜ poolt koostatud raport (Tech & Space OÜ, 2020).

Siinkohal ei tohi aga ära unustada, et andmehõive on vaid üks väike osa kogu tervikust ning suurim kasu tekib siis kui neid kogutud andmeid osatakse sihipäraselt analüüsida. Just tehnoloogiline areng erinevate andmeanalüüsi meetodite juures võimaldab pikas perspektiivis automatiseerida rutiinseid tegevusi, et seeläbi muuta ehitusega seotud tegevusi efektiivsemaks ja ka turvalisemaks. Teadlikkuse tõstmine, kuidas saaks tänaseid tehnoloogilisi lahendusi rakendada ehitustegevuste efektiivsemaks majandamiseks, on olnud selle ülevaate koostamise peamine fookus.



## 2. Metoodika

Antud projekti raames kasutatud metoodika sõltub kaugseire tüübist ning on lühidalt kokku võetud tabelis 2.1. Välja on toodud erinevad, ehitusega seotud rakendusala.

Tabel 2.1. Metoodika põhitüüp sõltuvalt kaugseire meetodist

Kaugseire tüüp	Metoodika
Satelliitseire	Kirjanduse baasil kasutusjuhtumite koostamine ühes nende täpsushinnangutega (vt peatükk 1.1).
Aeroskaneerimine	Maa-ameti avaandmete (kõrguspunktid) analüüs lähtuvalt kasutusjuhtumitest (vt peatükk 4.1).
Drooniseire	Projekti käigus läbi viidud drooniseire rakendamine valitud pilootalade näitel (vt peatükk 4.2)

Aeroskaneerimise valitud metoodika põhineb Maa-ameti poolt jagatud kõrgusandmete analüüsil ja nende rakendamises erinevates kasutusjuhtumites. Siinkohal on esitatud nii andmetöötluse vaade (kasutusjuhtumi põhine) kui ka nende kasutamine edasistes tööprotsessides (ennekõike projekteerija/planeerija vaatepunktist). Drooniseire jaoks valitud metoodika ning kasutusjuhud baseeruvad kahel valitud pilootalal, milles on vaadeldud nii ehitusprotsessi (eeldab korduvat mõõdistust) kui ka ühekordset hinnangut (ühekordne mõõdistus). Oluline on seejuures käsitleda nii andmehõive ajalise optimeerimist (fikseeritud lennuplaani kasutamine), automatiseeritud või filtritel baseeruvat andmeanalüüsi ning kogu protsessi korratavust.

### 2.1 Pilootalade määramine

UAV pilootalad on jagatud kaheks piirkonnaks: (a) Tallinn ja selle lähiümbrus ning (b) ülejäänud Eesti, fookusega Tallinn-Tartu maantee. Pilootalade valik sõltus ennekõike kirjanduse ülevaates välja tulnud kasutusjuhtumitele. Kasutusjuhtumitest on võetud fookus ehitusprotsessile, mis eeldab korduvaid mõõdistusi samas asukohas. Pilootalade valim koostati selliselt, et üks oleks hoonega seotud ning teine maanteega. Kuna mitmed ehitusobjektid on pika ehitusperioodiga (ennekõike tee-ehitusobjektid, mis kestavad 2-5 aastat), siis teiseks oluliseks valikukriteeriumiks sai varasemalt mõõdistatud info olemasolu ning selle kättesaadavus, projektinformatsiooni kvaliteet (võrdlemaks mõõdistusinfot planeeritud informatsiooniga ehitusinfo modelleerimise kontekstis) ning objekti ligipääsetavus, et teostada lisamõõdistusi.

#### 2.1.1 Pilootala #1 lühikirjeldus Kose-Võõbu 2+2 maantee

Kose-Võõbu maantee on jagatud kaheks suuremaks lõiguks: (1) Kose-Ardu (2017 – 2020) ning (2) Ardu-Võõbu (2018 – 2020). Tegemist on vastavalt 11.75 ning 12.7 km 2+2 teelõikudega (joonis 2.1).

Piloodina valiti see objekt just seetõttu, et selle kohta on saadaval varasemad mõõdistused, mis võimaldavad nii nende järeltöötlust (uute kasutusjuhtumite vaatepunktist) kui ka võrdlust uute, teostatavate mõõdistustega. Antud projektide juures on kasutatud ka ehitusinfo mudelit

(tööprojekti tähenduses), mis teehitusprojektide tähenduses väljendub ennekõike ehitatavate konstruktsioonikihtide 3D pindadena, mida kasutatakse masinjuhtimises (nt aluskiht, drenikiht, asfaldikiht jt). Peale vastava kihi väljaehitamist (või vahepeal) saab droonimõõdistusega kätte hetke olukorra nii piltidena kui hilisema mudelina.

Antud projekti juures sätestas tööde tellija (Maanteeamet), et töövõtja peab teostama regulaarselt droonimõõdistusi. Väljavõte ehitushankest (Maanteeamet, 2017a; Maanteeamet 2017b): „Töövõtja peab arvestama, et lisaks muudele kontrollmeetoditele kontrollib Insener täiendavalt igapäevaselt Töövõtja poolt paigaldatud materjalide koguseid kasutades selleks droonimõõdistamist. Selleks hangib Insener ise vastavad seadmed või sõlmib alltöövõtulepingu vastavat pädevust omava ettevõttega. Droonimõõdistuseks kasutatakse tehnikat, mille kõrguslik viga ei ületa 5 cm.“ Kuna teehitus toimub suurel maa-alal, siis droonimõõdistuse seisukohast on siin oluline vaadelda ka erinevate droonide võimekust, mis väljendub nii mõõdistusajas kui hilisemas mõõdistusandmete analüüsi keerukusel.



Joonis 2.1. Kose-Ardu ja Ardu-Võõbu koondlõik (kasutatud Google Maps kaardirakendust)

### 2.1.2 Pilootala #2 Renoveeritav TalTech õppehoone

TalTech õppehoone aadressiga Mäepealse 3 on renoveeritav õppehoone ehitusperioodiga: 2019 suvi – 2020 suvi (joonis 2.2).



Joonis 2.2. TalTech õppehoone aadressiga Mäepealse 3, Tallinn (kasutatud Google Maps kaardirakendust)

Piloodina valiti see objekt ennekõike hea ligipääsetavuse (korduvate mõõdistuste tegemiseks) ning asjaolust, et projekti kohta on nõutud ehitusinfomudelit, mis võimaldab projekti kestel ja selle järgselt teostada ehitusprotsessiga seotud analüüse.

## 2.2 UAV andmete kogumine

UAV andmete kogumine on jagatud kahte suuremasse gruppi: (a) varasemate mõõdistuste süstematiseerimine (pilootala #1) ning (b) regulaarne, uute mõõdistuste läbiviimine (pilootala #2).

### 2.2.1 UAV andmete süstematiseerimine

Kose-Võõbu (pilootala #1) ehitusprojektil on droonitamist läbi viidud alates 2018. aastast ning kuna selle projekti käigus Maanteeamet osalt ka piloteerib droonimõõdistuste kasutamist suurte infrastruktuuri projektide juures, siis tehakse nendega koostööd (mõõdistused teostanud Hades Geodeesia OÜ), et analüüsida kogutud andmeid erinevate kasutusjuhtumite valguses.

### 2.2.2 Uute mõõdistuste läbiviimine

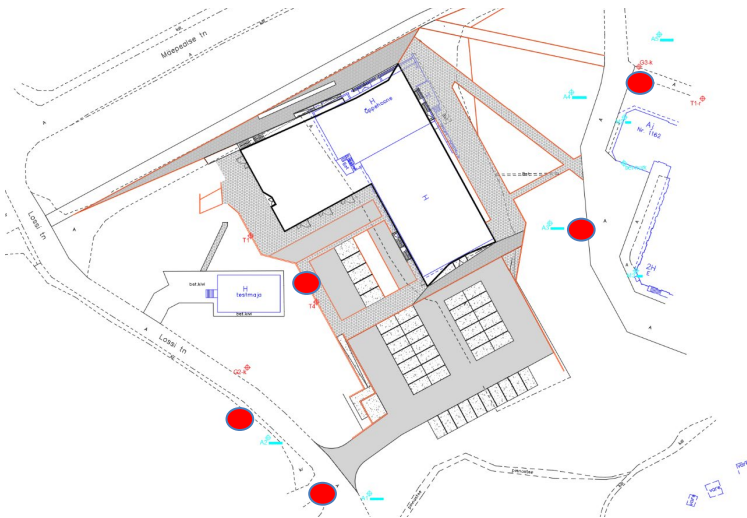
Ehitusprotsessi tähenduses kogutakse uusi andmed TalTech õppehoone renoveerimise käigus (pilootala #2). Droonimõõdistusala on maksimaalselt 20 000 m<sup>2</sup>, samas kui hoonealune pind ca 1 500 m<sup>2</sup> (joonis 2.3).





Joonis 2.3. TalTech õppehoone aadressiga Mäepealse 3, hoone (punasega), hoone vahetu ümbrus (roheline) (kasutatud Maa-amet kaardirakendust)

Mõõdistusala on valitud suuremana põhjusel, et oleks võimalik järgida ka ehitusplatsi korralduslikku poolt. Kasutatakse DJI Phantom 4 RTK drooni, millel on suurem positsioneerimistäpsus tänu lisatud RTK (*real time kinematic*) moodulile. Mõõdistuste ettevalmistamisel on maha märgitud kontrollpunktid, et andmete järeltötlusel oleks võimalik hinnata mõõdistuste absoluutset täpsust (joonis 2.4).



Joonis 2.4. Kontrollpunktide asukohad (punased täpid), millega droonilt kogutud andmeid võrreldakse (üks kasutusjuhtumitest)

Mõõdistused toimuvad kord nädalas ning valitud lennuplaani järgi (iga kord sama lennuplaani järgi, et hiljem oleks võimalik andmeid lihtsamini kõrvutada). Mõõdistus toimub kahel erineva suurusega alal, millest üks lennatakse kõrgusel 50 meetrit (ala suurus ca 20 000 m<sup>2</sup>) ning teine kõrgusel 40 m (ala suurus ca 10 000 m<sup>2</sup>). Mõõdistused kestavad kuni objekti valmimiseni, ning andmetöötlusega tegeleti jooksvalt. Teostatud mõõdistuste kuupäevad on leitavad tabelis 2.1. Iga mõõdistuspäeva andmemaht on ca 5 GB (eeldusel, et on lennatud nii 50 m kui ka 40 m kõrguselt).

**Tabel 2.1.** TalTech õppehoone droonimõõdistuste kuupäevad (2019-2020), seisuga 30.11.2020

Mõõdistuse kuupäev	Kõrgus 50 m	Kõrgus 40 m
14.11.2019	x	
21.11.2019	x	
28.11.2019	x	x
05.12.2019	x	x
13.12.2019	x	x
19.12.2019	x	x
27.12.2019	x	x
02.01.2020	x	x
09.01.2020	x	x
16.01.2020	x	x
23.01.2020	x	x
30.01.2020	x	x
06.02.2020	x	x
13.02.2020	x	x
21.02.2020	x	x
27.02.2020	x	x
05.03.2020	x	x
12.03.2020	x	x
19.03.2020	x	x
26.03.2020	x	x
02.04.2020	x	x
09.04.2020	x	x
16.04.2020	x	x
23.04.2020	x	x
30.04.2020	x	x
07.05.2020	x	x
14.05.2020	x	x
21.05.2020	x	x
28.05.2020	x	x
04.06.2020	x	x
11.06.2020	x	x
18.06.2020	x	x
25.06.2020	x	x
02.07.2020	x	x
12.08.2020	x	x
19.08.2020	x	x
27.08.2020	x	x



03.09.2020	x	
09.09.2020	x	
16.09.2020	x	x
23.09.2020	x	x
30.09.2020	x	x
07.10.2020	x	x
14.10.2020	x	x
21.10.2020	x	x
28.10.2020	x	x
03.11.2020	x	x
10.11.2020	x	x
17.11.2020	x	x
24.11.2020	x	x

### 3. Testimine ja veahinnangud

Testimine ning veahinnangud on täpsemalt käsitletud drooniseire juures, kuna siin on olnud võimalik lähtuda kasutusjuhtumitele seotavatest eeldustest (nt soovitud, maksimaalne täpsus) ning seetõttu on katsetatud erinevaid drooniseire lennuprogramme (sh erinev lennukõrgus). Projekti käigus läbi viidud mahuka mõõdistusperioodi kokkuvõttena on leitud, et valitud droonitehnoloogi kasutamisel on võimalik saavutada ruumilist täpsust alla 3 cm (Varbla, et al., 2020), millega on võimalik asendada üksjagu, manuaalselt korraldatavaid mõõdistustöid, mille täpsushinnang peab olema samas suurusjärgus. Selline täpsus annab ka suurepärase võimaluse koostada drooniseirest saadud piltide baasil 3D mudeleid, mida saab võrrelda projektimudelitega (ehitusinfo modelleerimine, digitaalne kaksik) ja seda konkreetsel ajahetkel.

#### 3.1 Andmeanalüüs

Projekti raames on varasemalt analüüsitud (kirjanduse baasil, vt peatükk 1.1) satelliitseire andmete kasutamist ehitussektori vaatevinklist ning eraldiseisvalt ei ole seda selle projekti raames uute kasutusjuhtumite tähenduses tehtud. Aerolaserskaneerimisel põhinevaid Maa-ameti kõrgusandmeid vaadatakse prototüüpide alalõigus (vt peatükk 4.1), kuna andmete analüüs on eelnevalt Maa-ameti poolt teostatud ning seetõttu keskendutakse nende juures juba puhtalt kasutusjuhtumite tuletamisele. Antud tulemis keskendutakse drooniseirest saadud andmete analüüsile, mis on läbi viidud varasemalt kirjeldatud pilootaladel (vt peatükk 2). Samas on näiteks drooniseire andmete valideerimiseks kasutatud ka terrestrilist laserskaneerimist (a priori täpsusega 2 mm).

Andmeanalüüs käsitleb kahte suuremat analüüsigruppi: (a) piltide baasil teostatav analüüs ning (b) fotogrammeetriaal baseeruv analüüs. Mõlema puhul saab analüüsi teostada, kas siis ühekordselt või ajalist mõõdet arvesse võttes (erinevatel ajahetkedel teostatud mõõdistuste analüüs – nt ehitusprotsessiga seotud analüüsid). Siinkohal on rõhuasetus sedalaadi

andmeanalüüside kirjeldamisel, mis vajavad täpsemat lahti seletamist, et seeläbi oleks prototüüpe lihtsam esitada.

Drooniseire tarvis on kogutud andmeid kahelt pilootalalt (tabel 3.1).

Tabel 3.1. Mõõdistusandmete jaotus pilootalade vahel

Pilootala nimetus	Tüüp	Lendude arv / kordused*
Mäepealse 3	Hoone	50 (seisuga 30.11.2020)
Lõigud Kose-Võõbu maanteel	Sõidutee	6

\*Mäepealse 3 ehitusobjektil on raporti koostamise hetkeks lennatud iganädalaselt (üks kord) perioodil 14.11.2019 – 30.11.2020 (välja arvatud juuli kuu).

### 3.1.1 Piltide analüüs

Piltide analüüs võib väljenduda lihtsa pildijada koostamises olukorras, kus objekti on mõõdistatud korduvalt. Seeläbi saadakse ühest ja samast punktist informatiivne aegrida koos võimalusega teostada piltidel erinevaid jah/ei tüüpi kokkuvõtteid (kas mingi objekt on ehitusplatsil, kas mingi osa on valmis ehitatud, kas kusagil ollakse ajast maas jne) või kasutada masinnägemist ja teostada piltidelt seeläbi automaatset objektide tuvastust. Piltide aegreal põhinevad analüüsid on liigutatud prototüüpide alalõiku, kuna suuremat analüüsi need ei vaja ning kirjeldada tuleb protsessi, mismoodi neid erinevate kasutusjuhtumite väljatöötamisel rakendada saab.

### Sissejuhatus masinnägemisse

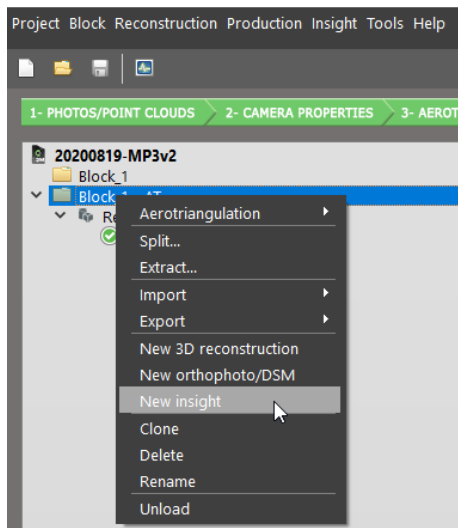
Antud projekti raames on analüüsitud masinnägemise tööprotsesse drooniseire andmete baasil. Kasutatud tarkvara on Bentley ContextCapture, mis oma põhifookuselt on fotogrammeetria tarkvara, kuid milles on kaasatud masinnägemise algoritme. See võimaldab ühelt poolt kasutada vaikimisi masinnägemise detektoreid (kokku 86), millest ehitusega seotud objektiklassidest võiks välja tuua järgmised: inimene, erinevad liikumisvahendid (sh auto, veoauto), liikluskorraldusvahendid (sh valgusfoor, liiklusmärgid) ning muud iseloomulikud tänava komponendid (nt hüdrant). Antud analüüsi käigus ongi keskendunud olemasolevatele detektoritele. Üheks suureks eeliseks antud töövoorus on ka võimalus leitud komponente 3D ruumis esitada, ehk siis piltidelt äratuntavaid komponente saab esitada fotogrammeetria teel leitud 3D ruumis. See annab võimaluse antud töövoolu kasutada nii ehitusprotsessis olevate komponentide jooksvas äratundmises (paiknemises) kui ka hilisemas korrashoiu etapis, kus teatud komponendid on statsionaarselt või kindlal ajahetkel kasutusel.

### Masinnägemisalgoritmi seadistus ning analüüs

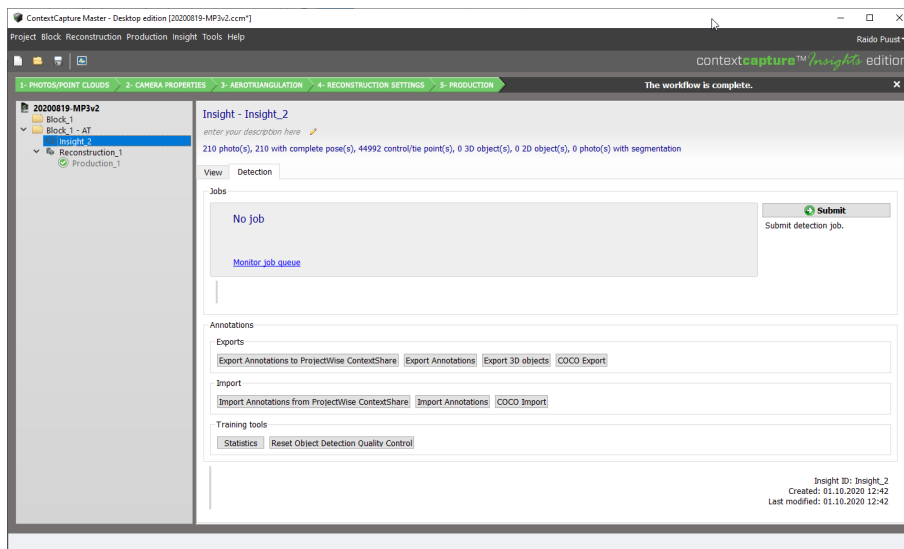
Näitena on kasutatud Mäepealse 3 drooniseire andmeid. Selleks, et masinnägemise poolt leitud komponenti saaks tähistada 3D ruumis, on loodud fotogrammeetria baasil mudel (vt peatükki 1.2, milles on lähemalt tutvustatud fotogrammeetriat puudutavat analüüsi). Allpool on esitatud fotogrammeetria baasil loodud mudel Bentley ContextCapture Update 16 (edaspidi lihtsalt ContextCapture) versioonis.



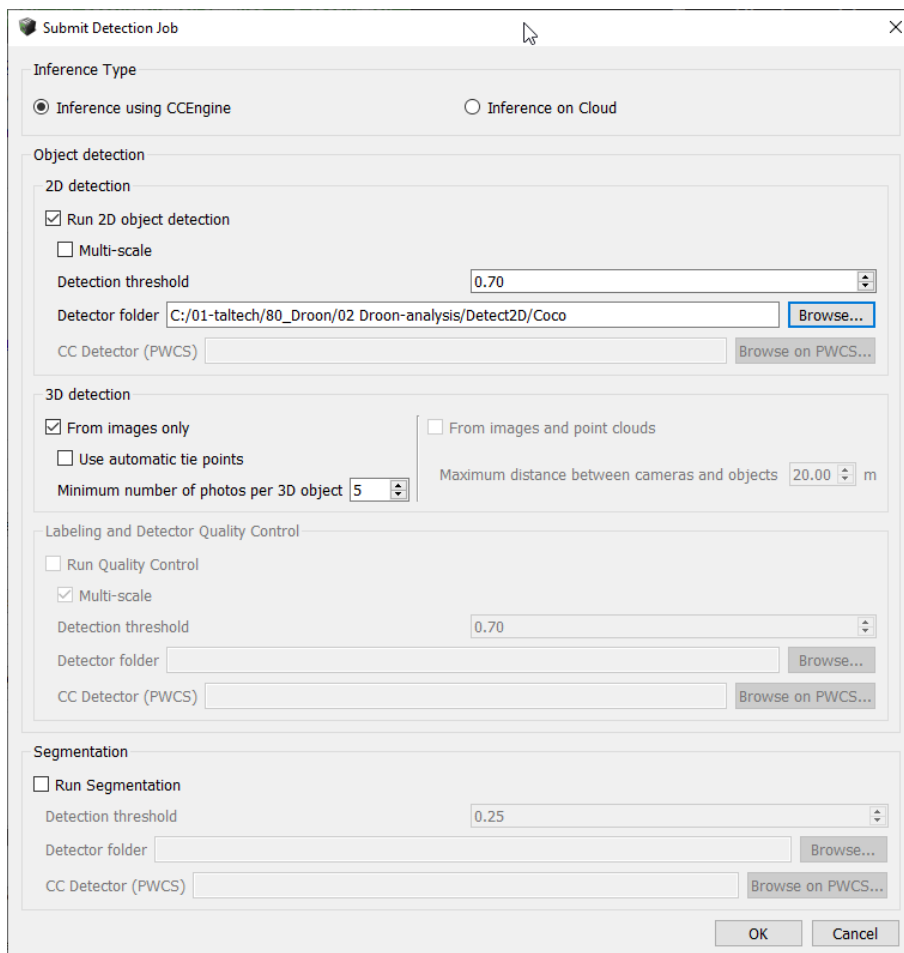
Kuna fotogrammeetriat saab luua väga erinevate tarkvaradega, siis ei püüa antud tulem esitada sama asja erinevate tarkvarade vaatevinklist, vaid lähtuda ühe või teise tarkvara lisavõimalustest (kasutusjuhtude ja prototüüpide perspektiiviga). Olles arvanud 3D võrkmodeli, liigu ContextCapture tarkvaras menüüsse **Insight** > **New Insight** või tee paremkliik soovitud arvutuse peal.



Veendu, et oleks valitud **Insight\_x** rida (x – tähistab lihtsalt vaikimisi töö numbrit, sul on võimalik see ka ümber nimetada). Liigu paanile **Detection** ning käivita analüüs (**Submit**).



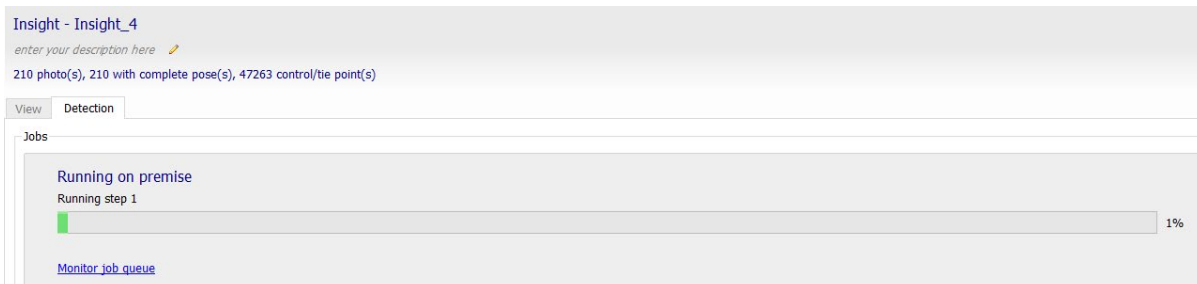
Järgnevalt tuleb määrata olemasolevate detektorite asukoht (meenutusena, me kasutame standarddetektoreid, et analüüsida nende kasutatavust drooniseire andmestiku baasil).



**Märkus:** Pane tähele, et aktiveeritud on nii 2D kui ka 3D analüüs. Sul on võimalik määrata vähim hulk pilte, kust üks ja sama objekt peab leitav olema.

Kliki OK, et analüüs käivitada.





Peale analüüsi lõppemist saab tulemusi näha paanil **View**.



**Märkus:** Parempoolsel pildil on auto leitud 2D pildi baasil ning vasakpoolsel on see leitud objekt üle kantud 3D ruumi, mis annab suurepärase võimaluse anda kiire ülevaade huvipakkuvatest objektidest ehitusplatsil või hilisemas korrashoius.

Antud analüüs lähtub standardobjektide tuvastamisest. Iga regioon/projekt kaasab eriliiki objekte, mistõttu standarddetektor ei pruugi ära tunda kõiki liikumisvahendeid, ega ka muid standardselt liigitatud objekte. Seetõttu võimaldab antud tarkvara ka trennida olemasoleva andmestiku baasil spetsiifilisemaid komponente. See aga eeldab andmeseeria olemasolu, kus samu objekte kaardistatakse mitmes erinevas ülevõttes, et seda oleks võimalik universaalselt ära tunda ka hilisemates ülevõtetes. Sellekohase analüüsi kokkuvõtte on esitatud juba prototüübi tulemis.

### 3.1.2 Fotogrammeetriaal baseeruv analüüs

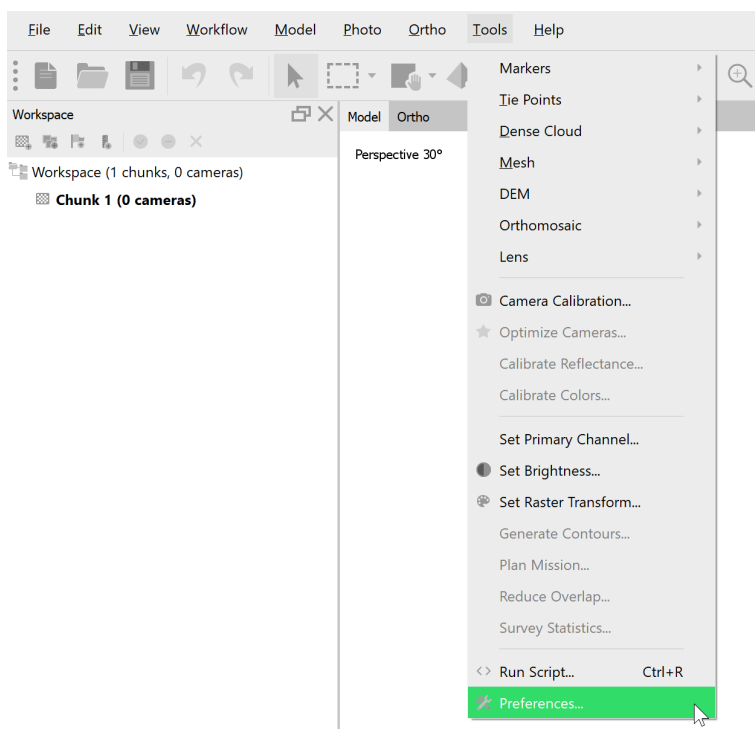
Fotogrammeetria on fotode abil objektide asendi, mõõtmete ja kuju määramine. Fotogrammeetria tulemuseks on 3D mudel, mis võimaldab sellelt võtta mõõtusid, võrrelda teisel ajahetkel teostatud 3D mudeliga (või projektmudeliga), et järgida ehitusprotsessi, tuua välja mahtusid, analüüsida ehitusobjekti kui tervikut jpm. Fotogrammeetria teel saadava 3D mudeli loomiseks on vaja andmeseirest saadud pildikogu, mida seejärel analüüsitakse vabalt valitud tarkvaraga (nii tasuta kui tasulised), et luua 3D mudel. Erinevatel tarkvaradel on erinevad võimalused ja tööprotsessid, mistõttu siinkohal on valitud neist üks (Agisoft Metashape Professional), mille baasil kirjeldatakse lahti 3D mudeli loomine.



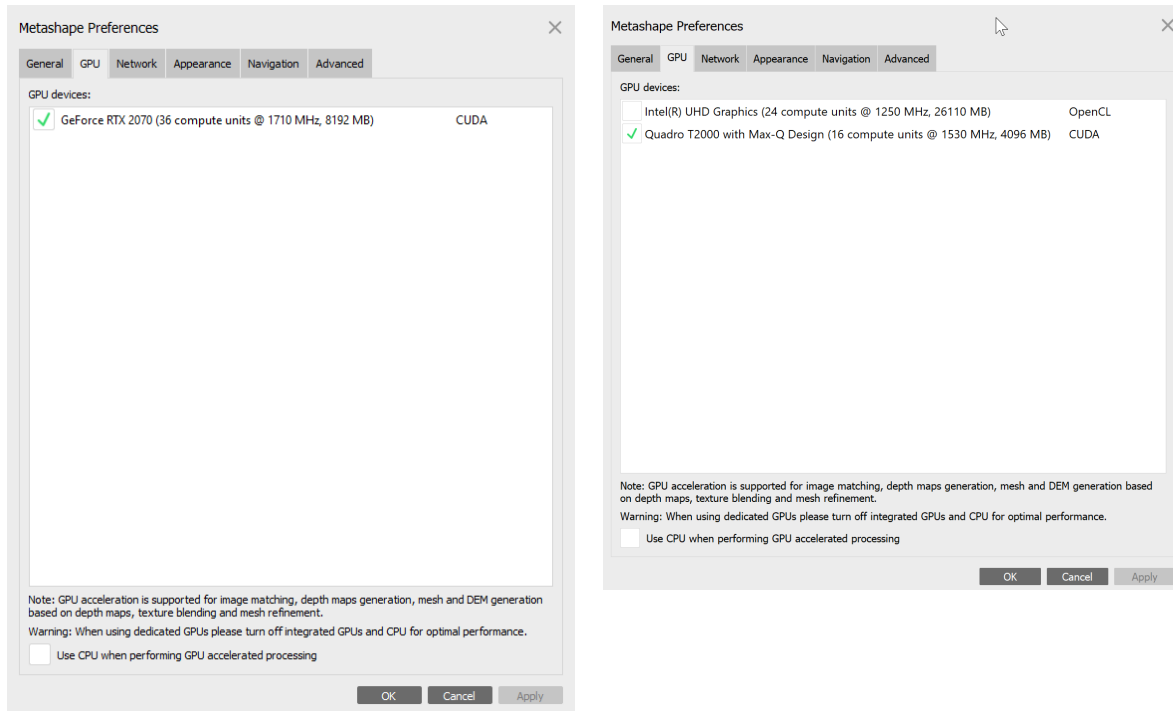
Käesolev analüüs lähtub Agisoft Metashape Professional tarkvara versioonist 1.6.2. Samas saab siin kirjeldatud tööprotsesse üle kanda ka teistele tarkvaradele (nt Bentley ContextCapture jt). Antud juhend lähtub ennekõike eeldusest, et lähtematerjal on kogutud drooniga, mis kasutab RTK-GNSS tehnoloogiat, ehk siis drooniseire tulemusel saadakse juba georefereeritud pildid. Juhend lähtub DJI Phantom 4 RTK droonist, kuid seda saab laiendada ka teistele RTK-GNSS tüüpi droonidele. Samas tasub tähele panna, et antud juhendit saab kasutada ka olukorras, kus pildid on eelnevalt georefereerimata. Lisaks tasub tähele panna, et kuna tarkvarade versioonid on pidevas muutumises, siis sellest lähtuvalt võib muetuda andmeanalüüsi protsess ning sellega saavutatav lõpptulemus. Kuna tulemus võib sõltuda täpsusklassi valikust, siis tuleks enne tööprotsessi alustamist hinnata, milline on mudelite oodatav täpsus ning milleks neid mudeleid edaspidiselt rakendatakse.

## Arvuti ettevalmistus

Fotogrammeetriaal baseeruv arvutus võib osutuda ressursimahukaks, mistõttu on soovitatav vaadata tarkvara tootjapoolseid riistvaralisi nõudeid (protsessori (CPU) valik, graafikakaardi (GPU) miinimumnõuded, minimaalne põhimälu (RAM) vajadus). Alternatiivina saab mudeleid luua veebiteenuses (tasulised), mis ei eelda kasutajalt spetsiaalset (võimekat) arvutit (nt [www.propelleraero.com](http://www.propelleraero.com) , [www.dronedeploy.com](http://www.dronedeploy.com) , [www.sitemark.com](http://www.sitemark.com) jt). Sellisel juhul piisab väga heast internetiühendusest, mis on vajalik kogutud piltide veebiteenusesse üleslaadimiseks, kus seejärel toimub piltide baasil mudeli loomine. Antud juhendis keskendume aga kasutaja arvutisse installeeritavale tarkvarale. Juhendis on analüüsiks vajalikud tööprotsessid toodud **Agisoft Metashape Professional** baasil. Tarkvara installeerimise järgselt tasub vaadata tarkvara põhiseadeid, mis kehtivad kõikide projektide tarvis. Selleks tuleb tarkvara käivitamisel valida menüüst: **Tools > Preferences**.

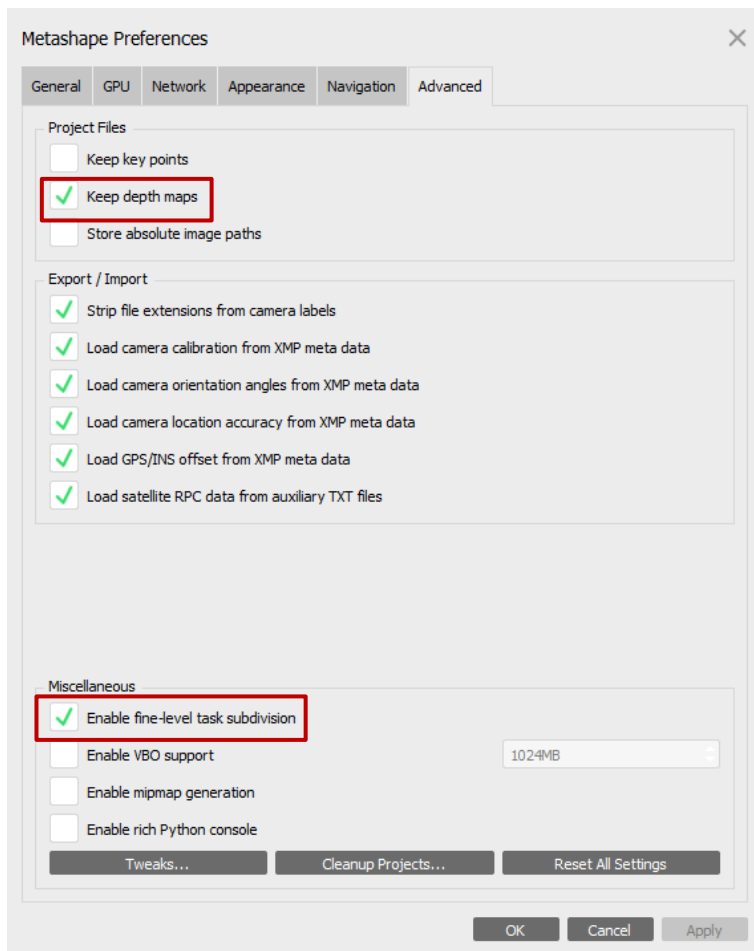


Avanevas dialoogis liigu paanile **GPU**. Siin kuvatakse kasutatava arvuti graafikakaardid (protsessorid). Alloleval pildil on toodud näide lauaarvuti (vasakul) ning sülearvuti (paremal) graafikaprotsessoritest. Mitte kõik graafikaprotsessorid ei pruugi kiirendada arvutusprotsessi, mistõttu on soovitatav mõne näidisarvutusega testida. Juhul kui arvutis on nii integreeritud graafikaprotsessor kui ka omaette graafikakaart, siis tuleks kasutada ainult viimast.



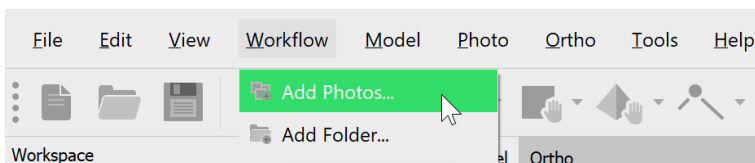
Soovituslikud graafikakaardi seeriad on: **Nvidia:** GeForce RTX, Tesla, Quadro ning **AMD:** Radeon RX, Radeon Pro. Olukorras, kus tarkvara ei tunnista graafikakaarti, tuleks esimese lahendusena proovida graafikakaardi draiverite uuendamist, aga võib ka juhtuda, et tarkvaral puudub vastava kaardi tugi täielikult. Pane tähele, et juhul kui arvutis on kasutusel omaette graafikakaart, siis on soovitatav välja lülitada säte, mis lubab CPU-d kasutada GPU põhises analüüsis (vt sätet **Use CPU when performing GPU accelerated processing**). Olukorras, kus GPU võimekus on samaväärne või väiksem CPU-ga, võib antud säte siiski mõjutada ka arvutuse kiirust. Seetõttu tasub taas testida. Seadete muutmisel klikki kindlasti **Apply** nupul. Liigu paanile **Advanced**. Selles dialoogis on soovitatav valida järgmised sätted:

- **Project Files: Keep depth maps** – vahearvutused jäetakse alles, mis kiirendab hilisemaid lisaarvutusi
- **Export / Import:** vali kõik alamsätted – projekti kaasatakse kogu piltidega seotud info/failid (projekti hilisema lisaarvutuse tarvis oluline)
- **Miscellaneous: Enable fine-level task subdivision** – võimaldab analüüsi jagada väiksemateks osadeks, mis tagab efektiivsema põhimälu (RAM) kasutamise

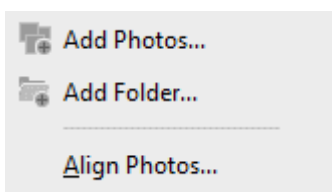


### 1.2.1 Drooniseire piltide import ning joondamine

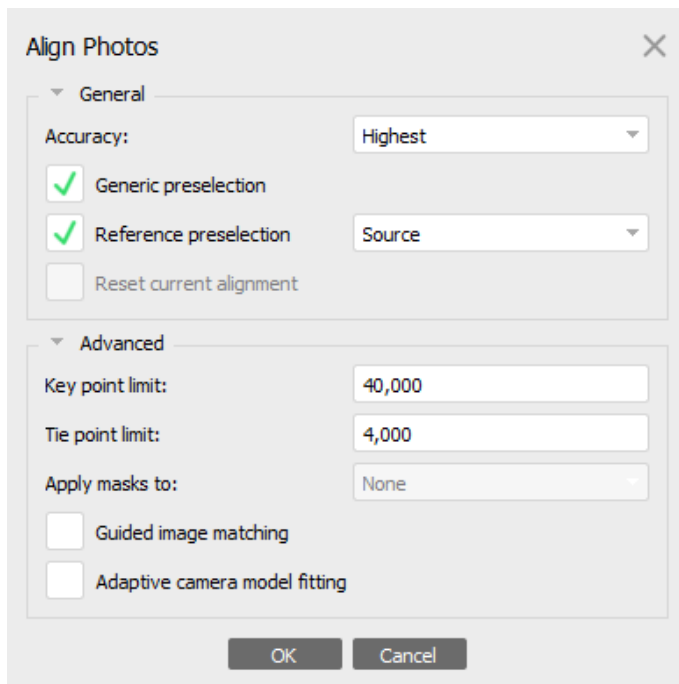
Piltide importimiseks vali tarkvara peamenüüst: **Workflow** > **Add photos / Add Folder...**



Vali kataloog või üksikud pildid. Kui pildid asuvad mitmes erinevas kataloogis, siis korda protsessi. Peale fotode importimist saad liikuda järgmise sammu juurde: **Workflow** > **Align Photos**.



Avanevas dialoogis on kõige olulisem panna tähele seksiooni **Accuracy**. Soovitav on valida, kas **High** või **Highest**.

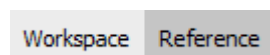


Teised **Accuracy** valikud (**Lowest**, **Low**, **Medium**) ei ole soovitatavad, kuna need vähendavad piltide kvaliteeti (vastavalt 64, 16 ning 4 korda). Samas **High** säte jätab skaala paika ning **Highest** tõstab skaalat 4 korda. Skaala suurendamine võib aidata piltidelt tunnuspunktide leidmist ja seda just madalama kontrastsusega piltide ja/või vähem detailsema tekstuuri korral. Samas on oluline tähele panna, et **Highest** säte kasvatab ka arvutuseks kuluvat aega, mistõttu on oluline taas testida sõltuvalt kasutatavast andmestikust.

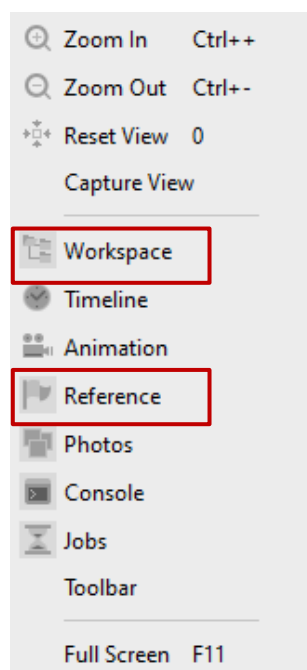
- Säte **Generic preselection** peaks kiirendama piltide joondamise protsessi märgatavalt, milles esmalt püütakse piltide paarid paika panna madalama täpsusastmega.
- Säte **Reference preselection** on oluline vaid RTK-GNSS UAV korral ning peaks samuti kiirendama joondamise protsessi. Juhul kui valitud on **Source** alamsäte, kaasatakse piltide sobitamisel kaamera koordinaate (selleks oli ka oluline, et eelnevalt said valitud Export / Import sätted). Antud säte on oluline olukorras, kus tarkvaral on raskuski piltidelt sarnaste punktide leidmisel (nt taimestiku või vähese tekstuuri korral).
- Säte **Key point limit** on kasutaja poolt seadistatav. Juhul kui kasutatakse väärtust 0, siis tarkvara otsib piltidelt nii palju iseloomulikke punkte kui võimalik, et seejärel nende põhjal joondamine teostada. Soovituslik on kasutada väärtust 40 000 (või ka osade kasutajate hinnangul 50 000).
- Säte **Tie point limit** määrab maksimaalse kattuvate punktide arvu ühel pildil (olukorras, kus sama punkt leitakse mitmelt erinevalt pildilt, mis läbi saab tuletada punkti 3D asukoha). Soovitav on kasutada väärtust 4000. Olukorras, kus objekt on väike (telemast, sammast jne) ja vajatakse väga suurt täpsust, peaks punktide arvu kasvatama.
- Säte **Apply masks to** on oluline vaid olukorras, kus modelleeritakse üksikut objekti (nt ausammas, telemast). Sellisel juhul lülitatakse taust arvutusest välja ning kasutatakse vaid objektilt leitud punkte.
- Säte **Guided image matching** on oluline vaid väga kõrge resolutsiooniga piltide korral (> 50 MP). Sellisel juhul kaasatakse rohkem võrdluspunkte.

- Säte **Adaptive camera model fitting** määrab, kas tarkvara arvutab kaamera mudelit defineerivad parameetrid (fookuskaugus, põhipunkti asend, 3 radiaalset moonutus- ning 2 tangentsiaalset moonutuskoeffitsienti) joondamise käigus (ei ole valitud) või sobitatakse kaamerale eeldefineeritud mudel (on valitud). Mõlemad valikud kuuluvad isekalibreerimise alla. Oluline on tähele panna, et parimate tulemuste saavutamiseks tuleb kaamera mudeli parameetrid empiiriliselt leida (sh fookuskaugus, põhipunkti asend jne), mis aga jääb antud analüüsist välja. Seetõttu kaasatakse vaikumisi sätteid (säte ei ole aktiivne).

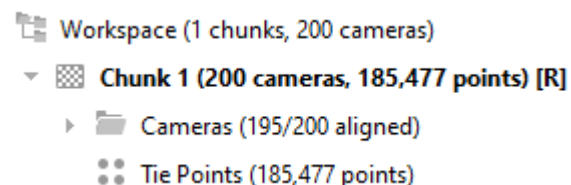
Peale sätete paika seadmist, kliki OK (dialoogi alaosas). Tulemiks arvutatakse hõre punktipilv, millest lähtuvad järgnevad arvutused. Esialgse joondamise vaatamiseks vali paan: **Workspace**.



**Märkus:** Kui **Workspace** valik pole kuvatud, veendu, et peamenüüst oleks valitud: **View > Workspace**. Veendu, et ka **View > Reference** oleks aktiivne.

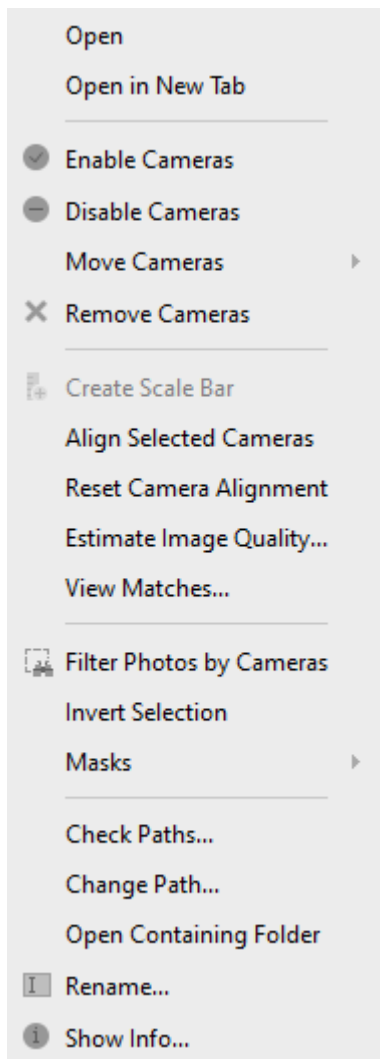


**Workspace** paan kuvab piltide koguarvu ning tunnuspunktide (**Tie points**) arvu.

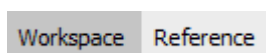


Klikkides real **Tie Points** kuvatakse punktidega seotud lisainfo. Klikkides real **Cameras** kuvatakse piltide nimekiri. Pildid, mille joondamist ei ole olnud võimalik teostada, on märgitud kui „NA“ (tüüpiliselt pildid, mis on udused või mis kujutavad valdavalt taimkatet, sh muruplatsid, põõsad, puud). Neid pilte on võimalik uuesti joondada (**Align Selected Cameras**) või olukorras, kus nende mõju on väike (nt äärealad), võib need ka lõpparvutusest eemaldada. Kui joondamata piltide arv on väike, siis ei mõjuta see lõpptulemust.





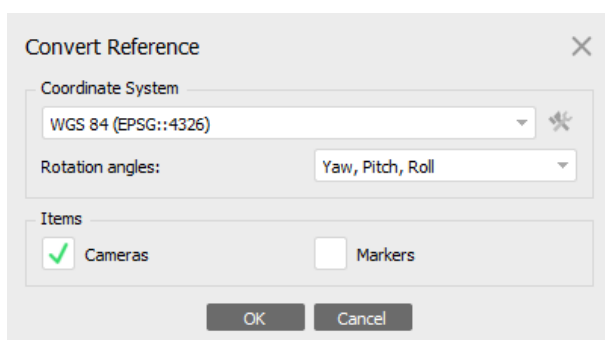
Järgnevalt seadistame koordinaatsüsteemi (kehtib vaid olukorras, kus kasutati RTK-GNSS UAV-d; kui seda ei kasutatud, vaata hilisemat alalõiku). Vali paan **Reference**.



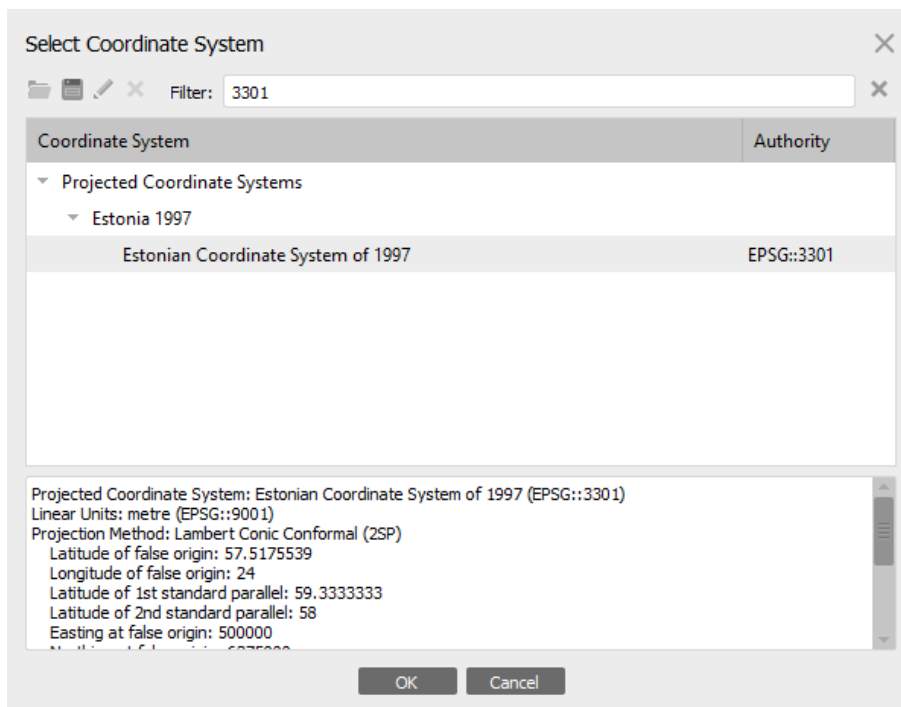
**Reference** menüüst vali **Convert** säte (vasakult neljas).



Kuvatakse dialog. Veendu, et valitud oleks **Cameras** säte.



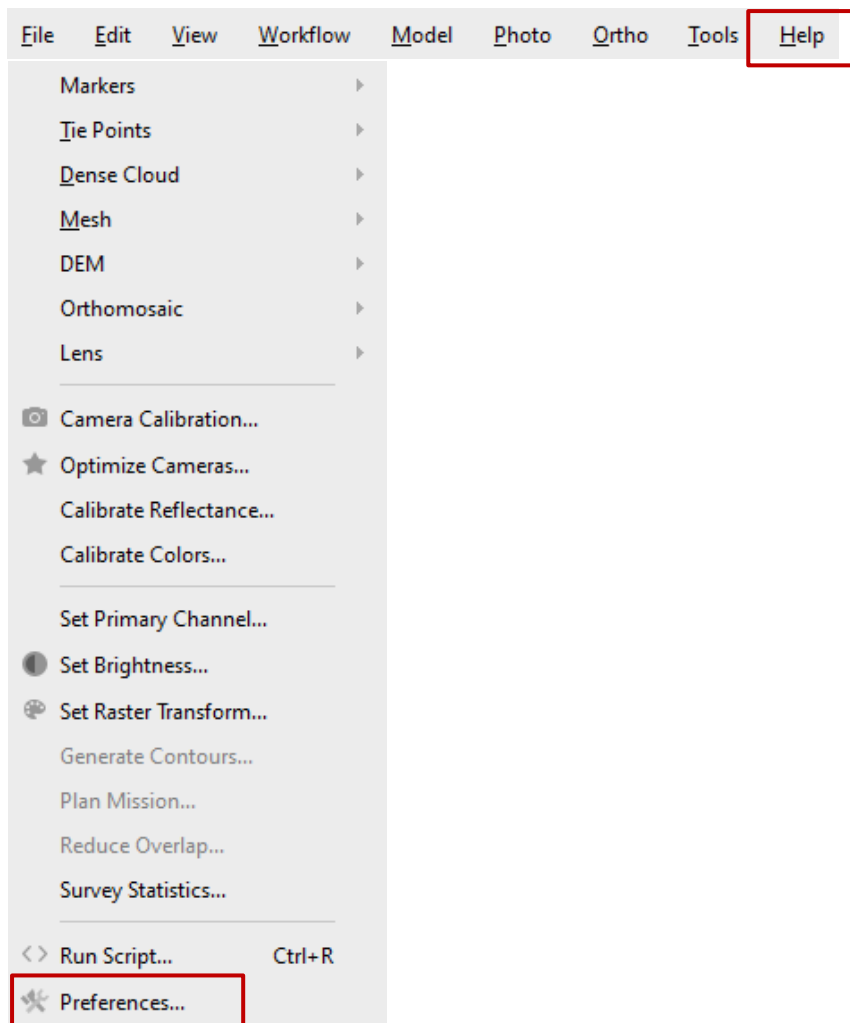
Kliki **Coordinate System** hüpikus, **More...** valik. Saad seejärel valida sobiva koordinaatsüsteemi. Kasuta filtrina: **3301**. See on Eesti koordinaatsüsteemi EPSG kood.



Vali **Estonian Coordinate System of 1997** nii, et see rida oleks hallikas. Sulge dialog. Veendu, et tehtud valik on näha ka **Convert Reference** dialoogis. Sulge ka **Convert Reference** dialoog.

**Märkus:** Antud tarkvara ei toeta Eesti regionaalset geoidi mudelit, millega saaks geodeetilised kõrgused konverteerida absoluutkõrgusteks. Seetõttu refereeritakse mudelid GRS-80 ellipsoidile. Olukorras, kus geodeetiline kõrgus on oluline, pole midagi muud vaja teha. Samas on ehituses tavaliselt kasutusel absoluutkõrgused ning seetõttu ei tohiks joendamisel kasutada piltide metaandmetes olevat koordinaatide infot, sest see välistab antud absoluutkõrgusele üleviimise. Hetke teadmise juures ei võimalda kasutatud tarkvara seda mugavalt teha, mistõttu tasub järgida alternatiivset tööprotsessi hilisemast sektsioonist. Näiteks on võimalik mudeli eksportimisel sisse viia konstantne kõrguslik nihe (võrdne geoidi keskmise kõrgusega huvipakkuval alal), mis väiksemate (Mäepealse 3 objekti mõõtu) mudelite korral võib põhjustada ca 3-4 mm kõrgusliku vea mudeli äärealadel (viga väheneb suunaga mudeli keskele), kuid ulatuslikumate mudelite korral võib viga olla suurem.

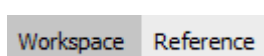
Joendamise statistilist andmestikku näed valikust: **Tools > Survey Statistics**.



### Joondamise täpsustamine / georefereerimine

Juhul kui mudel ei ole veel georefereeritud, tuleb läbida alljärgnev samm (minimaalselt on vaja vähemalt kolme maapealselt kontrollpunkti, kuid suurema hulga kontrollpunktidega saavutab suurema täpsuse). Kõrguslikult võid valida nii geodeetilise kui ka absoluutse. Maapealseid kontrollpunkte (vähemalt ühte) on soovitatav kasutada ka RTK-GNSS tüüpi droonide puhul, kuna kaamera isekalibreerimine tekitab täiendavaid vigasid, mille mõju saab maapealsete kontrollpunktidega vähendada – sellisel juhul tuleb jääda geodeetilise kõrguse juurde. Joondamise täpsustamist on kindlasti vajalik sooritada kui hiljem soovitakse võrrelda erinevatel ajahetkedel tehtud ülevõtteid (mudelitena), näiteks ehitusprotsessi kaardistamise eesmärgil.

Maapealsete kontrollpunktide importimiseks projekti tuleks esmalt luua tekstifail, milles on veerud: *point ID*, *X-coordinate*, *Y-coordinate* ning *Height*. Mäepealse 3 näitel leiab vastava info tabelist 2.1. Seejärel ava **Reference** paan.



**Reference** menüüst vali **Import Reference**.

Avanevas dialoogis vali kataloog, millest leiad tekstifaili ühes maapealsete kontrollpunktide infoga. Vali fail ning impordi see oma projekti (kliki **Open**). Seejärel kuvatakse dialoog **Import CSV**.

Coordinate System  
Estonian Coordinate System of 1997 (EPSG::3301)

Rotation angles: Yaw, Pitch, Roll  
Threshold (m): 0.1

Ignore labels

Delimiter  
 Tab  
 Semicolon  
 Comma  
 Space  
 Other:   
 Combine consecutive delimiters

Columns  
 Label: 1 Accuracy Rotation Accuracy  
 Easting: 3 8 Yaw: 5 9  
 Northing: 2 8 Pitch: 6 9  
 Altitude: 4 8 Roll: 7 9  
 Enabled flag: 10

Start import at row: 1 Items: All

First 20 lines preview:

Label	Northing	Easting	Altitude
D2	6584242.362	537413.630	44.308
T3	6584274.374	537429.787	44.456
D1	6584223.949	537433.879	44.344
D3	6584287.718	537496.957	41.116
D4	6584322.686	537509.027	40.919

OK Cancel

Veendu, et **Coordinate System = Estonian Coordinate System of 1997**. Kui varasemalt on mudel juba konverteeritud Eesti koordinaatsüsteemi, siis peaks see olema vaikimisi valitud. Juhul kui aga Eesti koordinaatsüsteem ei ole saadaval vaata varasemat sektsiooni. Ülejäänud sätteid vaata eelnevalt pildilt (pane tähele, et *X-coordinate* on esitatud kui *Northing* ning *Y-coordinate* kui *Easting*). Seejärel kliki OK. Avanevas dialoogis vali **Yes to All**.

Agisoft Metashape

Can't find match for 'D2' entry. Create new marker?

Yes Yes to All No No to All

Nüüd kuvatakse imporditud maapealsed kontrollpunktid paanil **Reference**. Veendu, et kõik read veerus **Markers** oleks tähistatud linnukesega.

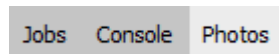
Markers	Easting (m)	Northing (m)	Altitude (m)	Accuracy (m)	Error (m)	Projections	Error (pix)
✓ D1	537433.879000	6584223.949000	44.344000	0.005000	0	0.000	
✓ D2	537413.630000	6584242.362000	44.308000	0.005000	0	0.000	
✓ D3	537496.957000	6584287.718000	41.116000	0.005000	0	0.000	
✓ D4	537509.027000	6584322.686000	40.919000	0.005000	0	0.000	
✓ T3	537429.787000	6584274.374000	44.456000	0.005000	0	0.000	

**Total Error**

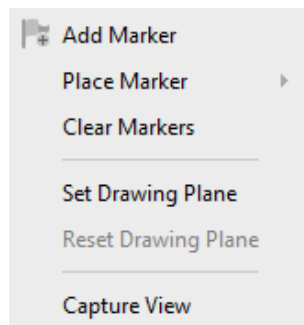
Control points

Check points

Liigu paanile **Photos**.



Kui mudel on juba georefereeritud, peaksid markerid piltide valimisel paiknema maapealsete kontrollpunktide keskpunktide läheduses (valgete lipukestena). Kui mudel pole veel georefereeritud, siis tee paremkliik maapealse kontrollpunkti keskpunktis (mistahes pildil, millel vastav punkt on näha) ning vali **Place Marker**.



Seejärel vali vastav maapealne kontrollpunkt järgnevalt kuvatavas aknas.



Marker peaks nüüd olema nähtav kõikidel piltidel (kui valge lipuke), mis seda sama maapealset kontrollpunkti kuvab. Korda neid samme ka teiste kontrollpunktidega. Selle tulemusel peaksid nüüd nägema, et **Projections** veerg näitab kõikide piltide osas väärtust 1.

Markers	▲	Easting (m)	Northing (m)	Altitude (m)	Accuracy (m)	Error (m)	Projections	Error (pix)	
✓	🚩	D1	537433.879000	6584223.949000	44.344000	0.005000	0.001038	1	0.243
✓	🚩	D2	537413.630000	6584242.362000	44.308000	0.005000	0.001331	1	0.357
✓	🚩	D3	537496.957000	6584287.718000	41.116000	0.005000	0.009112	1	2.063
✓	🚩	D4	537509.027000	6584322.686000	40.919000	0.005000	0.008110	1	1.706
✓	🚩	T3	537429.787000	6584274.374000	44.456000	0.005000	0.010173	1	2.007
<b>Total Error</b>									
		Control points				0.007144		1.509	
		Check points							

Järgneva olulise sammuna on vaja tagada, et markerid oleks korrektselt paigutatud ka teistel piltidel, millel need on esindatud. Seda tuleb teha ka siis, kui mudel on otseselt georefereeritud. Redigeeritud markerid kuvatakse roheliste lipukesega ning lisaks näidatakse neid ka **Reference** paanil **Projections** veerus kui lisareferentse (projektsioone). Pane tähele, et veerg **Error** esitab mudeli jääkvea vektorite keskmise pikkuse (praktiliselt tähendab see mudeli viga maapealsete kontrollpunktide suhtes; viga vahemikus 0.05 – 0.10 m on otsese georefereerimise ja isekalibreerimise korral tavapärane). Juhul kui maapealse kontrollpunkti

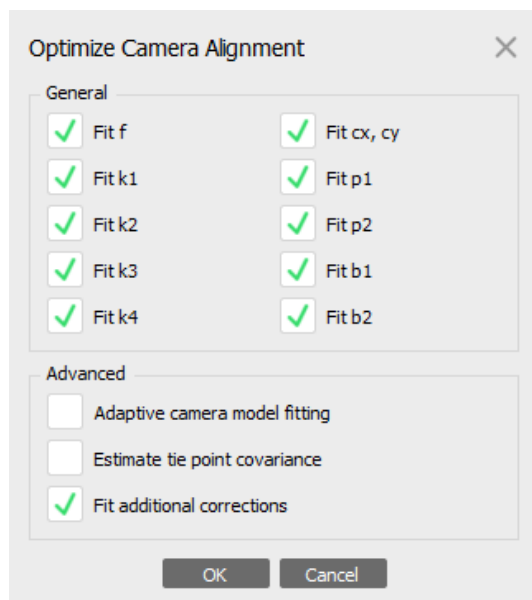


keskpunkti ei ole võimalik määrata, jäta see valge lipukesega. Soovitav on korrigeerida vähemalt 15 markerit iga maapealse kontrollpunkti lõikes. Samas ei ole kindlat reeglit, mismoodi see üldist viga võib muuta ja seetõttu võib aidata ka väiksema arvu punktide korrigeerimine. Siiski on soovitav iga erineva katse juures seda testida (kui suure hulga projektsioonide kaasamine on otstarbekas ja kui suurt täiendavat ajakulu see võib tekitada).

Kui mudel ei ole veel georefereeritud, on soovitav valida **Update Transform** (seda võib teha ka peale sügavuskaartide – *depth map*; *mesh*-mudeli jne loomist). Samas tuleb rõhutada, et parema tulemuse saab läbi **Optimize Cameras** valiku (seda saab kasutada vaid hõreda punktipilve korral). Võrreldes **Update Transform** valikuga, võtab **Optimize Cameras** rohkem aega.



Kui mudel on juba georefereeritud, tuleb valida **Optimize Cameras**. See täpsustab joendamist läbi maapealsete kontrollpunktide. Selle tulemusel peaksid mudeli vead (isekalibreerimise ning RTK-GNSS vigade summa) vähenema.



Avanevas dialoogis vali **General** sektsioonist parameetrid, mida soovid optimeerida (soovitav on valida kõik, kuid tasub arvestada, et see mõjutab kergelt ka arvutusprotsessi aega).

Lisaks on soovitav valida **Fit additional corrections**, mis võimaldab tarkvaral hinnata lisakoefitsiente, mida saab kasutada parema täpsuse saavutamiseks. Säte **Adaptive camera model fitting** ei oma maapealsete kontrollpunktide kasutamisel erilist tähendust. Säte **Estimate tie point covariance** võimaldab hinnata iseloomulike punktide (ingl *tie points*) kovariantsust. Selle tulemusel luuakse iseloomulike punktide dispersioonimudel. Peale valikute tegemist kliki OK.

Peale mudeli joendamise parandamist peaksid nägema, et vastavad väärtused **Error** veerus on vähenenud (otsese georefereerimise korral).

Markers	East err (m)	North err (m)	Alt. err (m)	Accuracy (m)	Error (m)	Projections	Error (pix)
✓ D1	-0.005096	0.008453	0.007105	0.005000	0.012162	64	0.264
✓ D2	0.006584	-0.007121	0.004990	0.005000	0.010907	80	0.343
✓ D3	0.010041	-0.008074	0.007408	0.005000	0.014862	118	0.275
✓ D4	0.018067	-0.004512	0.002127	0.005000	0.018743	98	0.272
✓ T3	0.009476	0.006421	0.003981	0.005000	0.012119	112	0.319
<b>Total Error</b>							
Control points	0.010829	0.007056	0.005489		0.014042		0.297
Check points							

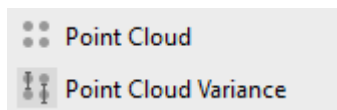
**Alt. Err** komponent peaks nüüd olema võrreldav plaaniliste veakomponentidega. Peale maapealsete kontrollpunktide märkimist markeritega on antud komponent tõenäoliselt suurim oma väärtuselt, ja seda siis enne **Optimize Cameras** kasutamist.

Nüüd, kus mudeli georefereeringut on täpsustatud (või mudel on georefereeritud, kui ta varem seda veel polnud), saab hõredat punktipilve kasutada edasiseks modelleerimiseks.

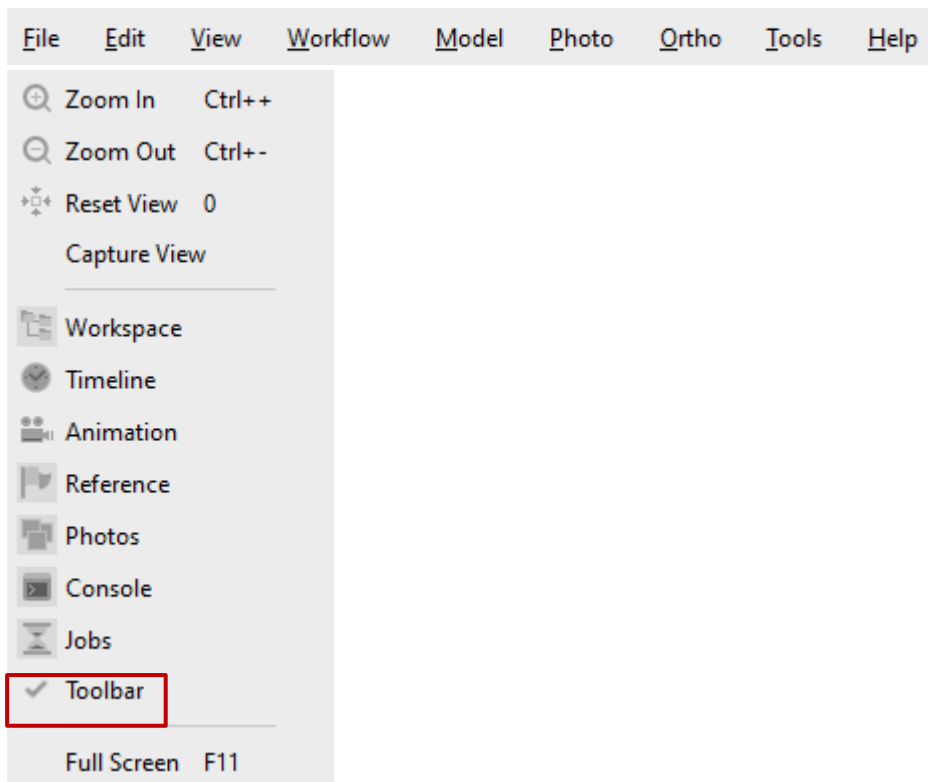
Juhul kui **Estimate tie point covariance** oli valitud kaamera optimeerimise käigus (*Optimize Cameras*), lisatakse projekti ka iseloomulike punktide dispersioonimudel. Selle nägemiseks vali **Point Cloud**.



Seejärel vali **Point Cloud Variance** säte.



Kui mingil põhjusel sa ei näe vastavat nupupaani, vali peamenüüst **View > Toolbar**.



### Võrkmodeli arvutamine

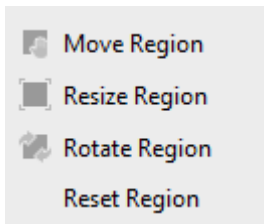
Hõredast punktipilvest lähtudes saab liikuda järgmise etapi juurde – võrkmodeli arvutamine (ingl *triangle mesh model*). Soovitatav on modelleerimist teostada sügavuskaartide (ingl *depth maps*) baasil, kuna tiheda punktipilve (nii sügavuskaardid kui ka tihe punktipilv on vaheprodukt enne võrkmodeli loomist) põhine modelleerimine võib anda mürarikka võrkmodeli. Lisaks saab väita, et tiheda punktipilve baasil modelleerimine on ka ajamahukam, sest tihe punktipilv arvutatakse sügavuskaartide põhjal. Sellest lähtuvalt keskendutakse siin vaid sügavuskaartide kasutamisele.

Enne modelleerimist tuleks paika panna huvipakkuva ala perimeeter. Sõltuvalt tarkvarast võib selleks olla automaatne (tarkvara hindab maksimaalse võimaliku modelleerimisulatus) või käsitsi redigeerimise režiim. Perimeetri muutmisega me justkui keskendume meid huvitavale alale ja seega ei kuluta asjatult aega selle osa modelleerimisele, mis jääb nt hoonest liiga eemale (sõltub eesmärgist, mõnel juhul võib meid huvitada ka hoone ümbrus). Tasub tähele panna, et mida suurem maa-ala, seda rohkem RAM-i nõuab ka arvutus.

Perimeetri redigeerimiseks vali **Move Region** vastavalt nupupaanilt.



Pane tähele, et **Move Region** nupu kõrval on väike nooleke, kust avanevad alamvalikud.

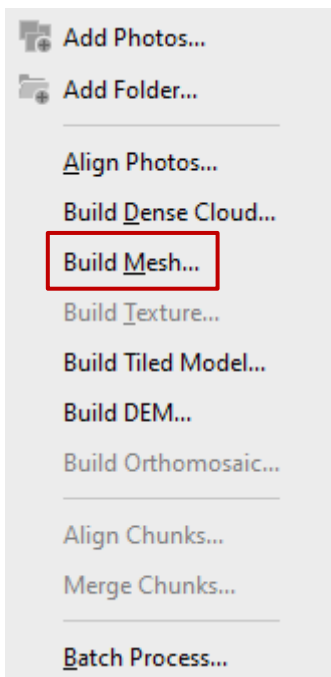
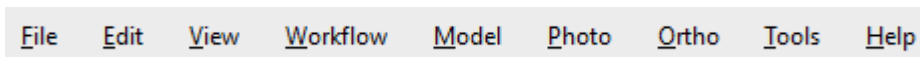


- **Move Region** – võimaldab lineaarselt perimeetri kasti nihutada
- **Resize Region** – võimaldab muuta perimeetri ulatust
- **Rotate Region** – võimaldab perimeetri kasti pöörata

Peale perimeetri kasti redigeerimist vali uuesti töövahend **Navigation**.



Menüüst **Workflow** vali **Build Mesh** (see valik muutub aktiivseks kui hõre punktipilv on arvutatud).



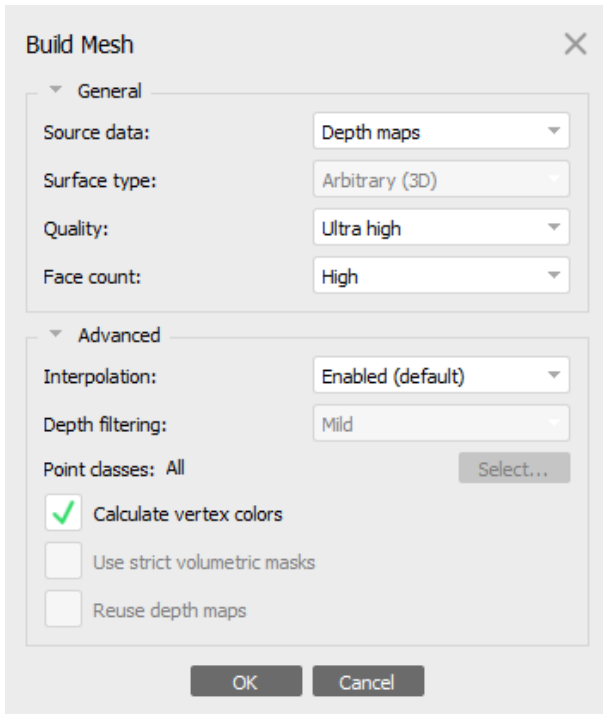
Avanevas dialoogis vali:

- **Source data = Depth maps** (need arvutatakse jooksvalt).

**Märkus:** Lisaks saad valida *Dense cloud* (juhul kui on varasemalt arvutatud) ning *Sparse cloud*. Viimane sobib vaid olukorras, kus eesmärk on saada kiire ülevaade mudelist (meetri suurusjärku täpsusega). Samuti saab ülevaatliku mudeli analüüsi põhjal eemaldada üleliigseid pilte, mis võimaldab vajadusel arvutusmahtu vähendada.

- **Surface type = Arbitrary (3D)** (see on vaikimisi valik, kui eelnevalt on valitud *Depth maps*).

**Märkus:** Juhul kui valitud on *Dense cloud* või *Sparse cloud*, saab valida ka *Height field (2.5D)*. *Arbitrary (3D)* säte on sobiv mistahes andmestiku korral, kuid seda on soovitatav kasutada olukorras kus modelleeritakse suletud objekte, näiteks erinevat liiki konstruktsioonid nagu hooned. *Height field (2.5D)* on ennekõike hea kasutada tasapindade (sh maapind) loomiseks. Samas tuleb tähele panna, et *Arbitrary (3D)* mälu kasutus (RAM) on oluliselt suurem.



Parameeter **Quality** omab viite erinevat sätet: *Ultra high*, *High*, *Medium*, *Low* ning *Lowest*.

- *Ultra high* – kasutatakse originaalsuuruses fotosid. See on soovituslik valik ehituskonstruktsioonide modelleerimisel, mis on üldjuhul väga suure detailsusega, aga ka teistel puhkudel kui oluline on suur täpsus
- *High* – piltide suurust vähendatakse 4x
- *Medium* – piltide suurust vähendatakse 16x
- *Low* – piltide suurust vähendatakse 64x
- *Lowest* – piltide suurust vähendatakse 256x

Oluline on märkida, et hoonepõhine arvutus vajab üldjuhul vähemalt 32GB RAM-i (eeldusel, et perimeetri kasti sisse jääb ca 200-300 fotot). Sellest lähtuvalt võib arvutus ebaõnnestuda kui RAM-i ei ole piisavalt või see saab kasutatud arvutuse vältel. Antud probleem on kindlasti suurem kui kasutatakse sätet *Ultra high*. Vähem detailsemate konstruktsioonidega võib piisata ka *High* sätest, mis võib suuremate pindade (nt seinad, katus) modelleerimisel anda samaväärse tulemuse. Üldjuhul peaks *Medium*, *Low* ning *Lowest* sätet vältima, samas kui *Medium* säte võiks sobida suuremate maa-alade (maapindade) modelleerimiseks.

Parameeter **Face count** määrab maksimaalse polügoonide arvu lõppmudelis. Võimalik on valida sätete *High*, *Medium* ning *Low* vahel. Need määravad optimaalse polügoonide arvu lähtuvalt mudeli detailsusastmest (määratud parameetriga **Quality**). Soovitatav on kasutada sätet *High*, kuid tuleb arvestada, et mudeli eksportimisel mõnele teisele platvormile võib suur



polügoonide arv saada probleemiks (> 10 000 000 tahku, mistõttu vähemvõimeka tarkvara juures tuleb seda vähendada). Seetõttu võib tekkida vajadus, et mudeli kvaliteeti peab vähendama, et jääks alles selle töödeldavus.

**Advanced** sektsioonist leiab veel parameetreid, mis on olulised lähtuvalt modelleerimise tüübist. Näiteks **Interpolation**, **Depth filtering** ning **Point classes** on olulised *Dense cloud* modelleerimise korral ning vaikimisi sätteid võib kasutada olukorras, kus modelleeritakse *Depth maps* baasil. Pane tähele, et *Interpolation* sätet on võimalik seada ka kui *Disabled*. Samas on see soovitatav jätta kui *Enabled* ja seda ka *Depth Maps* korral (vaikimisi võib olla *Disabled*). See võib aidata sulgeda mudelis olevaid avasid.

Juhul kui lähteandmed sisaldavad ka värvidega seotud informatsiooni, saab aktiveerida **Calculate vertex color**, mis leiab vörkmudeli punktidele värvitoonid. Kui seda mitte valida, siis värve vörkmudelisse ei lisata.

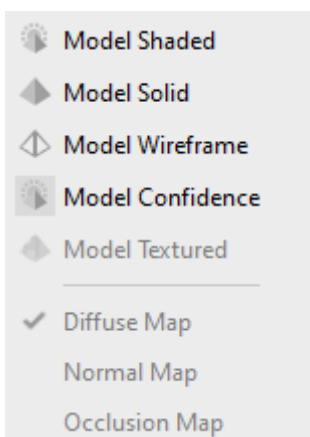
Säte **Use strict volumetric masks** on oluline vaid olukorras, kus kasutatakse tausta eemaldust (ingl *masking*) ning kui eesmärgiks on modelleerida üksikuid objekte (nt ausammas). Samas on see parameeter oluline kui soovitakse eemaldada näiteks haljastust üldisest arvutusprotsessist.

Säte **Reuse depth maps** on oluline vaid siis, kui varasemalt on sügavuskaardid juba arvutatud. See hoiab kokku arvutusaega.

Peale seadete määramist võid klikkida OK, misjärel viiakse läbi arvutus ning esitatakse lõppmudel. Selleks, et näha arvutatud mudeli kvaliteediga seotud informatsiooni, vali **Model Shaded**. Juhul kui *Calculate vertex colors* säte ei olnud varasemalt valitud, peaksid valima **Model Solid**.



Vali **Model Confidence**.



Mudeli usaldusväarsust kuvatakse nüüd sini-punasel värviskaalal, kus sinine esitab head ning punane kehvast kvaliteeti. Võib väita, et antud esitus kirjeldab üsna hästi modelleerimisega seotud vigasid, langedes kokku sellega, kus suuremad vead on ootuspärased (nt vähese

tekstuuriga pinnad, millel tarkvara ei pruugi iseloomulikke punkte leida). Samas ei tasuks seda võtta absoluutse tõena.

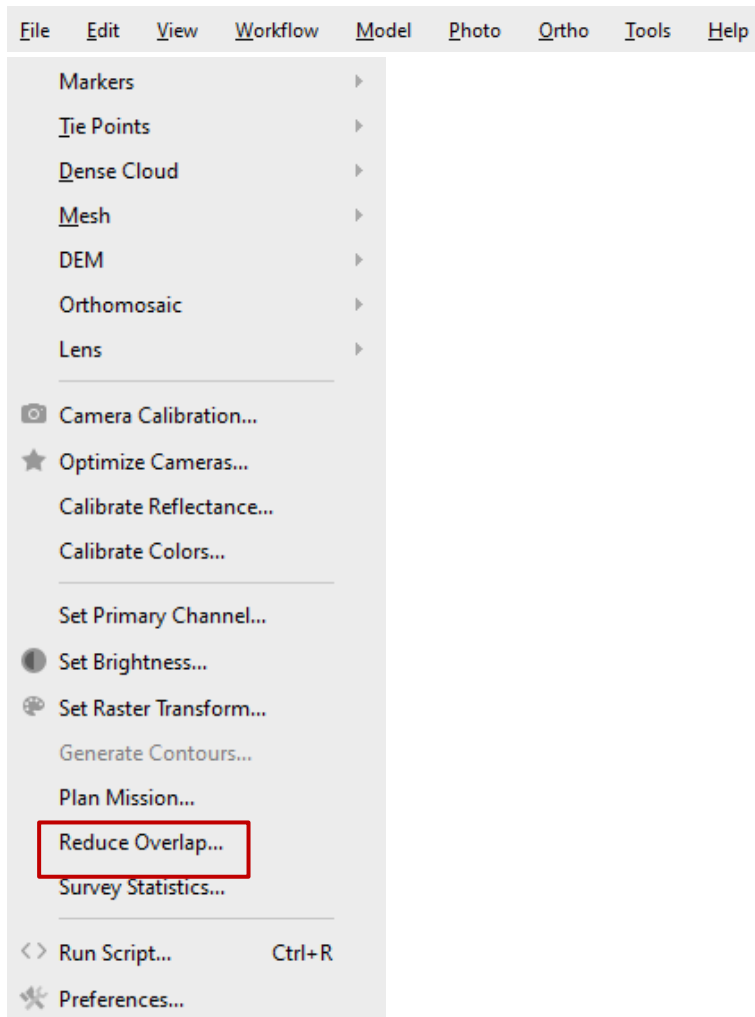
### **Võrkmodeli arvutussuutlikkuse parendamine**

Olukorras, kus võrkmodeli arvutuse jooksul kuvatakse veateade, et RAM-i ei ole piisavalt (nt kasutatakse *Ultra high* sätet), on võimalik kasutada mõningaid lisasamme, et arvutuskooormust vähendada. Kõige lihtsam on teha arvutusala (perimeeter) väiksemaks (sellest on olnud varasemalt juttu). Kõige ressursikulukamad on taimestiku (nt puud) arvutused, eriti kui seadena on valitud *Ultra high*. See on ennekõike seotud algoritmilise eripäraga, milles püütakse hinnata igat haru/oksa ja kõrgema resolutsiooniga piltide korral ka üksikuid lehtesid. Võimalusel tasub perimeetri ala valida nii, et see kaasaks võimalikult vähe taimestikku (eeldusel, et see ei ole fookuseks). See peaks vähendama ressursikulu ning kiirendama arvutusprotsessi.

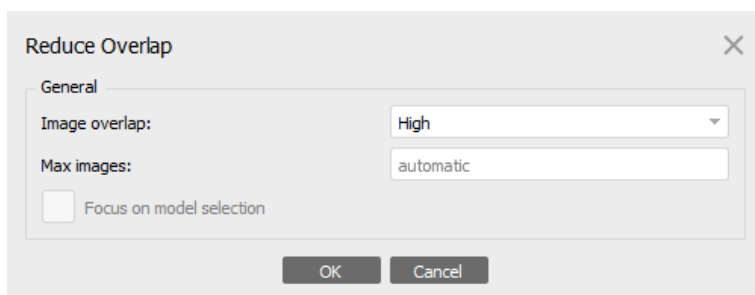
Kui perimeetrit pole võimalik vähendada, saab taimestiku piltidelt ka enne arvutamist eemaldada. Tegemist on siiski üsna aeganõudva protsessiga, mistõttu ajalist võitu ei pruugi me kokkuvõttes saavutada.

Modelleeritava ala saab jagada ka osadeks. Tuleb aga tähele panna, et üksikute osamudelite hilisemal liitmisel võivad tekkida jaotuspiiridele vead (nt nihked).

Lisaks saab vähendada ka arvutuses osalevate piltide arvu (nagu mainitud eelnevalt). Ehkki sellega saab kiirendada arvutusprotsessi, võib tulemuseks olla ebakvaliteetsem mudel. Esmalt arvuta hõredast punktipilvest esialgne võrkmodel (vaata varasemat sektsiooni). Seejärel vali menüüst **Tools > Reduce Overlap**.



Avanevas dialoogis vali **Image overlap** osas kas *Low*, *Medium* või *High*. Soovitav on siiski jääda *High* sätte juurde.

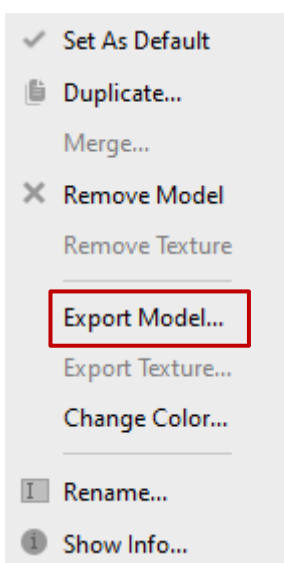
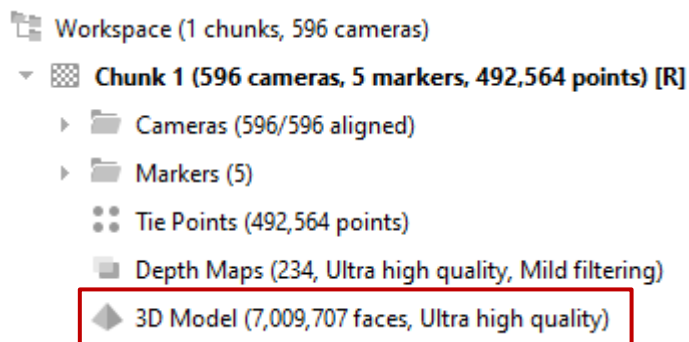


Säte **Max images** võib jääda vaikimisi seadele ehk **automatic**. Sätet **Focus on model selection** pole vaja aktiveerida. Seejärel käivita arvutus (kliki OK). Peale tegevuse lõppemist eemaldatakse pildid, mis pole optimaalse tulemuse saavutamiseks olulised (ja neid ei arvestata võrkmodeli loomisel).

### Võrkmodeli eksport

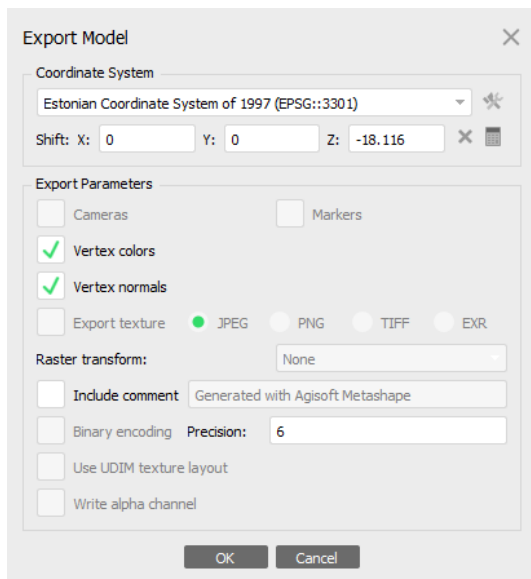
Peale mudeli arvutamist saab selle eksportida erinevasse formaati, et kasutada seda konkreetse kasutusjuhu juures. Liigu paanile **Workspace**.

Tee paremklikk **3D Model** peal ning vali **Export Model**.



Kuvatakse dialoog, milles saad määrata kataloogi, kuhu mudel salvestatakse. Lisaks saad valida faili laiendi (formaadi). Näiteks *Wavefront OBJ*. Ehkki formaadi valik sõltub selle edasisest kasutamisest, pane tähele, et osad formaadid võivad mudeli geomeetriat lihtsustada, mistõttu peaksid olema selles osas ettenägelik. Salvesta asukoht/formaat valikuga **Save**.

Kuvatakse dialoog, milles saad määrata ekspordi täpsemad parameetrid. Veendu, et koordinaatsüsteem oleks endiselt **Estonian Coordinate System of 1997**. Selle oled varasemalt seadistanud, mistõttu peaks see siin nimekirjas ka olemas olema. Pane tähele, et juhul kui mudeli kõrgused on geodeetilised, kuid soovitakse absoluutseid kõrguseid, on võimalik keskmine geoidimudeli kõrgus võrkmodellist maha võtta. See oleks vaja sisestada **Z** kasti. Samas kui geodeetiline kõrgus on OK, siis jääb siin kastis väärtus 0. Mäepease 3 näitel on **Z** väärtuseks **18.116** m (tasub tähele panna, et positiivne väärtus lahutatakse ja negatiivne liidetakse kõrgusele). Pane tähele, et see ei ole täpne meetod kõrguse teisendamiseks ning tekitab väikeseid vigasid mudelisse (Mäepease 3 näitel jäävad need 3-4 mm juurde servaaladel, kusjuures vead vähenevad suunaga objekti keskele).

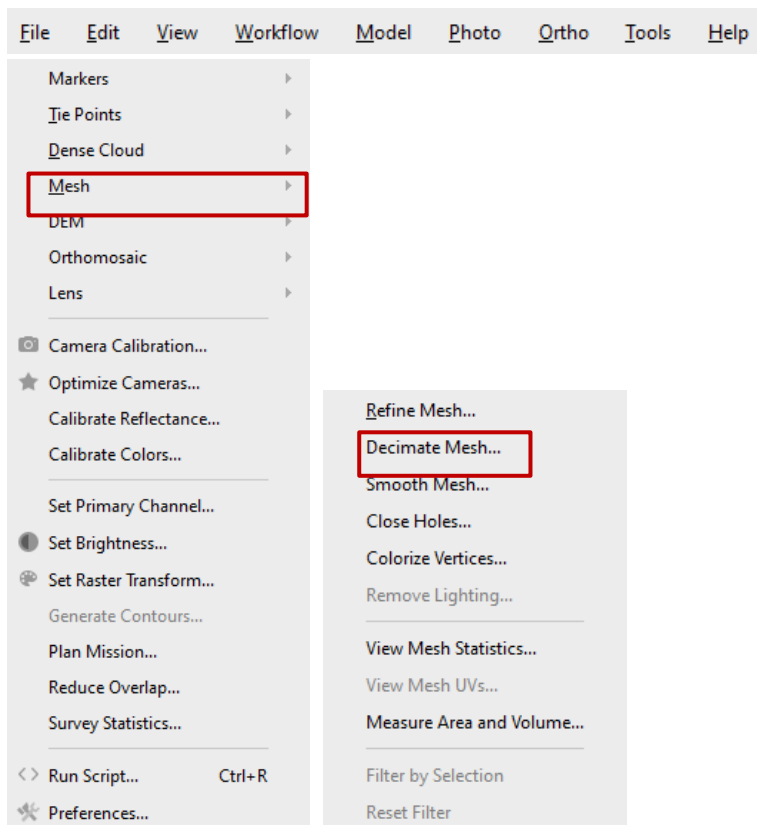


Juhul kui mudeli loomisel arvatati võrkmodelile ka värvid, siis peaksid valima **Vertex colors** sätte ja see info kaasatakse eksporti. Lisaks tasub valida **Vertex normals** säte. Järgnevalt klikki OK, et mudeli eksport teostada.

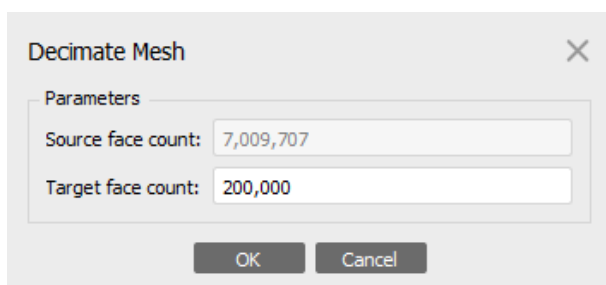
### Võrkmodeli lihtsustamine

Juhul kui tarkvara kuhu võrkmodel järgnevalt imporditakse ei suuda seda visualiseerida/kuvada ning see on siiski oluline, tuleb vähendada tahkude arvu. Sellisel juhul vähendatakse geomeetrilist resolutsiooni ning algsest võrkmodelist saadakse lihtsustatud võrkmodel. Samas peaks lihtsustatud mudel esitama objekti tegelikku geomeetriat ja seda võimalikult suure täpsusega. Mudeli lihtsustamiseks vali: **Tools > Mesh > Decimate Mesh**.

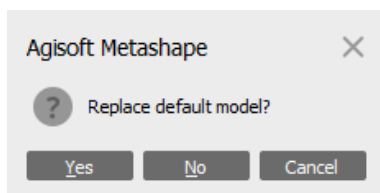




Kuvatakse dialoog, milles on võimalik määrata sobiv tahkude arv: **Target face count**.

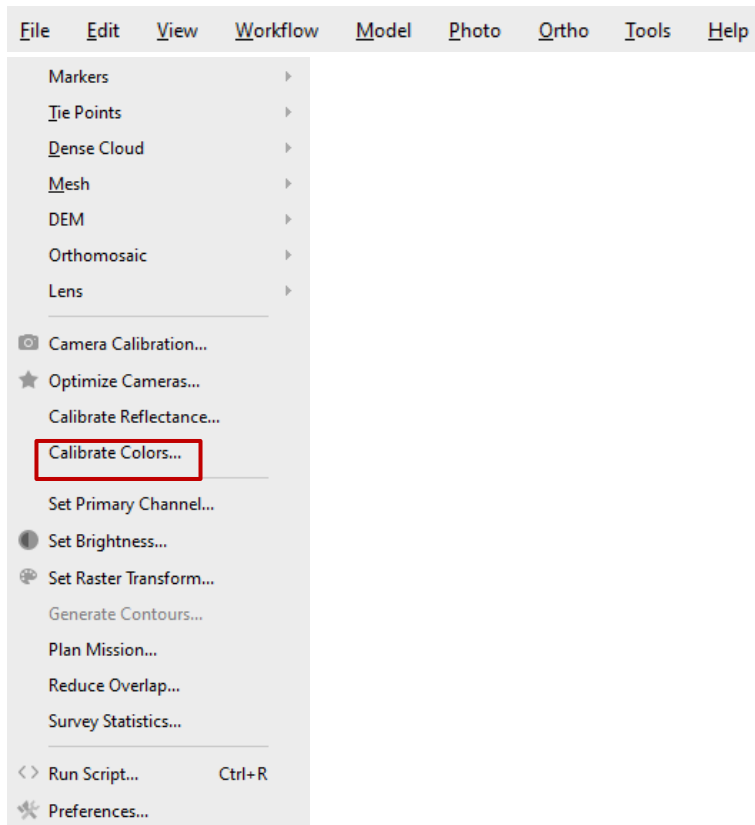


Olles tahkude arvu määranud, sulge dialoog OK nupust. Juhul kui tarkvara küsib, kas algne mudel asendada, siis on soovitatav siiski valida **No** valik.

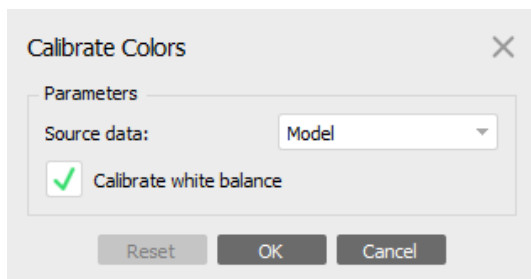


## Ortomosaigi loomine

Lähtuvalt arvutatud võrkmodelist saab koostada ka ortomosaigi. Pane tähele, et sarnaselt võrkmodelile lähtub ka ortomosaik arvutusala määratud perimeetrist. Enne arvutust tasub aga kalibreerida mudeli värvitoone (eriti kui drooni lennuajal on valgustustingimused muutunud). Selleks vali: **Tools > Calibrate Colors...**

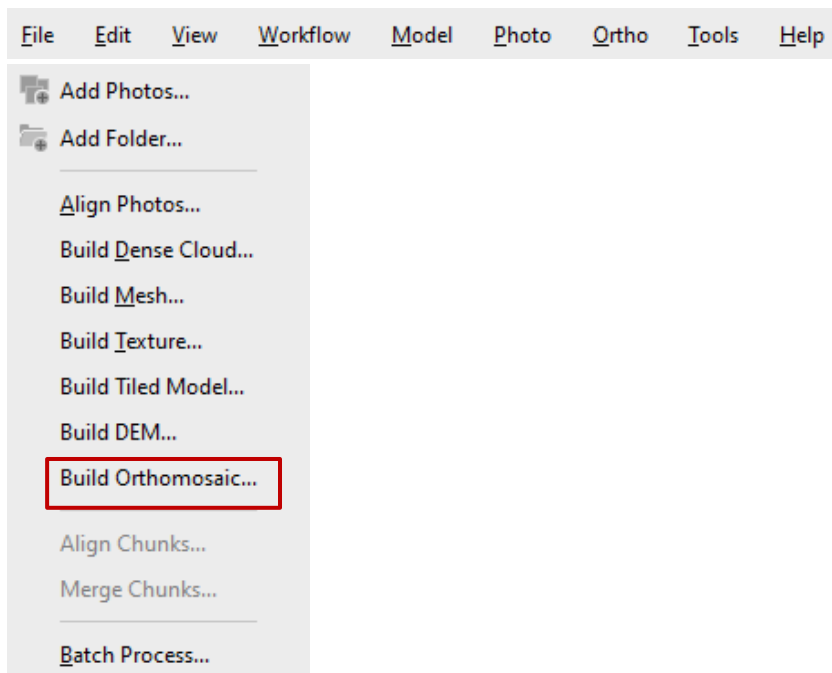


Avanevas dialoogis veendu, et **Source data = Model**. Lisaks on soovitav valida ka **Calibrate white balance**.

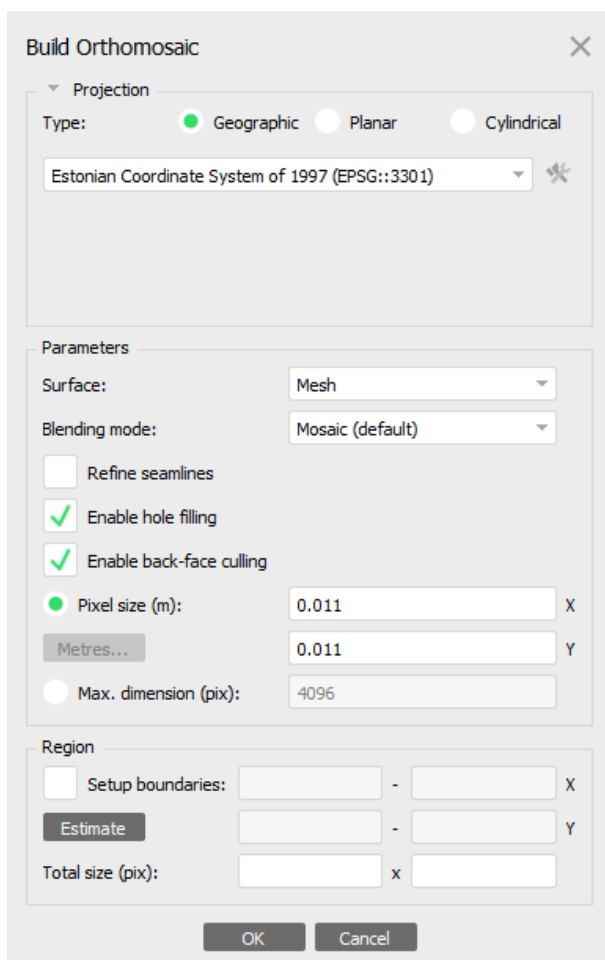


Sulge dialoog läbi OK valiku. Mudeli värvid on nüüd kalibreeritud.

Vali menüüst: **Workflow > Build Orthomosaic...**



Avanevas dialoogis veendu, et **Projection** = **Geographic**, ning et **Coordinate System** oleks **Estonian Coordinate System of 1997**.



Veendu, et **Surface** = **Mesh**. Samas on üsna levinud, et ortomosaiiki arvutatakse **DEM** (ingl *Digital Elevation Model*) baasil, kuid selleks peab esmalt DEM mudeli looma/arvutama,

mistõttu võibki lähtuda juba olemasolevast võrkumodeli arvutusest. Lõpptulemus ei tohiks sellest sõltuda.

**Blending mode** – võib kasutada **Mosaic (default)** valikut, mis sisuliselt kombineerib üksikute piltide baasil piksli väärtused (samas asukohas) lähtuvalt värvitoonide sagedusest. Samas võib valida ka *Average* (kasutatakse keskmist värvitooni kõikide piltide baasil leituna) või *Disabled* (valib piksli väärtuse, mis paikneb kaamera vaatele kõige lähemal – pinnanormaali baasil).

**Refine seamlines** – mõeldud rohkem DEM-baasil loodavatele ortomosaiikidele. Selle sätte aktiveerimine vähendab visuaalseid ebakooskõlasid luues juhtjooni, mis võimaldavad täpsustada nt hoonete piirjooni.

**Enable hole filling** – aitab vältida pildiga seotud moonutusi detailsetel pindadel, kus detailid võivad üksteisele varju heita (soovitav on see säte valida).

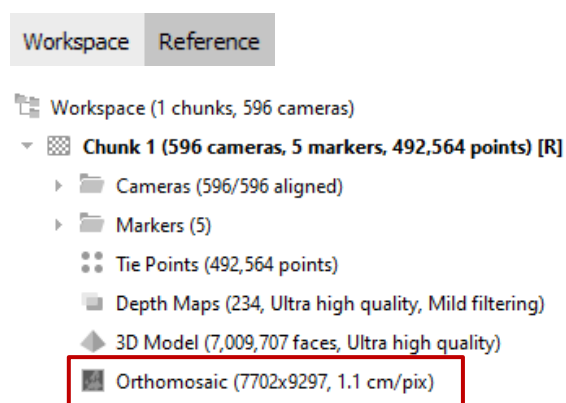
**Enable back-face culling** – võimaldab välja jätta need pindade osad, mille pinnanormaalid on vastupidised projekteeritud pinna suhtes. Seeläbi on võimalik suurendada arvutusefektiivsust (seega tasub aktiveerida).

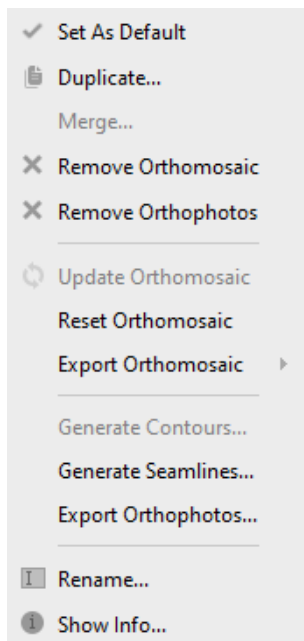
**Pixel size** – peaks olema suurem või võrdne pikslile vastava kaugusega maapinnal (ingl *ground sampling distance*, GSD). Väiksem väärtus suurendab pikslite arvu kui mitte efektiivset resolutsiooni.

Kui soovitakse redigeerida ortomosaiigi ala, saab kasutada sätet **Region**. Samas ei tohiks perimeetri punktid asuda varem defineeritud perimeetri alast väljapool. **Estimate** võimaldab hinnata ortomosaiigi andmemahu lähtuvalt valitud alast ning resolutsioonist.

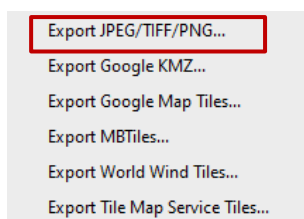
Peale seadete määramist saab liikuda ortomosaiigi loomise juurde, kliki OK.

Ortomosaiigi eksportimiseks vali: **Workspace** > tee paremkliik > **Orthomosaic** > **Export Orthomosaic**.





Seejärel vali sobi faili formaat. Kui ei soovita just spetsiifilist formaati (nt kuvamaks tulemit *Google Earth* rakenduses), on soovitatav valida **Export JPEG/TIFF/PNG**.



Kuvatavas dialoogis veendu, et **Coordinate System = Estonian Coordiante System of 1997**. Juhul kui eksportida TIFF formaati (soovitatav) võivad ülejäänud sätted jääda vaikimisi seadetele.



**Pixel size** – vaikumisi sama väärtus, mis ka ortomosaigi loomisel. Juhul kui eksporditav pilt on liiga suur (TIFF formaadi piirang on 4 GB), saab kasutada väiksemat resolutsiooni. Seega, *Pixel size* väärtust saab vajadusel vähendada. Resolutsiooni tõstmisel pole siinkohal mõtet, kuna see ei muuda efektiivset resolutsiooni (jääb samaks). Teisisõnu, sellega suurendatakse lihtsalt faili mahtu.

Kui faili suurus on probleemiks, võib kasutada sätet **Split in blocks**. Sellisel juhul jagatakse ortomosaik mitme faili vahel, milles jäetakse alles lähteresolutsioon (see on ka soovitatav valik resolutsiooni vähendamise asemel).

Lisaks on võimalik valida **Write BigTIFF file**, mis lubab ekspordida ka suuremaid TIFF faile kui 4 GB, kuid mitte kõik välised tarkvarad ei pruugi seda formaati toetada.

Juhul kui eksporditavaks faili formaadiks on midagi muud kui TIFF, tuleb valida ka **Write World file**. See on oluline, et hiljem oleks võimalik pilti georefereerida. Pane tähele, et vastav info lisatakse TIFF faili automaatselt ning **World file** loomine ei ole siis vajalik.

**Write KML file** säte on vajalik siis kui soovid ortomosaiki kasutada *Google Earth* rakenduses. Samas saad selle valida vaid olukorras, kus koordinaatsüsteem on valitud kui WGS84 (*Google Earth* ei toeta teisi koordinaatsüsteeme).

Juhul kui ortomosaiik eksporditakse JPEG formaati, saab seadistada **JPEG quality** sätet, mis sisuliselt kasutab erinevat kokkupakkimise ulatust, mis otseselt mõjutab ka kvaliteeti. Mida suurem on see number, seda kvaliteetsem on tulemus, aga seda siis suurema failimahu arvelt.

Peale seadete ülevaatamist kliki **Export** ning ortomosaiik luuakse soovitud asukohta (sh saad veel valida faili formaati, kuid soovitatav on jääda TIFF / GeoTIFF juurde).

### 3.2 Vigade analüüs

Mudeli loomisel on teatud kasutusjuhtumite juures oluline tagada selle ruumiline täpsus. Seetõttu tuleb mudelit valideerida ning teostada veaanalüüs. Täpsuse hindamiseks on vaja valideerimispunkte (ingl *check points* – CP) ning georefereerimiseks ja joondamise täpsustamiseks maapealseid kontrollpunkte (ingl *ground control points* – GCP). Siinkohal keskendume kahele erinevale veaanalüüsi lõpptulemusele: (a) hoone mõõdistamise veaanalüüs ning (b) sõidutee mõõdistamise veaanalüüs. Mudeli valideerimist saab teostada hõreda punktipilve baasil nii otsese (kasutades RTK-GNSS UAV-d; mudel on georefereeritud rakendades joondamisel piltide koordinaate) kui ka kaudse georefereerimise korral (kasutades RTK võimekuseta drooni; mudel on georefereeritud maapealsete kontrollpunktide abil). Tuleb meeles pidada, et georefereerimise ning valideerimise punktid ei tohi omavahel kattuda.

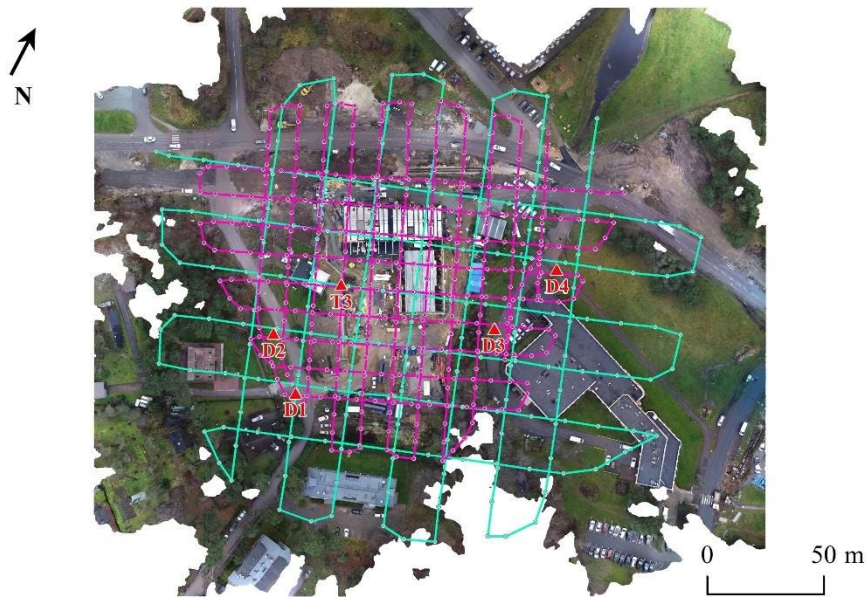
#### 3.2.1 Hoone mõõdistamise veaanalüüs

Hoone valideerimise näide on läbi viidud pilootala Mäepealse 3 (TalTech linnaku õppehoone) juures. Mäepealse kontrollpunktid on esitatud tabelis 3.1 ning märgitud koos drooni lennutrajektooridega joonisele 3.1.

Tabel 3.1. Kontrollpunktide koordinaadid Mäepealse 3 ümbruses

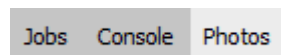
Punkti nimetus	X koordinaat	Y koordinaat	Geodeetiline kõrgus (m)	Absoluutne kõrgus (m)
D1	6584223.949	537433.879	44.344	26.226
D2	6584242.362	537413.630	44.308	26.190
D3	6584287.718	537496.957	41.116	23.001
D4	6584322.686	537509.027	40.919	22.806
T3	6584274.374 *	537429.787 *	44.456	26.340

\* T3 võib olla ebatäpne ning seda ei saa kasutada valideerimisel, kuid võib kasutada georefereerimisel.

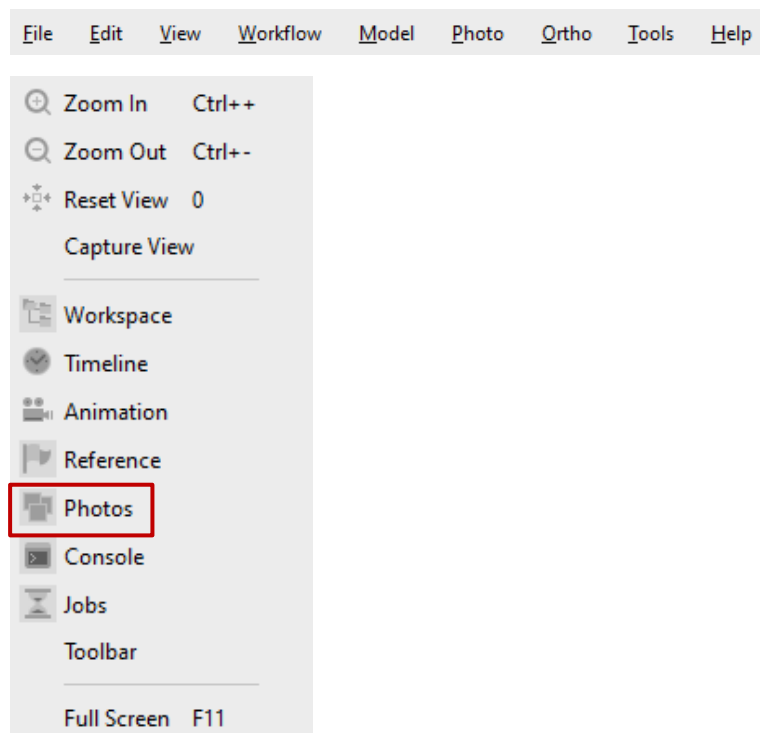


**Joonis 3.1.** Ortomosaik Mäepealse 3 pilootalast ühes drooni lennutrajektooride ning maapealsete kontrollpunktide paiknemisega (Varbla et al., 2020)

Mudeli valideerimiseks on vaja antud punktid leida mudelist. Veendu, et näed paani **Photos**.



Juhul kui antud paan ei ole kuvatud, vali see: **View > Photos**.



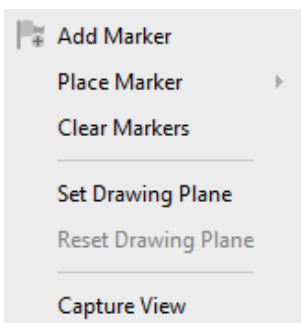
Fotode paanilt vali juhuslik pilt, mis kuvatakse seejärel tarkvara peamises vaateaknas. Täpsete koordinaatide saamiseks mudelist on soovitatav valida pilt nii, et kontrollpunkt jääks enam-vähem alloleval pildil näidatud punase sõõri sisse.



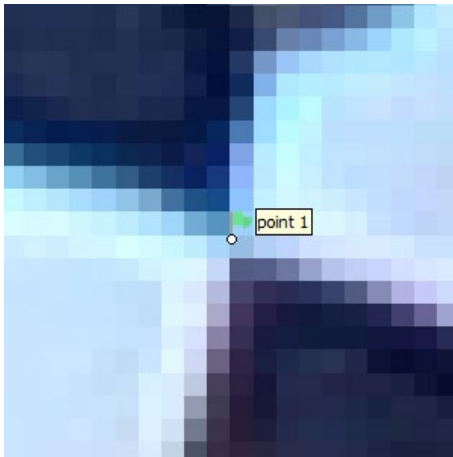
On oluline, et kontrollpunkti keskpunkti saab täpselt tuvastada. Näiteks:



Üldiselt peaksid kontrollpunktid (nt matid) olema joondatud UAV liikumise suunas (sellisel juhul on keskpunkti lihtsam tuvastada). Järgnevalt tee paremklikk punktis, kuhu soovid lisada markerit. Kuvatakse menüü, kus vali **Add Marker**.



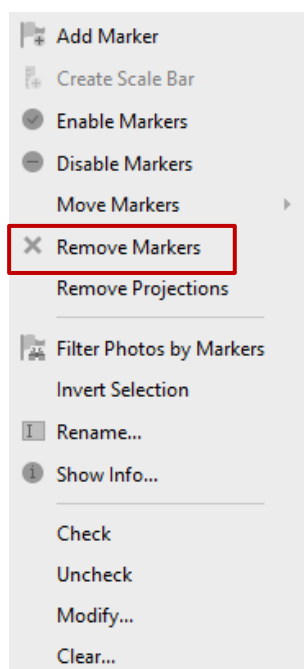
Seejärel kuvatakse marker pildil (roheline lipuna).



Koordinaadid (**Easting, Northing, Altitude**), mis on markeriga seotud, on lõplikud ning need kuvatakse **Reference** paanil. Need väärtused ei muutu ka siis kui markerit pildil korrigeeritakse. Veendu, et markeri ees ei oleks linnukest.

Workspace		Reference						
Markers		Easting (m)	Northing (m)	Altitude (m)	Accuracy (m)	Error (m)	Projections	Error (pix)
<input type="checkbox"/>	point 1	537496.977327	6584287.701684	41.059705	0.005000	0.000000	50	0.000
<b>Total Error</b>								
Control points								
Check points						0.000000		0.000

Kui on vaja markeri asukohta täpsustada, pead selle lisama uuesti. Selleks tee paanil **Reference** vastava markeri peal paremklikk (vt eelmist pilti, **point 1**; veerg **Projections** näitab mitmel erineval pildil antud marker on esindatud) ning vali **Remove Markers**. Seejärel paiguta marker uuesti.



Seejärel on soovitatav leida vähemalt 5 pilti, milles antud marker on esindatud erinevate vaatenurkade all, ning milles on keskpunkti võimalik selgelt eristada. Neil piltidel tuleb marker seadistada täpselt kontrollpunkti keskele. Selle tulemusel muutub markeri viga veerus **Error** (see on jääkvea vektorite keskmine pikkus).

Markers	Easting (m)	Northing (m)	Altitude (m)	Accuracy (m)	Error (m)	Projections	Error (pix)
point 1	537496.977327	6584287.701684	41.059705	0.005000	0.007056	48	0.112
<b>Total Error</b>							
Control points							
Check points							
					0.007056		0.112

Antud viga iseloomustab kui täpselt on paigutatud esialgne marker. Kui viga on suur, tuleks marker eemaldada ning paigutada uuesti mõnel teisel pildil (vaatenurgal). Viga võiks jääda alla 0.01 m (või siis vähemalt alla piksli poolt määratud distantsti väärtust – ingl *ground sampling distance*), kuna see mõjutab otseselt valideerimise tulemust.

Veakomponentide nägemiseks vali säte **View Errors (Reference** paan). Kui soovid naasta koordinaatide vaatesse, vali **View Source**.

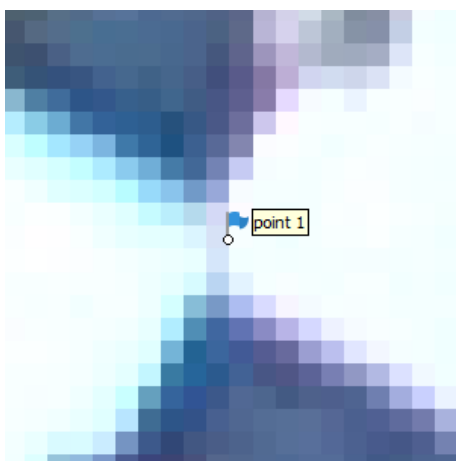


Seejärel kuvatakse vea komponendid:

Markers	East err (m)	North err (m)	Alt. err (m)	Accuracy (m)	Error (m)	Projections	Error (pix)
point 1	0.001279	-0.002002	0.006644	0.005000	0.007056	48	0.112
<b>Total Error</b>							
Control points							
Check points							
	0.001279	0.002002	0.006644		0.007056		0.112

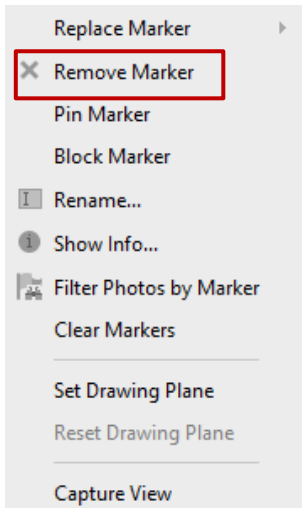
Pane tähele, et **Alt. err** on tavaliselt suurim, kuna see on seotud markeri projektsiooniga maapinnale. Täpse veahinnangu saab siis, kui kõik pildid, millel leidub esitatud kontrollpunkt, on ükshaaval täpsustatud. Samas võib selle sammu jätta vahele, kuna see ei mõjuta mudeli lõpliku valideerimist. Küll aga lisab see usaldusväärsust.

Kui markerit ei ole täpsustatud, kuvatakse see sinise alatooniga.

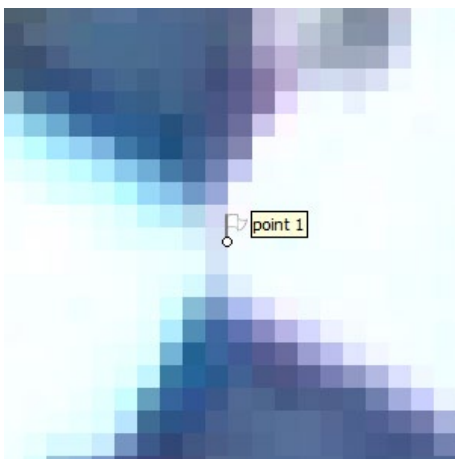




Peale markeri redigeerimist muutub see roheliseks. Kui kontrollpunkti keskkoha ei ole võimalik määrata, tuleks antud projektsioon eemaldada. Selleks tee paremkliik markeri ringjoonel ning vali **Remove Marker** (sõltumata eksitavast nimetusest eemaldab see antud projektsiooni ning mitte kogu markeriga seonduva informatsiooni).



Sellisel juhul kuvatakse marker valge värviga.



Kui marker asub juba kontrollpunkti keskel, vali **Pin Marker**. Sellisel juhul muutub marker roheliseks. Pane tähele, et **Remove Marker** sätet tuleks kasutada olukorras, kus kontrollpunkt on pildi vasakus/paremas või ülaseras, kuna pilt võib olla selles osas moonutatud.

Peale markerite lisamist (iga kontrollpunkti mahus) ja nende täpsustamist kõikidel pildidel peaks jõudma analoogselt tulemuseni nagu alloleval pildil.

Markers	Easting (m)	Northing (m)	Altitude (m)	Accuracy (m)	Error (m)	Projections	Error (pix)
<input type="checkbox"/> point 1	537509.060878	6584322.681082	40.872283	0.005000	0.008250	36	0.318
<input type="checkbox"/> point 2	537429.794762	6584274.368014	44.393388	0.005000	0.000737	40	0.410
<input type="checkbox"/> point 3	537496.974410	6584287.709404	41.035494	0.005000	0.022003	47	0.308
<input type="checkbox"/> point 4	537413.624326	6584242.340731	44.258457	0.005000	0.007600	35	1.682
<input type="checkbox"/> point 5	537433.877893	6584223.924206	44.297827	0.005000	0.005015	28	0.383
<b>Total Error</b>							
Control points							
Check points					0.011275		0.796

Nüüd kuvab veerg **Error** lõplikku markeri viga, mis põhineb veerus **Projections** kuvatud projektsioonide arvul (peale ebamääraste projektsioonide eemaldamist, vasakus/paremas ning ülaservas ja olukorras, kus keskpunkti ei olnud võimalik määrata). Pane tähele, et alati ei ole võimalik viga saada väiksemaks kui 0.025 m mudeli moonutuste tõttu (seda saab kirjeldada maksimaalse veana), kuna **Alt. err** komponent mõjutab selle väärtust.

Töömahukam, kuid kindlam on meetod milles paigutatakse marker igale huvipakkuvale pildile uuesti. Selliselt saadakse suur hulk koordinaate, mis kõik kirjeldavad ühte ja sama punkti. Saadud koordinaatide keskmistamisega leitakse seejärel punkti tõenäoliseimad koordinaadid. Sellisel juhul ei pöörata tähelepanu veerus **Error** kuvatavale informatsioonile (kuna projektsioone ei täpsustata, siis jääb see alati 0).

Antud protsessi lõpptulemusena saame UAV poolt leitud koordinaadid. Kui seda võrrelda tabel 2.1 poolt esitatud väärtustega, saamegi mudeli enda vea. Veaanalüüsi koondtulemused Mäepealse 3 näitel on esitatud artiklis Varbla et al. (2020).

### 3.2.2 Sõidutee mõõdistamise veaanalüüs

Sõidutee valideerimine on läbi viidud pilootala Kose-Võõbu maantee juures. Valideerimiseks on kasutatud terrestrilist laserskaneerimist a priori täpsusega 2 mm. Maapealsed kontrollpunktid on esitatud tabelis 3.2 ning joonisel 3.2. Drooni ülelend on teostatud erinevatelt kõrgustelt (40 m, 50 m, 60 m).

Tabel 3.2. Kontrollpunktide koordinaadid Kose-Võõbu lõigul

Punkti nimetus	X koordinaat	Y koordinaat	Geodeetiline kõrgus (m)	Absoluutne kõrgus (m)
n01	6544819.151	583562.740	94.842	76.406
n09	6544801.084	583635.319	94.790	76.356
n17	6544788.116	583693.062	94.776	76.343
n25	6544770.839	583766.122	94.766	76.334
c04	6544801.773	583596.732	95.019	76.584
c12	6544788.048	583655.177	94.989	76.555
c14	6544784.903	583669.481	94.982	76.548
c22	6544772.668	583727.866	94.947	76.514
s01	6544802.179	583558.097	94.840	76.404
s09	6544784.039	583631.025	94.791	76.356
s17	6544771.275	583689.169	94.779	76.345
s25	6544759.035	583763.045	94.785	76.353



Joonis 3.2 Kose-Võõbu uus 2+2 lõik vahetult enne selle liitumist vana Tallinn-Tartu maanteega. Lõigu pikkus 210 m. Siniste sümbolitega on tähistatud maapealsed kontrollpunktid.

Mõõdistatud ala suurus on ca 8000 m<sup>2</sup>. Antud mõõdistusala on valitud perspektiiviga uurida deformatsioone, mistõttu maapealseid kontrollpunkte on lisatud tihedamalt. Drooni lennuplaanid koostati sarnaselt Mäepealse 3 lennuplaanile, ehk siis vaadeldaval alal lennati kahes omavahel risti olevas suunas. Piltide arv sõltuvalt lennu kõrgusest jäi vahemikku 368 - 639 (60 m, 50 m, 40 m). Fotogrammeetria on teostatud Agisoft Metashape Professional tarkvaras. Arvutuse seaded on kirjeldatud lahti varasemates peatükkides. Piltide joondamise täpsus (ingl *alignment*) on seatud väärtusele *Highest*. Drooni kaamerat ei ole eraldiseisvalt kalibreeritud, ehk siis kasutatud on isekalibreerimist. Modelleerimine (3D mudeli loomine) on teostatud kvaliteedisättega *High*. *Ultra high* välistati asjaolul, et siin näites on tegemist pinnaobjekti modelleerimisega. Ehkki tegemist on pinnaobjekti loomisega, on modelleerimisena kasutatud 3D sätet ja mitte 2.5D sätet, et vältida pörkepiiretest tekkivaid moonutusi. Analüüsi käigus on võrreldud erinevaid lähenemisviise skaneerimisandmetest saaduga ja leitud keskmised ruutvead.

### Otsene georefereerimine

Georefereerimisel on kasutatud vaid kaamera enda koordinaate (saaduna navigatsiooni andmetest). Tulemused on esitatud tabelis 3.3.

Tabel 3.3. Otsene georefereerimine, veaanalüüs lähtuvalt terrestriisest laserskaneerimisest

Lennukõrgus (m)	Keskmine erinevus (m)	Standardhälve (m)	RMSE (m)
40	-0.1272	0.0074	0.1274
50	-0.1348	0.0066	0.1349
60	-0.0988	0.0069	0.0991

### **Integreeritud georefereerimine (0.005 m)**

Lisaks kaamera positsioonidele on sõiduteel märgitud 12 maapealset kontrollpunkti (vt joonis 3.2 ning tabel 3.2), millega täpsustati joondamist. Kasutati maapealsete kontrollpunktide vaikumisi täpsust (0.005 m). Tulemused on esitatud tabelis 3.4.

**Tabel 3.4.** Integreeritud georefereerimine, veaanalüüs lähtuvalt terrestrilisest laserskaneerimisest

<b>Lennukõrgus (m)</b>	<b>Keskmine erinevus (m)</b>	<b>Standardhälve (m)</b>	<b>RMSE (m)</b>
40	0.0047	0.0044	0.0064
50	0.0049	0.0045	0.0067
60	0.0064	0.0056	0.0085

### **Integreeritud georefereerimine (0.000 m)**

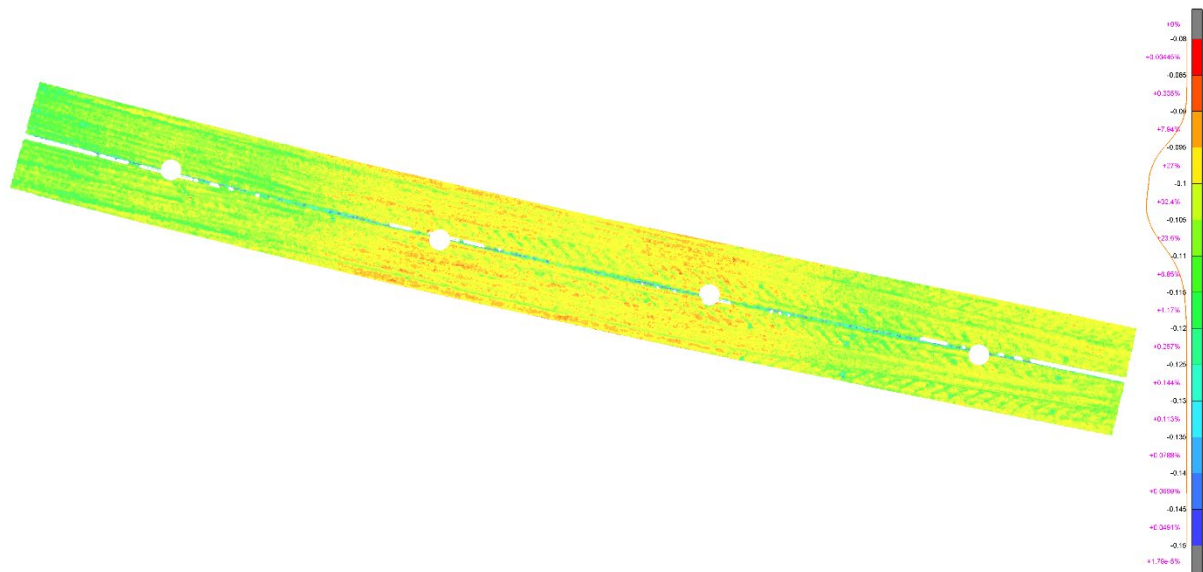
Lisaks kaamera positsioonidele on sõiduteel märgitud 12 maapealset kontrollpunkti (vt joonis 3.2 ning tabel 3.2), millega täpsustati joondamist. Kasutati maapealsete kontrollpunktide täpsust 0. Tulemused on esitatud tabelis 3.5.

**Tabel 3.5.** Integreeritud georefereerimine, veaanalüüs lähtuvalt terrestrilisest laserskaneerimisest

<b>Lennukõrgus (m)</b>	<b>Keskmine erinevus (m)</b>	<b>Standardhälve (m)</b>	<b>RMSE (m)</b>
40	-0.1283	0.0074	0.1285
50	-0.1354	0.0065	0.1356
60	-0.0998	0.0069	0.1001

### **Kokkuvõte**

Juhul kui kasutada ainult kaamera koordinaate tekib kausiefekt ning vertikaalne nihe (sõltumata valitud lennukõrgusest, joonis 3.3), mis on suuresti tingitud kaamera isekalibreerimise vigadest.



**Joonis 3.3** Drooni 3D mudeli (lennukõrgus: 60 m) valideerimine (vt ka Tabel 2.3). Negatiivsed väärtused tähendavad, et drooni mudel on terrestrilisest laserskaneerimisest kõrgemal

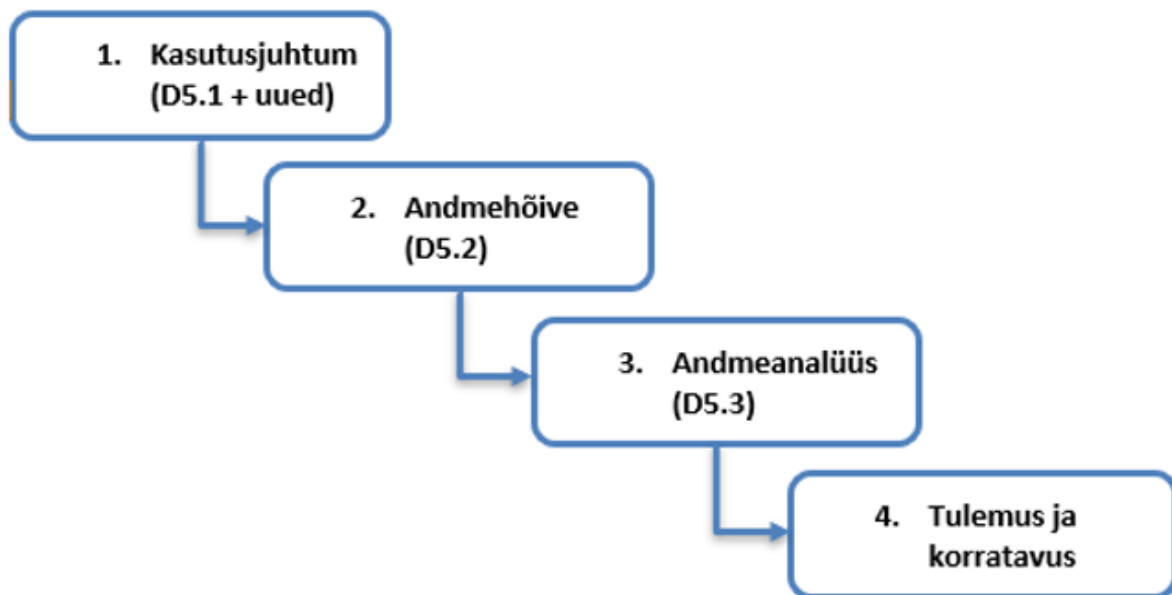
Integreeritud georefereerimine (maapealsete kontrollpunktide täpsus 0.005 m) vähendab mõlemat viga (võrdle tabeleid 3.3 ja 3.4). Oluline on märkida, et juhul kui kasutada integreeritud georefereerimist, siis maapealsete kontrollpunktide täpsust ei tohiks seada 0. Tulemus sellest ei parane, vaid muutub pigem kehvemaks. Juhul kui sõidutee on joonitud (üldjuhul tekivad sellega kõrgemad alad), võib see tekitada lisaprobleeme drooni mõõdistusest saadud 3D mudeli loomisel (jooniselt 3.3 saab välja lugeda, et droonimudel ühtlustab teekattemärgistuse). Samas tasub rõhutada, et see omakorda sõltub kasutusjuhust, milleks mõõdistustulemusi hilisemalt kasutatakse.

#### 4. Hinnangud ja soovitused (kasutusjuhud)

Kirjanduse ülevaatest ning piloteerimise tulemusena on toodud välja kasutusjuhud, mis lähtuvad erinevatest vajadustest. Nii nagu varasemalt mainitud, siis need kasutusjuhud võib jagada kahte suurde gruppi: (a) 2D muutuste tuvastamine ning (b) 3D muutuste tuvastamine. Ehitusprotsessi tähenduses on kõige suuremat tulu loota järjepidevast mõõdistusest (kaugseirest) ja seda sõltumata sellest, kas soovitakse 2D või 3D rakendust/tulemust. Üks olulisemaid faktoreid, millega korduval mõõdistusel arvestada, on andmete kogumisele kuluv aeg ning andmete töötusaeg ja selle automatiseerimine (nt fikseeritud drooniseire programm, mis tagab andme kogumise samadest georuumi punktidest ja teeb ka toorandmete omavahelise võrdluse väga lihtsaks). Eriti olukorras, kus seda on vaja teha igapäevaselt. Siin tuleb kriitiliselt hinnata nii aja-, riist- ja tarkvarakulu. Riist- ja tarkvarakulu on drooniseire andmete efektiivsemaks töötamiseks võimalik asendada veebteenuse kasutamisega, mis võimaldab drooni toorandmeid automaatselt töödelda ja näiteks juba järgmiseks tööpäevaks tulemuse anda (veebipõhises rakenduses).

Projekti raames on analüüsitud olemasolevaid lahendusi või ettepanekuid lähtuvalt erinevatest kaugseire meetoditest. Ehkki tehnoloogia arenguga muutub ka kaugseire võimekus ei üritata siinses tulemis otseselt korrata kirjanduse ülevaates toodud ettepanekuid,

vaid esitada nende edasiarendusi. Antud tulek käsitleb kahte gruppi kaugseire meetodeid: (a) aerolaserskaneerimise ning (b) droniseire baasil loodud prototüübid. Satelliitseire osas uusi prototüüpe välja töötatud ei ole ning asjast huvitatu peaks lähtuma ülevaatest, mis on toodud esimeses peatükis ning tutvuma projekti raames toimunud seminari materjalidega (vt Kaugseire ehitussektoris, 2019). Prototüüpide loomisel on olnud oluline roll vigade analüüsil, mille juures on kasutatud teisi kaugseire meetodeid (nt terestriiline laserskaneerimine). Prototüübid lähtuvad joonise 4.1 toodud üldisest töövoolust.



Joonis 4.1 Prototüüpide tuletamise põhiskeem

Seega lähtub prototüüp esmalt võimekusest kasutada kaugseiret ehitustegevuse kaardistamiseks või ehitusprotsessi jälgimiseks (1). Seejärel valitakse selleks sobiv kaugseire meetod ning teostatakse andmehõive (2). Andmehõivele järgneb eelnevalt paika pandud andmeanalüüs (3), mis tagab soovitud tulemuse, täpsuse ning vajadusel ka korratavuse (4).

Prototüübid lähtuvad ehitusinfo mudelite ja nende haldamisega seotud töövoolude vajadustest. Ehitusinfo modelleerimine (ingl *building information modelling*, BIM) on üks levinumaid viise, kuidas ehitussektor efektiivsemalt tööle panna, milles suur roll on tehnoloogia ärakasutamisel.

#### 4.1 Aerolaserskaneerimisel baseeruvad prototüübid

Aerolaserskaneerimise juures on lähtunud Maa-ameti poolt avalikustatud kõrgusandmetest (Maa-amet, 2018). Need andmed on tehtud vabalt kättesaadavaks alates 2018. aastast ning katavad erineva resolutsiooniga kogu Eestit. Andmeid uuendatakse maksimaalselt 4 aasta tagant, mis seab andmete kasutamisele (kasutusjuhtumitele) teatud piirangud. Antud projekti raames keskendutakse nende andmete juures ühele prototüübile.



#### 4.1.1 Prototüüp: Maa-ameti kõrgusandmetel baseeruv 3D pinnamudel

Selleks, et ehitise planeerimisetapis oleks võimalik vastu võtta paremaid ja täpsemaid otsuseid, on vajalik usaldusväärsete andmete olemasolu, mis tagaks erinevate alternatiivide võrdluse. Planeerimisetapis on keskne roll ehitusmahtude hindamisel, mis tuleneb ennekõike pinnasetöödest (sh kaeve- ja/või täitemahtude hinnangust). Ei ole mõeldav, et näiteks sõidutee koridori planeerimisel teostatakse klassikaline mõõdistamine üle terve huvipakkuva ala (mitu erinevat koridori). Seetõttu on tänased planeerimisotsused reeglina kahemõõtmelised, kus otsus baseerub suuresti koridori horisontaalsel paiknemisel, kusjuures kõrgustega on minimaalselt arvestatud. Maa-ameti kõrgusandmete üle-eestiline kattuvus annab aga suurepärase võimaluse kasutada 3D andmeid erinevate eskiislahenduste optimaalsemal võrdlemisel. Planeerimisetappi iseloomustab tihtipeale ka piiratud ressursside kasutamise võimalus, mistõttu vabalt kättesaadavad Maa-ameti kõrgusandmed on siinkohal suureks abiks. Maa-ameti kõrgusandmed on saadaval erineval kujul (kõrguspunktid, kõrgusmudelid). Antud prototüüp baseerub kõrguspunktidel, kuna see annab kasutajale suurema vabaduse andmete töötamiseks, kuid tasub tähele panna, et ka kõrgusmudelite kohene kasutamine on alternatiiviks. Siin esitatud prototüüpide vaheetapid on tarkvarapõhised, ning ehkki osaliselt on võimalik tegevusi automatiseerida, on suuresti tegemist tüüpilise andmevahetuse ülesandega erinevate tarkvaraliste lahenduste vahel, mis on väga omane ehitusinfo modelleerimise vaatevinklist.

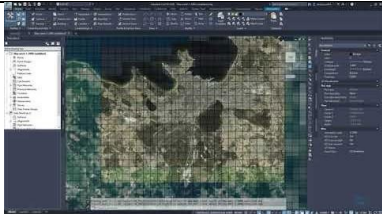
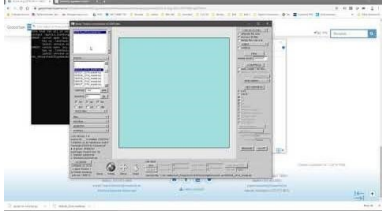
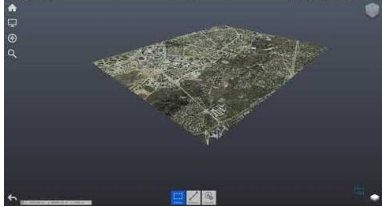
Tabel 4.1 esitab prototüübi, mis on vajalik punktidest kõrgusmudeli loomiseks projekteerijale kättesaadavate töövahenditega (nii tasuta kui tasulised lahendused).

Tabel 4.1. Prototüüp: Kõrgusmudeli kaasamine planeerimisotsuste vastuvõtmiseks.

Tegevus	Kirjeldus
1. Punkt pilve allalaadimine	Punkt pilv esitatakse 1x1 km ruuduna. Suuremate projektide korral (nt sõiduteekoridorid) tuleb seetõttu alla laadida mitu erinevat punkt pilve.
2. Punkt pilve eelfiltreerimine	Vaikimisi sisaldab punkt pilv nii hoonestust kui ka haljastust (puud, põõsad). Kuna Maa-ameti punkt pilve failis on punktid klassifitseeritud, on filtreerimist väga lihtne teostada. Tarkara: LAsTools (vabavara).
3. Filtreeritud punkt pilve konverteerimine	Punkt pilvede failid võivad olla väga mahukad, mistõttu nende lugemine erinevate tarkvaraliste lahenduste poolt võib olla ressursimahukas. Kuna ehitusinfo mudelitega töötamisel on üldjuhul vaja väga võimekat riistvara, siis osaliselt saab riistvaralist koormust vähendada andmete konverteerimise kaudu, milles konverteeritud andmed sobituvad valitud planeerimise tarkvaraga paremini. Projekteerimistarkvara Autodesk toodete kasutamisel on siinkohal näitena valitud: Autodesk ReCap.

<p>4. Konverteeritud punktipilve importimine planeeringu tarkvarasse</p>	<p>Selleks, et planeeringu tarkvaras saaks luua punktipilvel baseeruva pinnamudeli, tuleb see esmalt importida. Kuna antud prototüüp keskendub suuremamahuliste planeeringute koostamisele, on valitud Autodesk InfraWorks. Alternatiivina saab kasutada teisi platvorme, mis tähendab ka teiste vaheetappide ülevaatamist.</p>
<p>5. Punktipilvest maapinna mudeli loomine</p>	<p>Projekteerimise lähteülesanne. Olemasolevast punktipilvest maapinnamudeli loomine (Autodesk InfraWorks).</p>
<p>6. Maapinna mudeli kasutamine planeeringuga seotud otsuste vastuvõtmisel</p>	<p>Maapinna mudelit saab kasutada uue sõidutee koridormudeli ruumiliseks paigutamiseks nii horisontaalselt kui ka vertikaalselt. Seeläbi saame dünaamilise mudeli, kus esitatakse meile nii vajalikud täite- kui ka kaevemahud. Mahud on teedehituse üks suuremaid kulukomponente, ja mida täpsemalt saame erinevaid alternatiivseid lahendusi selles kontekstis võrrelda, seda parem.</p>

Antud prototüüpi (kasutusjuhtu) käsitleb ka allolev videoseeria (Puust, 2020).

Video	Otselink
	<p>01 Maa-ameti kõrguspunktide laadimine:  <a href="https://youtu.be/miHkwXDa6Vo">https://youtu.be/miHkwXDa6Vo</a></p>
	<p>02 Punktipilve filtreerimine:  <a href="https://youtu.be/7f3rH2ZWe0A">https://youtu.be/7f3rH2ZWe0A</a></p>
	<p>03 Punktipilve konverteerimine:  <a href="https://youtu.be/34KIZYqB6Zc">https://youtu.be/34KIZYqB6Zc</a></p>



04 Punktipilvest maapinna loomine:

<https://youtu.be/vHQcmVstZHE>

Maa-ameti aerolaserskaneerimise andmed omavad väga suurt rakendust just esmaste planeerimisotsuste vastuvõtmisel või ehitusinfomudelitele (uutele planeeringutele) konteksti andmisel. Olgu siinkohal toodud lihtsalt üks näide, kus Maa-ameti punktipilve on kasutatud filtreerimata kujul ning seeläbi esitatakse Tallinna Tehnikaülikooli (TalTech) linnakut.



Seeläbi on võimalik konteksti modelleerida (nt asendada punktipilvest saadud haljastus 3D komponentidega või luua üldiseid, ehitisega seotud mahumudeleid, mida on teinud Tallinna Linnaplaneerimise amet (Tallinna aluskaart, 2017). Lisainfot vaata esimesest peatükist ning seminari „Kaugseire Ehitussektorile“ materjalidest. Alloleval joonisel on lisaks prototüübina esitatud Maa-ameti punktipilvest tuletatud maapinnamudelile kaasatud ka Tallinna linna ruumiandmeid. See kõik on kokku viidud projekteerijale kättesaadavas tarkvaras, milles on võimalik jätkata planeerimise täpsustamist (Autodesk InfraWorks, vt videoseeriat: Puust, 2020).





Lisaks on antud konteksti võimalik lisada erinevate projekti staadiumite lõpp-mudeleid (nt eelprojekt, põhiprojekt, tööprojekt jne), mis võivad kaasata juba ehitamisega seotud detailsust. Samas huvitab meid sellistel puhkudel pigem väline detailsus ja vastavate projektide sisemise detailsuse võime jätta kuvamata, mis hoiab oluliselt kokku ka arvutiressurssi.

## 4.2 Drooniseirel baseeruvad prototüübid

Drooniseiret puudutavad kasutusjuhud (prototüübid) ning andmehõive baseeruvad kahel pilootobjektil. Esitatakse need prototüübid, mis iseloomustavad ennekõike ehitusprotsessi, ehk siis kasutusjuhud, milles on vajalik teostada korduvat mõõdistust. Drooniseiret puudutav täpsushinnang on antud varasemas tulemis ning üldised andmeanalüüsid on samuti esitatud samas tulemis; vt ka Varbla et al. (2020). Seetõttu keskendutakse siin alalõigis prototüübi põhisammudele ning lisainfot võib leida varasematest peatükkidest.

### 4.2.1 Prototüüp: Fikseeritud lennuplaaniga ehitusprotsessi kaardistamine

Drooniseiret on väga lihtne kasutada korduvaks ehitusobjekti ülevaatuks, kuna meetodi ligipääsetavus ning ülevaatlikus annab kiire ülevaate hetke olukorrast, kuid on ka väga hea jooksvaks järelevalveks. Mõistagi ei pääse drooniga igale poole ning siinkohal mõeldakse ennekõike ehitise välist vaatlust. Drooni võib lennutada käsitsi juhtimise teel või fikseeritud lennuplaani alusel. Fikseeritud lennuplaanil on mitmeid eeliseid, kuna just seeläbi saame koguda andmeid sisuliselt ühest ja samast vaatepunktist korduvalt, kusjuures drooni piloodil piisab vaid lennuplaan käivitada - pildilise info kogumine käib seejärel juba automaatselt.

Tabel 4.2 esitab prototüübi, mida saab kasutada fikseeritud lennuplaani kaudu ehitusega seotud info järjepidevaks kogumiseks ja analüüsiks.

Tabel 4.2. Prototüüp: Pildiseeria koostamine fikseeritud lennuplaani kasutamisel.

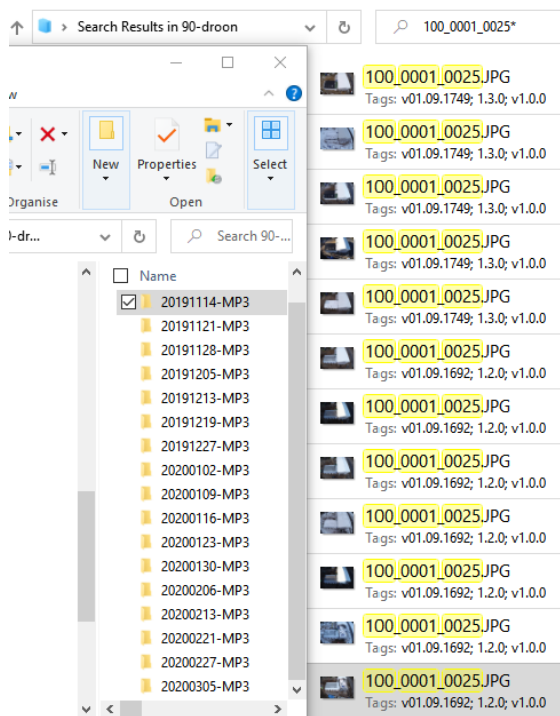
Tegevus	Kirjeldus
1. Planeerimine: Lennuplaani koostamine	Lennuplaani koostamisel pannakse paika meid huvitava ehitusobjekti maa-ala ja lennukõrgus. Lennukõrgus mõjutab ennekõike soovitud detailsust, mida saab

	iseloomustada piksli geomeetrilise suurusega. Sõltuvalt dronist ja kasutatavast kaamerast võib lennukõrguse 50 m juures olla piksli suurus näiteks 1.37 cm.
2. Andmehõive: Drooni lennutamine	Fikseeritud lennuplaani kasutamisel peame arvestama maa-ala suurusega, drooni lennuulatusega, aga ka akukestvusega.
3. Andmeanalüüs: Piltide järjestamine	Fikseeritud lennuplaani korral saame korduvate lendude ühe ja sama vaatenurga vastavast andmekogust kätte pildiseeria numbri järgi.
4. Lennu kordamine	Sõltuvalt eesmärkidest saab lendu korrata igapäevaselt, iganädalaselt või vastavalt üle- ja vastuvõtu aktide graafikule, mis on mõjutatud välistest tegevustest, ja mis on väga lihtsasti fikseeritavad drooni ülelennuga.

Tasub tähele panna, et esimene prototüüp kirjeldab ennekõike piltide kasutamist nende algsel kujul ning andmeanalüüs on minimaalne, vajades lihtsalt piltide järjestamise loogikat. Andmehõive tähenduses saab neid samasid andmeid kasutada ka teiste prototüüpide koostamiseks. Mäepealse 3 pilootala esitab ca 200 erinevat vaatenurka kui lennatakse 50 m kõrguselt ning ca 400 erinevat vaatenurka kui lennatakse 40 m kõrguselt. Allolev pildiseeria esitab vaid ühe vaatenurga ja sellest tulenevalt võimalikke alamkasutusjuhte (nt katuse konstruktsiooni jooksev ehituskulg).



Pildiseeria automaatne nummerdamine (kui on kasutatud fikseeritud lennuplaani), mille baasil on võimalik automatiseerida pildiseeria loomist.



#### 4.2.2 Prototüüp: Ehitusprotsessi mahuline võrdlus

Drooniseseire baasil saab väga lihtsalt koostada 3D mudelid, mille põhjal on võimalik määrata olemasolevaid mahtusid või teostada kahte erinevat ajahetke kujutavate 3D mudelite võrdlust, mis on antud prototüübi fookus. Varasemalt on esitatud andmeanalüüsi näide, kuidas fotogrammeetria teel 3D mudelit luua, ja millele tähelepanu pöörata. Siinkohal esitame prototüübi, mis keskendub juba erinevaid ajahetki kujutavate 3D mudelite võrdlusele. Ehitustegevuste jälgimisel on see väga oluline näitaja, et omada lihtsat võimalust, kuidas näha ajalist edenemist või võrrelda seda projekteeritud ehitusinfo mudeliga ning analüüsida kalendergraafikus püsimist.

Tabel 4.3 esitab prototüübi, mida saab kasutada fikseeritud lennuplaani kaudu erinevatel ajahetkedel kogutud piltide baasil loodud 3D mudelite võrdluseks.

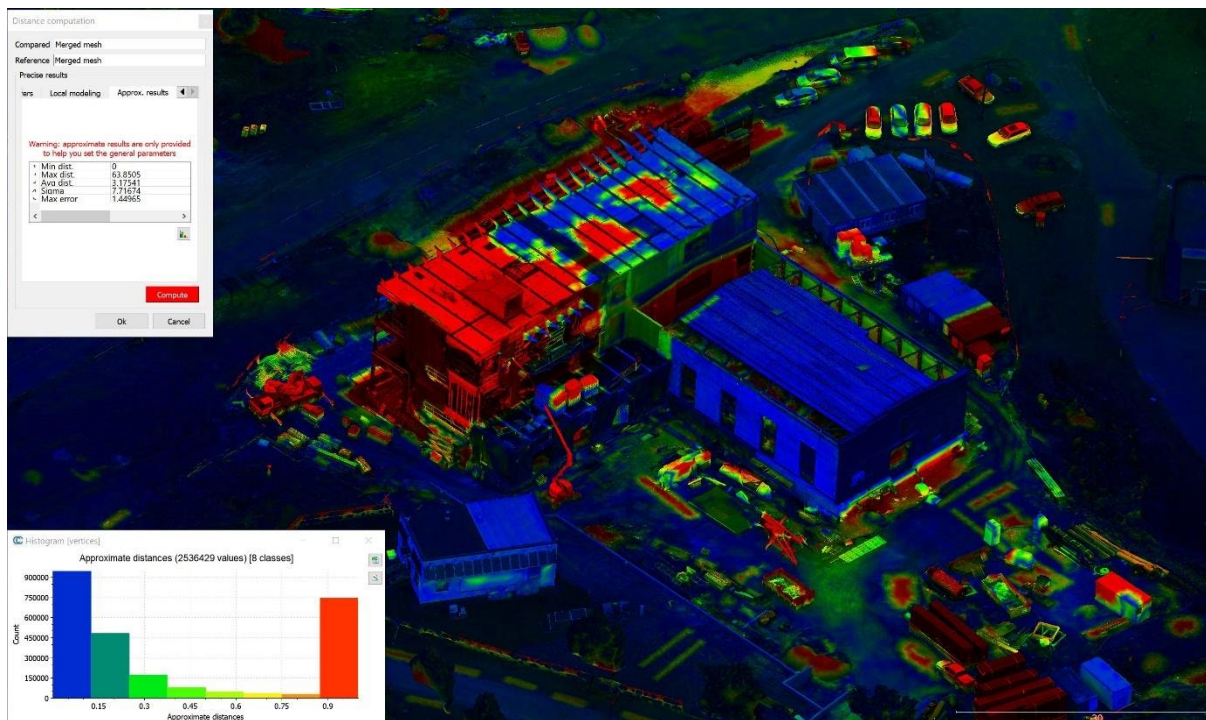
Tabel 4.3. Prototüüp: Ehitusprotsessi mahuline võrdlus.

Tegevus	Kirjeldus
1. Planeerimine: Lennuplaani koostamine	Lennuplaani koostamisel pannakse paika meid huvitava ehitusobjekti maa-ala ja lennukõrgus. Lennukõrgus mõjutab ennekõike soovitud detailsust, mida saab iseloomustada piksli geomeetrilise suurusega.
2. Andmehõive: Drooni lennutamine (erinevatel ajahetkedel)	Fikseeritud lennuplaani kasutamisel peame arvestama maa-ala suurusega, drooni lennuulatusega, aga ka akukestvusega. Drooni lennutatakse vähemalt kahel erineval ajahetkel, mille erinevuseid soovime võrrelda.



3. Andmeanalüüs: 3D mudelite loomine	Fotogrammeetria teel 3D mudelite loomine (igale ajahetkele omaette 3D mudel).
4. Andmeanalüüs: Andmete konverteerimine	Sõltuvalt tarkvarast, milles 3D mudelite võrdlus teostakse, võib olla vajalik algne võrkmodel konverteerida teise formaati.
5. Andmeanalüüs: 3D mudelite mahuline võrdlus	Näitena on kasutatud CloudCompare nimelist tarkvara (vabavara), millesse on kaks 3D mudelit imporditud *.obj formaadis. Vastavad *.obj failid on eksporditud fotogrammeetria analüüsi võimaldavast tarkvarast (nt Agisoft Metashape Professional, Bentley ContextCapture jt). Seejärel toimub nende mahuline võrdlus (nt mahtude eristamine värvikoodiga).

Allolevalt on näide prototüübi (kasutusjuht) lõpptulemusest, milles on kokku tõstetud kahel erineval ajahetkel teostatud drooniseirest saadud 3D mudelid. Värvitoonid toovad kiirelt esile need mahud, mis on kas juurde tekkinud või eemaldatud, maha lõhutud jne.



Antud prototüüpi saab laiendada ka lihtsalt objektide olemasolu kontrolliks mingil kindlal ajahetkel mingis kindlas ruumipunktis.

#### 4.2.3 Prototüüp: Masinnägemise kaudu objektide äratundmise treenimine

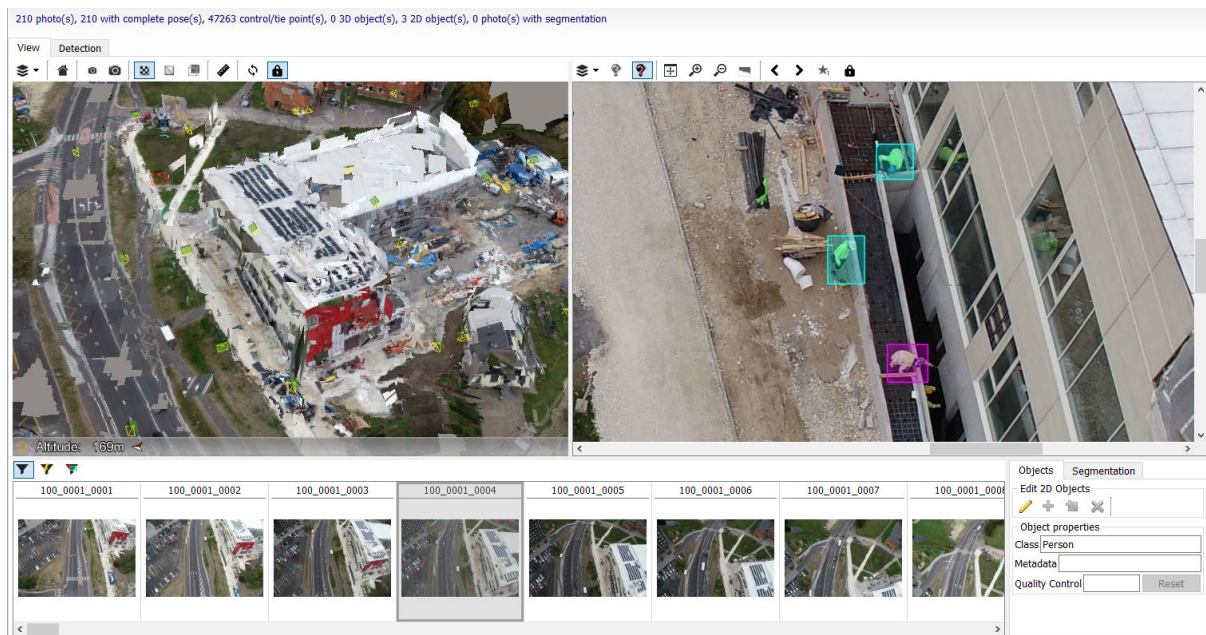
Varasemad prototüübid eeldavad, et meid huvitava iseärasuse fikseerib lõpptulemuse vaatleja ise. Kas siis on tegemist piltidelt millegi fikseerimisega, millegi mõõtmisega või siis 3D mudelitelt (sh nende võrdlustelt) järelduste tegemisega. Ühelt poolt on see küll lihtne, kuid kuna tegemist on inimfaktoriga, siis korduvate iseärasuste äratundmiseks on mõistlikum

kaasata masinnägemise treenitust ning seeläbi automatiseerida teatud komponentide, objektide/subjektide äratundmist. Masinnägemise rakendamine on kaheosaline: (a) detektori treenimine kogutud drooniseire andmete baasil (üldjuhul on selleks vaja mitmeid andmekogumeid, milles meid huvitav objekt on erinevates vaatenurkades esitatud) ning (b) detektori kasutamine uute mõõdistusandmete juures. Masinnägemise põhimõtet (sh analüüsi) olemasoleva detektori baasil on kirjeldatud varasemas peatükis. Siinkohal esitatakse prototüüp uue, kasutaja andmestikul baseeruva, detektori loomiseks (tabel 4.4).

**Tabel 4.4.** Prototüüp: Masinnägemise kaudu objektide äratundmise treenimine ning hilisem taaskasutamine

Tegevus	Kirjeldus
1. Planeerimine: Lennuplaani koostamine	Lennuplaani koostamisel pannakse paika meid huvitava ehitusobjekti maa-ala ja lennukõrgus. Lennukõrgus mõjutab ennekõike soovitud detailsust, mida saab iseloomustada piksli geomeetrilise suurusega.
2. Andmehõive: Drooni lennutamine (erinevatel ajahetkedel)	Fikseeritud lennuplaani kasutamisel peame arvestama maa-ala suurusega, drooni lennuulatusega, aga ka akukestvusega. Drooni lennutatakse korduvalt, et tagada masinnägemise treenimiseks piisav andmehulk.
3. Andmeanalüüs: Masinnägemise treenimine	Masinnägemise treenimine korduvate andmehõivete baasil (piltidelt soovitud objektide esiletõstmine ja detektori loomine – Bentley ContextCapture). Detektorit võib treenida ka mitme erineva objekti äratundmiseks, mistõttu iga objekti jaoks ei pea looma omaette detektorit.
4. Andmehõive: Drooni lennutamine uute andmete kogumiseks	Drooni lennutamine uute andmete kogumiseks, millel varasemalt loodud detektorit kasutada.
5. Andmeanalüüs: Olemasoleva detektori kasutamine p.4 kogutud andmete automaatseks analüüsiks	Soovitud komponentide äratundmine (loendus) ning nende märkimine 3D mudelis (ruumiline paiknemine).
6. Tööprotsessi kordamine (punktid 4-5)	Korduv detektori kasutamine tulevikus kogutava andmehõive kaasamisel.

Masinõpetamise tööprotsessi näide on toodud Mäepealse 3 pilootala juures. Valides fotoseeriast fotosid, alustame nn kastide ümbertõmbamist (vt allolevat pilti) objektidele, mille äratundmist soovime treenida. Antud näide keskendub inimeste äratundmisele. Objektile on antud klassitunnus "Person". Nimetamine on vaba, kuid peaksime sama klassi kasutama samaväärse objekti äratundmiseks. Treenida võib korraka ka mitme erineva objekti vastu. Redigeerimise režiimi tähistab lilla kastike ja objektide, mille juures on redigeerimine lõpetatud, kastid on sinisega. Seeläbi hakkame õpetama tehisintellektile, milline võib pildil üks inimene „välja näha“. Analoogset protsessi tuleb korrata kõikide piltide juures. Teisisõnu, õpetamise või treenimise käigus ei tohi vahele jätta pilte, milles on samaväärseid objekte ehk inimesi võimalik ära tunda. Kui me jätame samaväärse objekti märkimata, siis me sisuliselt treenime tehisintellekti poolikult ja jättes märkimata mõnel pildil mõne inimese võib see viia selleni, et hiljem ei suudeta inimesi uues andmestikus leida.



Detektori loomiseks on vaja treeninginfo (eelnevalt loodud sildid) laadida üles veebiteenusesse (antud näiteks Bentley ProjectWise ContextShare). Peale detektori loomist saab selle alla laadida ning kasutada sarnaste objektide tuvastamiseks uue andmestiku juures.

Märkus: Detektori välja õpetamiseks ei ole ilmingimata vaja kasutada kogu andmestiku, mis siis tervikliku 3D mudeli loob. Näiteks, kui Mäepealse 3 dronilend on mingil ajahetkel teinud ülelennu ja kõikidele piltidele on jäänud 3 inimest, ja need paiknevad ühes ja samas hoone servas, siis toimubki õpetamine ainult selles servas. Selleks ei ole vaja luua 3D mudelit, mis on ajakulukas. Ehk siis treenimine toimub puhtalt piltide baasil, kuid hilisemat otsimist saab siduda loodud 3D mudeliga. Sellest lähtuvalt saab detektorit kasutada ka mistahes teiste 3D esituste juures. Näiteks alloleval pildil otsitakse restkaevu olemasolevast (varasemalt loodud) punktipilvest.

Submit Detection Job
✕

---

**Inference Type**

Inference using CCEngine
  Inference on Cloud

---

**Object detection**

**2D detection**

Run 2D object detection  
 Multi-scale

Detection threshold

Detector folder  Browse...

CC Detector (PWCS)  Browse on PWCS...

---

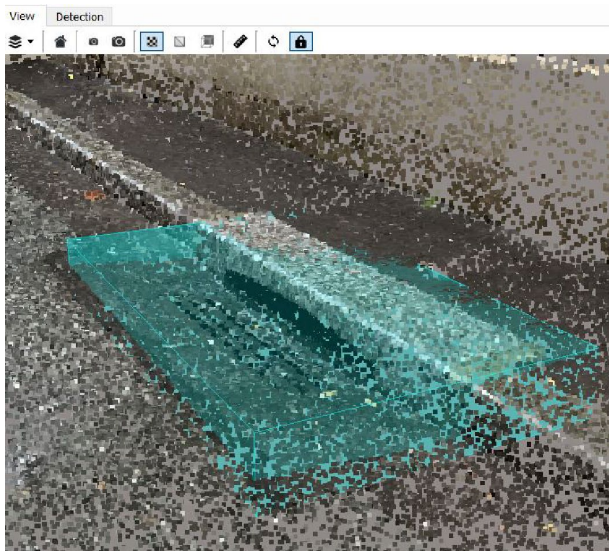
**3D detection**

From images only
  From images and point clouds

Use automatic tie points
 Maximum distance between cameras and objects  m

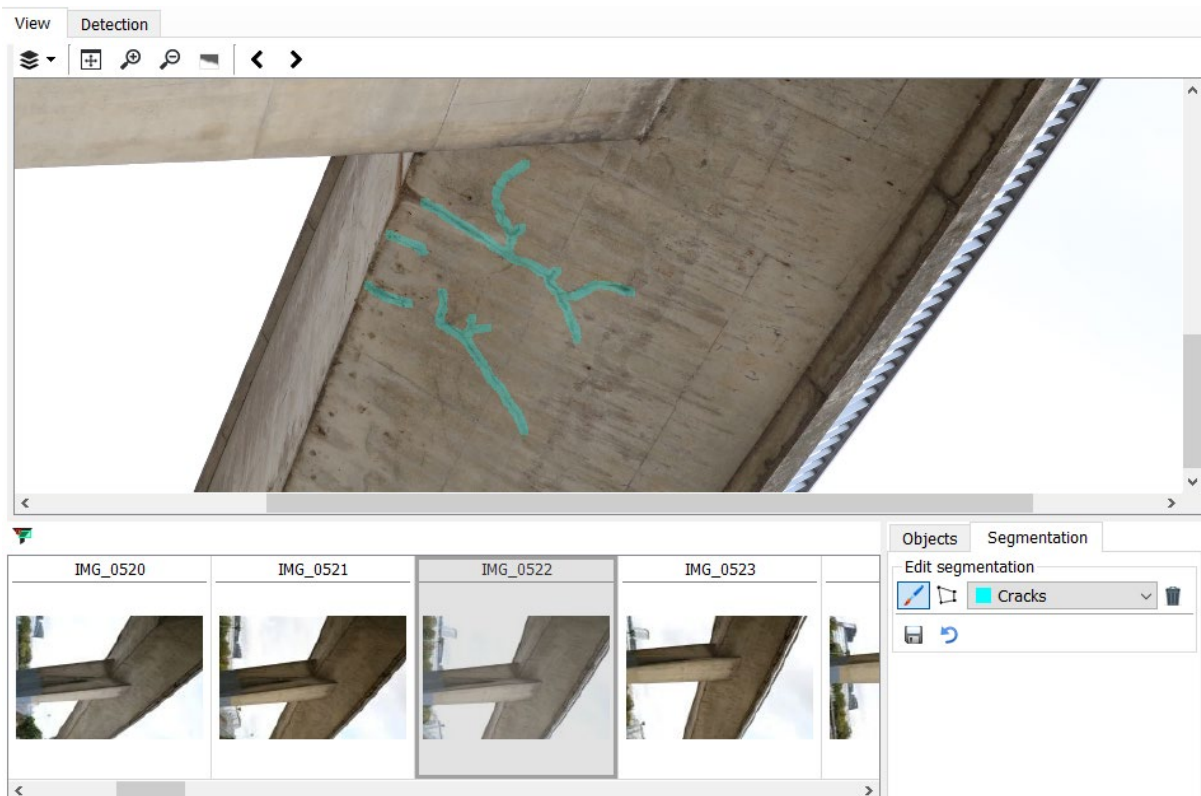
Minimum number of photos per 3D object





Leitud objektid (restkaevud) projitseeritakse 3D ruumi (punkt pilvele).

Treenimist on võimalik teostada ka nn joonobjektide baasil, kus pildiseerias õpetatakse ära tundma näiteks silla konstruktsioonis olevaid pragusid (vt allolevat pilti, milles praod on nn pintslite töövahendiga üle värvitud ja mille baasil treenimist teostatakse).



Peale detektori väljaõpetamist saab seda rakendada teiste 3D objektide analüüsil ning automaatselt visualiseerida leitud (võimalikud) praod betoonkonstruktsioonis.



Konstruksioonides olevaid võimalikke probleeme on seeläbi väga lihtne analüüsida, sest ühelt poolt võimaldab drooni kasutamine andmete kogumise raskesti ligipääsetavatest kohtadest ning teiselt poolt aitab masinägamine neid automaatselt tuvastada (lisaks saab tuvastatud probleemseid kohti eksportida väga erinevates disainiformaatides, andes seeläbi võimaluse nt sillainseneril markeerida oma konstruktsiooni mudelis võimalikud probleemid ja teostada konstruktsiooniarvutus/kontroll). Konstruktsioonide manuaalne kontroll on oluliselt ajamahukam, kuna sõltub kasutatavast rasketehnikast, mis võib vajada liikluse osalist või täielikku sulgemist.

#### 4.2.4 Prototüüp: Sõidutee deformatsioonide uuring

Drooniseire pakub tänase täpsuse juures võimalust hinnata sõiduteede deformatsioone (nt vajumeid) või ebaühtluseid mingil lõigul. Näitena on vaadeldud Kose-Võõbu maanteelõiku (ca 210 m), mis on rajatud turbakihile. See on ehitusmaterjalide kasutamise tähenduses nn katselõik, mille juures saab omakorda katsetada droonimõõdistustega saavutatavat täpsust, sest sellel lõigul teostatakse korrapäraselt ka terrestrilist laserskaneerimist. Turbakihi olemasolu tõttu hinnatakse antud sõidutee vajumiks ca 2 cm/aastas. Esmased analüüsid on näidanud, et droonimõõdistus võimaldab hinnata deformatsioone suurusjärgus ca 1 cm. Selleks, et tagada mõõdistusandmete usaldusväärsust, on vajalik kasutada maapealseid kontrollpunkte. Täpsete kontrollpunktide kasutamine tagab ennekõike kaamera parameetrite kalibreerimistäpsuse, kuid vähendab ka RTK-GNSS ebatäpsusest tingitud vigasid. Juhul kui RTK-GNSS võimekusega drooni ei kasutata, siis rakendatakse maapealseid kontrollpunkte mõõdistusandmete georefereerimiseks.

Tabel 4.5 esitab prototüübi, mida saab kasutada sõidutee deformatsioonide uurimiseks kasutades drooniseiret. Sõidutee deformatsioonide uuring kasutades drooniseiret pakub efektiivset võimalust uurida näiteks sõidutee vajumist, kus oodatud deformatsioonid jäävad mõne cm suurusjärku (nt erinevate sõidutee konstruktsioonikihtide kasutamise ja/või varieeruva aluspinna tõttu). Lisaks võimaldab drooniseire ohutut vajumite vaatlust, kuna ei



eelda mõõdistaja viibimist näiteks tiheda liiklusega maantee vahetus läheduses (nt nivelleerimise korral peab mõõdistaja seisma sõidutee ääres).

Tabel 4.5. Prototüüp: Deformatsioonide uurimine

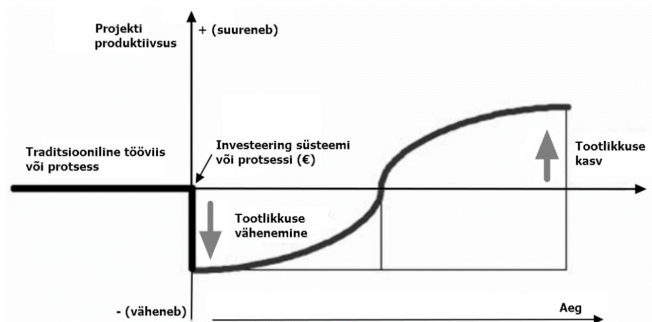
Tegevus	Kirjeldus
1. Planeerimine: Lennuplaani koostamine	Lennuplaani koostamisel pannakse paika meid huvitava ehitusobjekti maa-ala ja lennukõrgus. Lennukõrgus mõjutab ennekõike soovitud detailsust, mida saab iseloomustada piksli geomeetrilise suurusega.
2. Andmehõive: Drooni lennutamine (erinevatel ajahetkedel)	Fikseeritud lennuplaani kasutamisel peame arvestama maa-ala suurusega, drooni lennuulatusega, aga ka akukestvusega. Drooni lennutatakse vähemalt kahel erineval ajahetkel, mille erinevuseid soovime võrrelda.
3. Andmeanalüüs: 3D mudelite loomine	Fotogrammeetria teel 3D mudelite loomine (igale ajahetkele omaette 3D mudel).
4. Andmeanalüüs: Andmete võrdlus	Deformatsioonide esitamine.
5. Andmehõive kordamine ning uue andmeanalüüsi teostamine	Deformatsioonide aegrea välja toomine teatud maanteelõikude osas, kus korduvat mõõdistust teostatakse.

## 5. Ligikaudne maksumusehinnang

Nii nagu paljudes teistes sektorites, nii ka ehituses tervikuna tuleb analüüsida investeeringu tasuvust. Investeeringu tasuvus ei ole pelgalt tehnoloogia kasutuselevõtu maksumus (so riistvara/tarkvara kulu), vaid kaasab muuhulgas ka sellest saadavat efektiivsuse kasvu, kuid ka ümberõppimise vajadust. Iga ettevõtte, kes soovib muutuda peaks esmalt kaardistama oma tänased tööprotsessid ja leidma need kohad, mida oleks võimalik optimeerida. Lisaks peaks olema huvi analüüsida, mis olid lõppenud projekti kitsaskohad ja kuidas saaks seda parendada, millise investeeringu kaudu. Lihtsustatult võiks selle kokku võtta joonisel 5.1 toodud investeeringutasuvuse graafiku/valemiga.

$$\frac{\left( B - \left( \frac{B}{1 + E} \right) \right) \cdot (12 - C)}{A + (B \cdot C \cdot D)} * 100 = ROI(\%)$$

A	6000	Riistvara/tarkvara kulu (€)
B	4200	Tööjõukulu ühe kuu kohta + 30-40% töötajaga seotud boonused, ülekulud (€)
C	3	Koolitusele kuluv aeg (kuudes)
D	0.5	Tootlikkuse vähenemine koolituse tõttu (%)
E	0.25	Tootlikkuse kasv peale koolitust (%)



**Joonis 5.1.** Investeeringu tasuvus (ingl return on investment, ROI) lähtuvalt lisakulust (riistvara tarkvara/teenuse soetus maksumus), produktiivsuse langusest (koolitusele kuluv aeg võrrelduna muud töökohustused)

Joonis 5.1 kirjeldab küll väga lihtsat arvutust, kuid siiski annab see hea ülevaate, mis võiks olla investeeringu tasuvus perioodi lõikes kui tehakse teatud mahus kulutusi (nt drooni soetamine/rent, tarkvara soetamine/rent). Joonisel toodud suurused ei ole fikseeritud, vaid esitavadki konkreetset ettevõtet/asutust, kes peaks need tööprotsessid ellu viima ning seetõttu on kõik numbrid vabalt muudetavad, samas sõltudes sellest, mis kulutust ollakse valmis tegema, ja mida turg täna pakub (mis hinnaga). Näiteks võib riistvara/tarkvara kulu juures arvestada nii drooni renditeenusega kui ka drooni soetusmaksumusega (sõltub kasutusjuhtumist). Soovides täpsemaid mõõdistusi võiks drooni arvestuslik kulu (väljaostmisel) olla 4000 €, millele lisanud tarkvara aastane kulu/rent 2000 € (kokku 6000 €). Lähtudes joonisel toodud numbritest saab leida, et tootlikkuse kasv on 61% (aasta lõikes), mis kumuleerub perioodi lõikes ühes ümberõppe ja uute projektide/töökohustuste tulekuga.

## Lisa 1. Tänaused rakendused (kokkuvõte)

Antud lisa annab ülevaate tänaestest kommertslahendustest, millega saab analüüsida pildilist ja/või punktandmestikku ning millele on lisatud mõni spetsiifiline ning eristuv analüüsivõimekus. Siinkohal ei ole vaadeldud kõikvõimalikke andmete konverteerimise võimalusi, vaid keskendutud on lahendustele, mis kaasavad eristuvaid kasutusjuhte fookusega ehitussektorile (tabel L.1).

Tabel L.1. Olemasolevate rakenduste kokkuvõte

Tootja	Toote nimetus	Veebileht	Tarkvara / teenus	Riistvara	Olulisemad omadused, kasutusjuhtumid
3DR	Site Scan	<a href="https://3dr.com/products/site-scan-platform/">https://3dr.com/products/site-scan-platform/</a>	x / x	x	3D mudel, mahtude analüüs, punktipilv, termopildi analüüs
3point Ltd	Pointscene	<a href="https://pointscene.com/">https://pointscene.com/</a>	x / x		3D mudel, punktipilv
Aeryon	AeryonLive	<a href="https://www.aeryon.com/aeryonlive/">https://www.aeryon.com/aeryonlive/</a>	x / x	x	Reaalajas ülekande teenus
Agisoft	Metashape	<a href="http://www.agisoft.com/">http://www.agisoft.com/</a>	x / -		3D mudel, 4D modelleerimine, python skripti tugi
Airdata	Airdata	<a href="https://airdata.com/">https://airdata.com/</a>	x / x		Lennuandmete platvorm
Airobotics	Airobotics	<a href="https://www.airoboticsdrones.com/">https://www.airoboticsdrones.com/</a>	x / x		Mahtude analüüs
Autodesk	ReCap	<a href="https://www.autodesk.com/products/recap/overview">https://www.autodesk.com/products/recap/overview</a>	x / x		Fotogrammeetria, punktipilve redigeerimine ja mõõdistus
Bentley	ContextCapture, Bentley Map	<a href="https://www.bentley.com/en/products/brands/contextcapture">https://www.bentley.com/en/products/brands/contextcapture</a>	x / x		3D mudel (fotodest, punktipilvest)
Cyberhawk	iHawk	<a href="https://www.thecyberhawk.com/ihawk-visual-asset-management-software/">https://www.thecyberhawk.com/ihawk-visual-asset-management-software/</a>	x / x		Ehitusplatsi visualiseerimine
Delair	Delair Services	<a href="https://delair.aero/services/">https://delair.aero/services/</a>	x / x	x	Ehitustööde monitoorimine, mahtude analüüs, projektimudel vs teostusmudel
Dji	Terra	<a href="https://www.dji.com/ee/dji-terra">https://www.dji.com/ee/dji-terra</a>	x / -	x	3D mudel, missiooni planeerimine 3D-s, reaalajas 2D kaardistamine
DroneDeploy	Enterprise, LiveMap	<a href="https://www.dronedeploy.com/enterprise.html">https://www.dronedeploy.com/enterprise.html</a>	x / x		Projekti monitoorimine, reaalajas kokkuvõtted
Drone-Mapper	Drone-Mapper	<a href="https://dronemapper.com/">https://dronemapper.com/</a>	- / x		Mõõdistusega seotud analüüsid
Dronifi	Dronifi	<a href="https://www.dronifi.com/">https://www.dronifi.com/</a>	x / x		Algoritmilised analüüsid probleemide tuvastamiseks ning tegevustega sidumiseks
Esri	Drone2Map for ArcGIS	<a href="https://www.esri.com/en-us/arcgis/products/drone2map/overview">https://www.esri.com/en-us/arcgis/products/drone2map/overview</a>	x / x		3D mudel, piltide analüüs, topograafi analüüs
Event 38	Drone Data Management System	<a href="https://event38.com/drone-data-management-system/">https://event38.com/drone-data-management-system/</a>	x / x	x	3D mudel, mahtude analüüs
EWATT	EWATT	<a href="https://www.ewattuav.com/">https://www.ewattuav.com/</a>	n/a	x	Drooniteenus

FlyAbility	Inspector	<a href="https://www.flyability.com/">https://www.flyability.com/</a>	x / -	x	Hoone sisene droon, lennuplaani ajalooline vaade
HANGAR	Hangar, Mapsight, Jobsight	<a href="https://www.hangar.com/hangar-platform/">https://www.hangar.com/hangar-platform/</a>	x / x		4D mudel, automaatsed monitooringud, panoraamvõtted (360 kraadi)
Harris Geospatial	ENVI	<a href="https://www.harrisgeospatial.com/Software-Technology">https://www.harrisgeospatial.com/Software-Technology</a>	x / x		Anomaaliate kindlaks määramine, muudatuste jälgimine, hüperspektraal- ning multispektraalandmete tugi
Hexagon	3DReshaper	<a href="https://www.3dreshaper.com/en/">https://www.3dreshaper.com/en/</a>	x / -		3D mudel, tüüpiliste CAD objektide regeneerimine, skriptimise tugi
Identified Technologies	Identified Technologies	<a href="https://www.identifiedtech.com/solution/drone-mapping-software/">https://www.identifiedtech.com/solution/drone-mapping-software/</a>	x / x		3D mudel, mahtude jälgimine/analüüs, muudatuste analüüs, projektimudel vs teostusmudel
Industrial Skyworks	BlueVu	<a href="https://industrialskyworks.com/software/">https://industrialskyworks.com/software/</a>	x / x		Monitoorimine
Intel	Intel® Insight Platform	<a href="https://www.intel.com/content/www/us/en/drones/solutions/intel-insight-platform.html">https://www.intel.com/content/www/us/en/drones/solutions/intel-insight-platform.html</a>	x / x		Drooniandmete üleviimine konkreetseteks tegevusteks, mahtude analüüs
Kespry	Kespry	<a href="https://www.kespry.com/">https://www.kespry.com/</a>	x / x	x	Mahtude ajalooline väljavõte, projekti planeerimine (mahud, muudatuste nõuded, jooksivad mõõdistused)
Leica Geosystems	Infinity, MultiWorx, Aibot SX / CX	<a href="https://leica-geosystems.com/en-us/products/total-stations/software">https://leica-geosystems.com/en-us/products/total-stations/software</a>	x / x	x	Mahtude analüüs, monitoorimine, punkt pilve analüüs (teostusandmete hõive – sõidutee, raudtee)
Lockheed Martin	Hydra Fusion Tools	<a href="https://www.lockheedmartin.com/en-us/products/cdl-systems/hydra-fusion-tools.html">https://www.lockheedmartin.com/en-us/products/cdl-systems/hydra-fusion-tools.html</a>	x / -	x	3D mudel reaajas, ajalooline monitooring, infrastruktuuri monitooring, projektimudel vs teostusmudel
Maps Made Easy	Maps Made Easy	<a href="https://www.mapsmadeeasy.com/">https://www.mapsmadeeasy.com/</a>	x / x		3D mudel, mahtude analüüs
Measure	Ground Control	<a href="https://www.measure.com/">https://www.measure.com/</a>	x / x		Droonidel baseeruvate monitooringute planeerimine
Microdrones	mdCockpit	<a href="https://www.microdrones.com/en/">https://www.microdrones.com/en/</a>	x / -	x	Drooni missioonide planeerimine
OpenDroneMap	OpenDroneMap	<a href="https://www.opendronemap.org/">https://www.opendronemap.org/</a>	x / -		Aeroskaneerimisest saadud andmete analüüs
Optelos	Optelos	<a href="https://optelos.com/platform/">https://optelos.com/platform/</a>	x / x		Piksli analüüsil põhinev võrdlev analüüs (ajalooline)
Pix4D	Pix4Dmapper, Pix4Dbim, jt	<a href="https://pix4d.com/">https://pix4d.com/</a>	x / -		3D mudel, mahtude analüüs, ehitustegevuste jälgimine
PrecisionHawk	PrecisionMapper, PrecisionViewer, PrecisionAnalytics	<a href="https://www.precisionhawk.com/software">https://www.precisionhawk.com/software</a>	x / x		Tehisintellektil baseeruv monitoorimise platvorm
Propellar	Propeller Platform	<a href="https://www.propelleraero.com/propeller-platform/">https://www.propelleraero.com/propeller-platform/</a>	x / x		3D mudel, andmete kvaliteedi kontroll, interaktiivne ehitusplatsi ajajoon

SenseFly	Survey 360	<a href="https://www.sensefly.com/solution/survey-360/">https://www.sensefly.com/solution/survey-360/</a>	x / x	x	3D mudel
SILLE	Datel AS	<a href="https://sille.space/en/">https://sille.space/en/</a>	- / x		Satelliitseirel baseeruv infrastruktuuri monitoorimine
Simactive	Correlator3D	<a href="https://www.simactive.com/index.html">https://www.simactive.com/index.html</a>	x / x		3D mudel
SiteAware Systems Ltd.	SiteAware	<a href="https://www.siteaware.com">https://www.siteaware.com</a>	x / x		Tehisintellektil baseeruv monitoorimise platvorm
Skycatch	Skycatch	<a href="https://www.skycatch.com/">https://www.skycatch.com/</a>	x / x	x	3D mudel, monitoorimine, videoülevaated, BIM koordineerimine
Sky-Futures	Expanse	<a href="https://www.sky-futures.com/expanse/">https://www.sky-futures.com/expanse/</a>	x / x		Tehisintellektil baseeruv monitoorimise platvorm
Smartvid.io	Smartvid.io	<a href="https://www.smartvid.io/">https://www.smartvid.io/</a>	x / x		Tehisintellektil baseeruv monitoorimine lähtuvalt tööohutusest
Stockpile Reports	Stockpile Reports	<a href="https://www.stockpilereports.com/">https://www.stockpilereports.com/</a>	x / x		Mõõdistused, raportite genereerimine
Topcon	Context Capture, Collage, Collage Web, ClearEdge3D EdgeWise/Verity, MAGNET Inspect	<a href="https://www.topconpositioning.com/software-solutions/mass-data-mapping/contextcapture">https://www.topconpositioning.com/software-solutions/mass-data-mapping/contextcapture</a>	x / x	x	3D mudel, objekti tuvastus, projektudel vs teostusudel
Trimble	inPho UASMaster, Stratus	<a href="https://www.trimble.com/geospatial/inpho-uasmaster">https://www.trimble.com/geospatial/inpho-uasmaster</a>	x / -	x	3D mudel, objekti tuvastus ning selle genereerimine
Yuneec	DataPilot	<a href="https://us.yuneec.com/">https://us.yuneec.com/</a>	x / -	x	Missiooni planeerimise platvorm

## Lisa 2. Andmed

Pilootala #2 drooni mõõdistuste toorandmed on edasiste kasutusjuhtude tuletamiseks vabalt kättesaadavad DataDOI portaali vahendusel (Puust, 2020).

## Referentsid

- Ajayi, O.G., Palmer, M., Salubi, A.A. (2018) Modelling farmland topography for suitable site selection of dam construction using unmanned aerial vehicle (UAV) photogrammetry, *Remote Sensing Application: Society and Environment*, 11, 220-230.
- Akturk, E. and Altunel, A.O. (2019) Accuracy assessment of a low-cost UAV derived digital elevation model (DEM) in a highly broken and vegetated terrain, *Measurement*, 136, 382-386.
- Allam, Z. and Dhunny, Z.A. (2019) On big data, artificial intelligence and smart cities, *Cities*, 89, 80-91.
- Alsafouri, S. and Ayer, S.K. (2018) Review of ICT Implementations for facilitating information flow between virtual models and construction project sites, *Automation in Construction*, 86, 176-189.
- Ashtiani, M.Z., Muench, S.T., Gent, D., Uhlmeyses, J.S. (2019) Application of satellite imagery in estimating stockpiled reclaimed asphalt pavement (RAP) inventoru: A Washington State case study, *Construction and Building Materials*, 217, 292-300.
- Autodesk (2018) Connected workflows: drones in construction, <https://info.bim360.autodesk.com/drones-in-construction-ebook> (accessed: 14.06.2019).
- Bang,S., Kim, H. and Kim, H. (2017) UAV-based automatic generation of high-resolution panorama at a construction site with a focus on preprocessing for image stitching, *Automation in Construction*, 84, 70-80.
- Bonczak, B. and Kontokosta, C.E. (2019) Large-scale parameterization of 3D building morphology in complex urban landscapes using aerial LiDAR and city administrative data, *Computers, Environment and Urban Systems*, 73, 126-142.
- Bosché, F., Ahmed, M., Turkan, Y., Haas, C.T. and Haas, R. (2015) The value of integrating Scan-to-BIM and Scan-vs-BIM techniques for construction monitoring using laser scanning and BIM: The case of cylindrical MEP components, *Automation in Construction*, 49, 201-213.
- Cabaleiro, M., Lindenbergh, R., Gard, W.F., Arias, P. and van de Kuilen, J.W.G. (2017) Algorithm for automatic detection and analysis of cracks in timber beams from LiDAR data, *Construction and Building Materials*, 130, 41-53.
- CGI Eesti AS. (2020) Eesti riikliku satelliidandmekeskuse ETSHub analüüs. CGI Eesti AS.
- Colomina, I. and Molina P. (2014) Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: a review, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 92, 79-97.
- Congress, S.S.C., Puppala, A.J., Lundberg, C.I. (2018) Total system error analysis of UAV-CRP technology for monitoring transportation infrastructure assets, *Engineering Geology*, 247, 104-116.



Craveiro, F., Duarte, J.P., Bartolo, H. and Bartolo, P.J (2019) Additive manufacturing as an enabling technology for digital construction: a perspective on Construction 4.0, *Automation in Construction*, 103, 251-267.

de Melo, R.R.S., Costa, D.B., Álvares, J.S. and Irizarry, J. (2017) Applicability of unmanned aerial system (UAS) for safety inspection on construction sites, *Safety Science*, 98, 174-185.

Díaz-Vilariño, L., González-Jorge, H., Bueno, M., Arias, P. and Puente, I. (2016) Automatic classification of urban pavements using mobile LiDAR data and roughness descriptors, *Construction and Building Materials*, 102, 208-215.

Du, S., Zhang, Y., Zou, Z., Xu, S., He, X. and Chen, S. (2017) Automatic building extraction from LiDAR data fusion of point and grid-based features, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 130, 294-307.

Dupont, Q.F.M., Chua, D.K.H., Tashrif, A. and Abbott, E.L.S. (2017) Potential applications of UAV along the construction's value chain, *Procedia Engineering*, 182, 165-173.

El-Ashmawy, K.L.A. (2016) Investigation of the accuracy of Google Earth elevation data, *Artificial satellites*, 51(3), 89-97.

Entrop, A.G. and Vasenev, A. (2017) Infrared drones in the construction industry: designing a protocol for building thermography procedures, *Energy Procedia*, 132, 63-68.

Erdelj, M., Saif, O., Natalizio, E. and Fantoni, I. (2017) UAVs that fly forever: Uninterrupted structural inspection through automatic UAV replacement, *Ad Hoc Networks (in press)*, kasutatud 05.06.2019.

Erenoglu, R.C., Akcay, O. and Erenoglu, O. (2017) An UAS-assisted multi-sensor approach for 3D modeling and reconstruction of cultural heritage site, *Journal of Cultural Heritage*, 26, 79-90.

Freimuth, H. and König, M. (2018) Planning and executing construction inspection with unmanned aerial vehicles, *Automation in Construction*, 96, 540-553.

GCP (2015) *Global Construction Perspectives and Oxford Economics, A Global Forecast for the Construction Industry by 2030*, Global Construction Perspectives and Oxford Economics, London, UK, 2015 (ISBN 978-0-9564207-9-4).

Gheisari, M. and Esmaeili, B. (2019) Applications and requirements of unmanned aerial systems (UASs) for construction safety, *Safety Science*, 118, 230-240.

Guan, H. (2013) Automated extraction of road information from mobile laser scanning data, PhD thesis, University of Waterloo, Canada.

Guan, H., Li, J., Yu, Y., Chapman, M. and Wang, C. (2015) Automated road information extraction from mobile laser scanning data, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 16(1), 194-205.

Guan, H., Li, J., Yu, Y., Wang, C., Chapman, M. and Yang, B. (2015) Using mobile laser scanning data for automated extraction of road markings, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 87, 93-107.

Guo, J., Tsai, M.-J. and Han, J.-Y. (2015) Automatic reconstruction of road surface features by using terrestrial mobile lidar, *Automation in Construction*, 58, 165-175.

Ham, Y. and Kamari, M. (2019) Automated content-based filtering for enhanced vision-based documentation in construction toward exploiting big visual data from drones, *Automation in Construction*, 105, 102831.

Hassanalian, M. and Abdelkefi, A. (2017) Classifications, applications, and design challenges of drones: A review, *Progress in Aerospace Sciences*, 91, 99-131.

Hu, M., Liu, W., Lu, J., Fu, R., Peng, K., Ma, X. and Liu, J. (2019) On the joint design of routing and scheduling for vehicle-assisted multi-UAV inspection, *Future Generation Computer Systems*, 94, 214-223.

Husain, A. and Vaishya, R.C. (2018) Road surface and its center line and boundary lines detection using terrestrial Lidar data, *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences*, 21, 363-374.

Kaugseire ehitussektoris, 2019. Seminari materjalid. Tallinna Tehnikaülikool, 16.12.2019, <https://bim-courses.com/events/kaugseire-ehituses> (viimane külastus: 30.11.2020)

Köök, R. (2018) Accuracy of UAV photogrammetry with applications to road construction works, magistritöö, Tallinna Tehnikaülikool, Eesti.

Jazayeri, I., Rajabifard, A. and Kalantari, M. (2014) A geometric and semantic evaluation of 3D data sourcing methods for land and property information, *Land Use Policy*, 36, 219-230.

Julge, K. (2018) Laser Scanning of Built Environment and Landforms with Spatial Modelling Applications, doktoritöö, Tallinna Tehnikaülikool, Eesti.

Jung, J., Che, E., Olsen, M.J. and Parrish, C. (2019) Efficient and robust lane marking extraction from mobile lidar point clouds, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 147, 1-18.

Jung, J., Olsen, M.J., Hurwitz, D.S., Kashani, A.G. and Buker, K. (2018) 3D virtual intersection sight distance analysis using lidar data, *Transportation Research Part C*, 86, 563-579.

Jung, J. and Sohn, J. (2019) A line-based progressive refinement of 3D rooftop models using airborne LiDAR data with single view imagery, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 149, 157-175.

Kumar, P., McElhinney, C.P., Lewis, P. and McCarthy, T. (2014) Automated road markings extraction from mobile laser scanning data, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 32, 125-137.

Langhammer, J., Janský, B., Kocum, J. and Minařík, R. (2018) 3-D reconstruction of an abandoned montane reservoir using UAV photogrammetry, aerial LiDAR and field survey, *Applied Geography*, 98, 9-21.

Li, Y. and Liu, C. (2018) Applications of multirotor drone technologies in construction management, *International Journal of Construction Management*, 19(5), 401-412.

Lingfors, D., Bright, J.M., Engerer, N.A., Ahlberg, J., Killinger, S. and Widén, J. (2017) Comparing the capability of low- and high-resolution LiDAR data with application to solar resource assessment, roof type classification and shading analysis, *Applied Energy*, 205, 1216-1230.

Loro, M., Arce, R.M. and Ortega, E. (2017) Identification of optimal landforms to reduce impacts on the landscape using LiDAR for hosting a new highway, *Environmental Impact Assessment Review*, 66, 99-114.

Luo, W. and Li, L. (2018) Automatic geometry measurement for curved ramps using inertial measurement unit and 3D LiDAR system, *Automatic in Construction*, 94, 214-232.

Maa-amet, 2018. Kõrgusandmed. Veebiportaal: <https://geoportaal.maaamet.ee/est/Ruumiandmed/Korgusandmed-p114.html> (viimane külastus: 30.11.2020)

Maanteeamet (2017a) Riigitee nr 2 Tallinn-Tartu-Võru-Luhamaa Kose-Ardu lõigu ehitus, hankedokument 182841, Riigihangete register, <https://riigihanked.riik.ee/rhr-web/#/procurement/710372/general-info> (06.01.2020)

Maanteeamet (2017b) Riigitee nr 2 Tallinn-Tartu-Võru-Luhamaa Ardu-Võõbu lõigu ehitus, hankedokument 190185, Riigihangete register, <https://riigihanked.riik.ee/rhr-web/#/procurement/717672/general-info> (06.01.2020)

Mairaj, A., Baba, A.I. and Javaid, A.Y. (2019) Application specific drone simulators: Recent advances and challenges, *Simulation Modelling Practice and Theory*, 94, 100-117.

Martin-Jiménez, J., Zazo, S., Justel, J.J.A., Rodriguez-González, P. and González-Aguilera, D. Road safety evaluation through automatic extraction of road horizontal alignments from Mobile LiDAR System and inductive reasoning based on a decision tree, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 146, 334-346.

Martínez-Rubio, A., Sanz-Adan, F., Santamaría-Peña, J. and Martínez, A. (2016) Evaluating solar irradiance over facades in high building cities, based on LiDAR technology, *Applied Energy*, 183, 133-147.

McKinsey & Company (2017), Commercial drones are here - the future of unmanned aerial systems, <https://www.mckinsey.com/industries/capital-projects-and-infrastructure/our-insights/commercial-drones-are-here-the-future-of-unmanned-aerial-systems>, kasutatud 05.06.2019.

Mill, T. (2017) *Terrestriline laserskaneerimine ehituskonstruksioonide mõõdistamisel*, doktoritöö, Tallinna Tehnikaülikool, Eesti.

- Mohamed, N., Al-Jaroodi, J., Jawhar, I., Idries, A., and Mohammed, F. (2017) Unmanned aerial vehicles applications in future smart cities, *Technological Forecasting & Social Change* (in press), kasutatud 05.06.2019.
- Moon, D., Chung, S., Kwon, S., Seo, J. and Shin, J. (2019) Comparison and utilization of point cloud generated from photogrammetry and laser scanning: 3D world model for smart heavy equipment planning, *Automation in Construction*, 98, 322-331.
- Morgenthal, G., Hallermann, N., Kersten, J., Taraben, J., Debus, P., Helmrich, M. and Rodehorst, V. (2019) Framework for automated UAS-based structural condition assessment of bridges, *Automation in Construction*, 97, 77-95.
- Nahli, A., Simonetto, E., Merrien-Soukatchoff, V., Durand, F. and Rangeard, D. (2018) Sentinel-1 for monitoring tunnel excavations in Rennes, France, *Procedia Computer Science*, 138, 393-400.
- Nedbal, V. and Brom, J. (2018) Impact of highway construction on land surface energy balance and local climate derived from LANDSAT satellite data, *Science of the Total Environment*, 633, 658-667.
- Omar, T. and Nehdi, M.L. (2017) Remote sensing of concrete bridge decks using unmanned aerial vehicle infrared thermography, *Automation in Construction*, 83, 360-371.
- Padrò, J.-C., Carabassa, V., Balaguè, J., Brotons, L., Alcaniz, J.M., Pons, X. (2019) Monitoring opencast mine restorations using Unmanned Aerial System (UAS) imagery, *Science of the Total Environment*, 657, 1602-1614.
- Padró, J.-C., Muñoz, F.-J., Planas, J. and Pons, X. (2019) Comparison of four UAV georeferencing methods for environmental monitoring purposes focusing on the combined use with airborne and satellite remote sensing platforms, *Int J Appl Earth Obs Geoinformation*, 75, 130-140.
- Park, Y. and Guldmann, J.-M. (2019) Creating 3D city models with building footprints and LIDAR point cloud classification: A machine learning approach, *Computers, Environment and Urban Systems*, 75, 76-89.
- Puente, I., Solla M., González-Jorge, H., Arias P. (2013) Validation of mobile LiDAR surveying for measuring pavement layer thicknesses and volumes, *NDT&E International*, 60, 70-76.
- Puust, R., 2020. BIM teedehituses. Ruumiline planeerimine. YouTube videoseeria, [https://www.youtube.com/watch?v=2XliMdfOqR8&list=PLHYYIGqgRQXR38xucWvASoEv\\_NhRqeZCg](https://www.youtube.com/watch?v=2XliMdfOqR8&list=PLHYYIGqgRQXR38xucWvASoEv_NhRqeZCg) (viimane külastus: 30.11.2020)
- Puust, R. 2020. TalTech MP3 drone measurements. DataDOI: [10.23673/re-253](https://doi.org/10.23673/re-253)
- Qin, R., Tian, J. and Reinartz, P. (2016) 3D change detection – approaches and applications, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 122, 41-56.

Qin, X., Zhang, L., Yang, M., Luo, H., Liao, M. and Ding, X. (2018) Mapping surface deformation and thermal dilation of arch bridges by structure-driven multi-temporal DInSAR analysis, *Remote Sensing of Environment*, 216, 71-90.

Rakha, T. and Gorodetsky, A. (2018) Review of Unmanned Aerial System (UAS) applications in the built environment: Towards automated building inspection procedures using drones, *Automation in Construction*, 93, 252-264.

Reimann, K. (2019) Validating the surveying accuracy of GNSS-RTK featured unmanned aerial vehicles, magistritöö, Tallinna Tehnikaülikool, Eesti.

Resev, J. (2019) A study of UAV photogrammetry in application to building exterior geometry and deformation measurements based on the example of the Tallinn Seaplane Harbour, magistritöö, Tallinna Tehnikaülikool, Eesti.

Rodríguez-Cuenca, B., García-Cortés S., Ordóñez, C. and Alonso, M.C. (2015) An approach to detect and delineate street curbs from MLS 3D point cloud data, *Automation in Construction*, 51, 103-112.

Seo, J., Duque, L. and Wacker, J. (2018) Drone-enabled bridge inspection methodology and application, *Automation in Construction*, 94, 112-126.

Siebert S. and Teizer, J. (2014) Mobile 3D mapping for surveying earthwork projects using an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) system, *Automation in Construction*, 41, 1-14.

Soilán, M., Riveiro, B., Martínez-Sánchez, J. and Arias, P. (2017) Segmentation and classification of road markings using MLS data, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 123, 94-103.

Soltanmohammadlou, N., Sadeghia, S., Hon, C.K.H. and Mokhtarpour-Khanghahc, F. (2019) Real-time locating systems and safety in construction sites: A literature review, *Safety Science*, 117, 229-242.

Spencer Jr., B.F., Hoskere, V. and Narazaki, Y. (2019) Advances in computer vision-based civil infrastructure inspection and monitoring, *Engineering*, 5, 199-222.

Suchocki, C. and Katzer, J. (2018) Terrestrial laser scanning harnessed for moisture detection in building materials – problems and limitations, *Automation in Construction*, 94, 127-134.

Sun, G., Huang, H., Weng, Q., Zhang, A., Jia, X., Ren, J., Sun, L. and Chen, X. (2019) Combinational shadow index for building shadow extraction in urban areas from Sentinel-2A MSI imagery, *Int J Appl Earth Obs Geoinformation*, 78, 53-65.

Tallinna aluskaart, 2017. Geoportaal, ruumiandmed. Tallinna Linnaplaneerimiseamet, <https://www.tallinn.ee/est/geoportaal/Andmed> (viimane külastus: 30.11.2020)

Tang, P., Huber, D., Akinci, B., Lipman, R. and Lytle, A. (2010) Automatic reconstruction of as-built building information models from laser-scanned point clouds: A review of related techniques, *Automation in Construction*, 19, 829-843.

Tatum, M.C. and Liu, J. (2017) Unmanned Aircraft System Applications In Construction, *Procedia Engineering*, 196, 167-175.

Tech & Space OÜ (2020) Kaugseire andmete kasutuselevõtt avalike teenuste väljatöötamisel ja arendamisel. Teostatavusuuring. Tartu.

Toth, C. and Józków, G. (2016) Remote sensing platforms and sensors: a survey, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 115, 22-36.

Wang, Q. (2019) Automatic checks from 3D point cloud data for safety regulation compliance for scaffold work platforms, *Automation in Construction*, 104, 38-51.

Wang, Q. and Kim, M.-K. (2019) Applications of 3D point cloud data in the construction industry: A fifteenyear review from 2004 to 2018, *Advanced Engineering Informatics*, 39, 306-319

Varbla, S., Puust, R., and Ellmann, A., 2020. Accuracy assessment of RTK-GNSS equipped UAV conducted as-built surveys for construction site modelling, *Survey Review*, DOI: 10.1080/00396265.2020.1830544

Varik (2017) Sildade mõõtmise satelliitandmete valideerimiseks, lõputöö, Tallinna Tehnikakõrgkool, Eesti.

WEF (2016) World Economic Forum, Shaping the future of construction - a breakthrough in mindset and technology, World Economic Forum, Geneva, Switzerland, [http://www3.weforum.org/docs/WEF\\_Shaping\\_the\\_Future\\_of\\_Construction\\_full\\_report\\_\\_.pdf](http://www3.weforum.org/docs/WEF_Shaping_the_Future_of_Construction_full_report__.pdf), kasutatud 07.06.2019.

Voormansik (2013) Maapinna ja majade vertikaalliikumise mõõtmine Tartu linnas PSInSAR meetodil, bakalaureusetöö, Tartu Ülikool, Eesti.

Zheng, X., Wang, F. and Li, Z. (2018) A multi-UAV cooperative route planning methodology for 3D fine-resolution building model reconstruction, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 146, 483-494.

Zhou, Q.-Y. and Neumann, U. (2010) 2.5D dual contouring - a robust approach to creating building models from aerial LiDAR point clouds, *European Conference on Computer Vision (ECCV 2010)*, 115-128.

Zou, Y., Kiviniemi, A. and Jones, S.W. (2017) A review of risk management through BIM and BIM-related technologies, *Safety Science*, 97, 88-98.

Xia, S. and Wang, R. (2018) Extraction of residential building instances in suburban areas from mobile LiDAR data, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 144, 453-468.

Yang, M., Wan, Y., Liu, X., Xu, J., Wei, Z., Chen, M. and Sheng, P. (2018) Laser data based automatic recognition and maintenance of road markings from MLS system, *Optics and Laser Technology*, 107, 192-203.