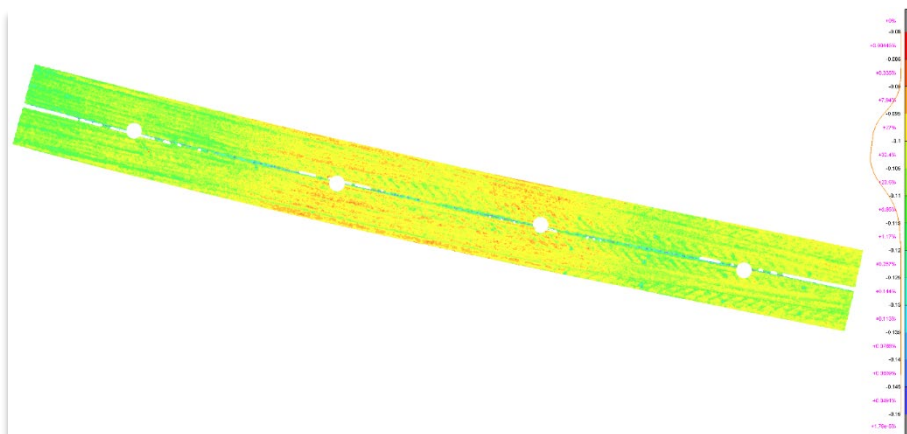
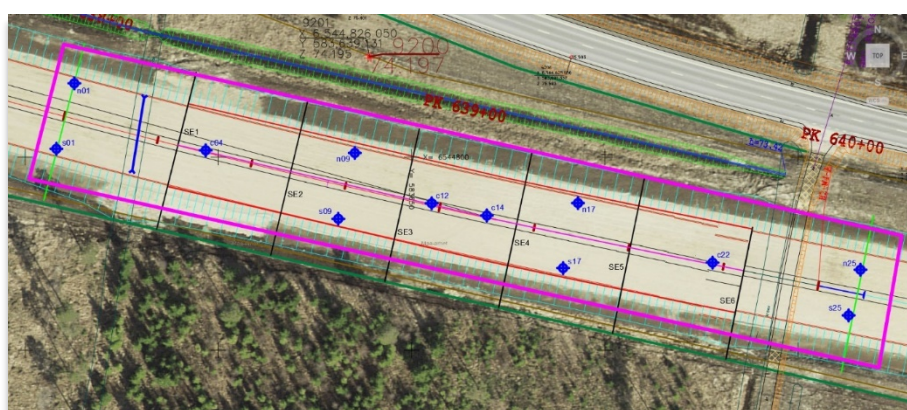


Drooniseire andmeanalüüs

Raido Puust



Sisujuht

1. Andmeanalüüs	3
1.1. Piltide analüüs	3
1.1.1 Sissejuhatuse masinõõgemisse	3
1.1.2 Masinõõgemisalgoritmi seadistus ning analüüs	3
1.2. Fotogrammeetria baseeruv analüüs	7
1.2.1 Sissejuhatuse	7
1.2.2 Arvuti ettevalmistus	7
1.2.3 Drooniseire piltide import ning joondamine	9
1.2.4 Joondamise täpsustamine / georeferentseerimine	14
1.2.5 Võrkumõõli arvutamine	19
1.2.6 Võrkumõõli arvutussuutlikkuse parendamine	22
1.2.7 Võrkumõõli eksport	24
1.2.8 Võrkumõõli lihtsustamine	25
1.2.9 Ortomosaiki loomine	26
2. Vigade analüüs	33
2.1. Hoone mõõdistamise veaanalüüs	33
2.2. Sõidutee mõõdistamise veaanalüüs	39
2.2.1 Otsene georeferentseerimine	40
2.2.2 Integreeritud georeferentseerimine (0.005 m)	40
2.2.3 Integreeritud georeferentseerimine (0.000 m)	40
2.2.4 Kokkuvõte	41
Referentsid	41

1. Andmeanalüüs

Varasemalt on toodud näiteid satelliitseire andmete kasutamise kohta ehitussektori vaatevinklist. Antud ülevaade keskendub drooniseirest saadavale andmeanalüüsile, mille valideerimiseks on kasutatud ka terestrilist 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 andmeanalüüsides kirjeldamisel, mis vajavad täpsemat lahti seletamist, et seeläbi oleks prototüpe lihtsam esitada.

Drooniseire tarvis on kogutud andmeid kahelt pilootalalt (tabel 1.1).

Tabel 1.1. Mõõdistusandmete jaotus pilootalade vahel

Pilootala nimetus	Tüüp	Lendude arv / kordused*
Mäepealse 3	Hoone	42 (seisuga 30.09.2020)
Lõigud Kose-Võõbu maanteel	Sõidutee	5

*Mäepealse 3 ehitusobjektil on raporti koostamise hetkeks lennatud iganädalaselt (üks kord) perioodil 14.11.2019 – 30.09.2020.

1.1. Piltide analüüs

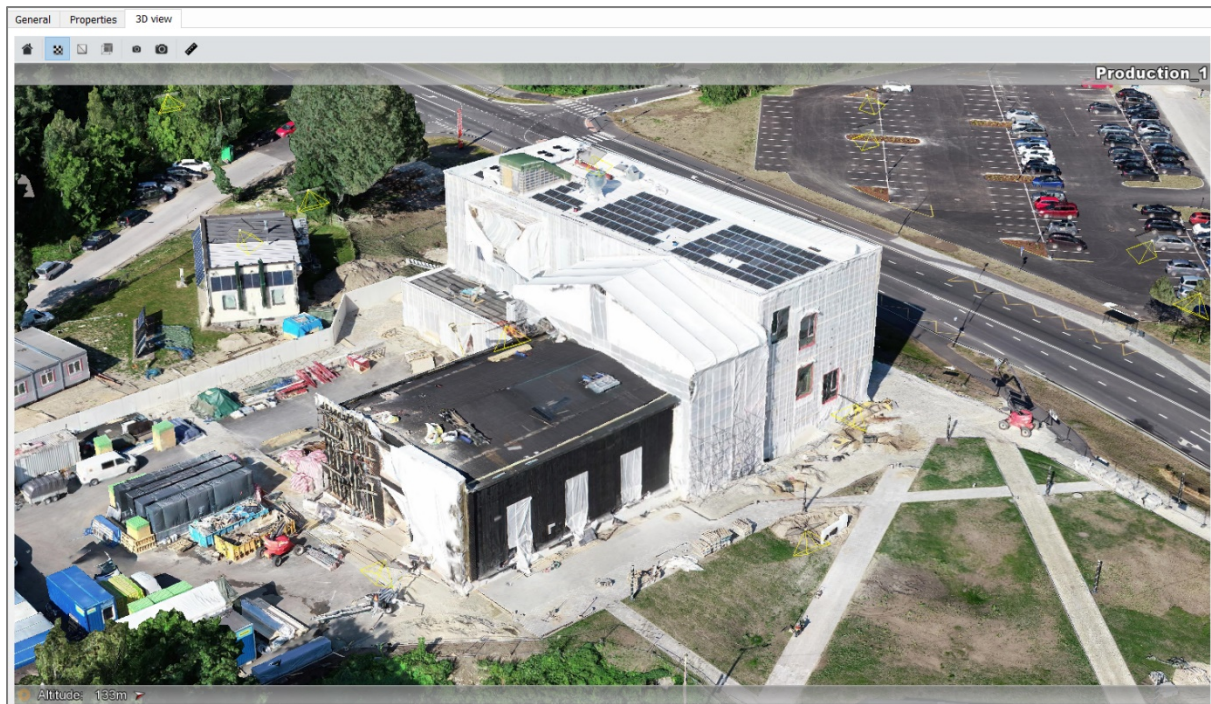
Piltide analüüs võib väljenduda lihtsa pildijada koostamises olukorras, kus objekti on mõõdistatud korduvalt. Seeläbi saadakse ühest ja samast punktist informatiivne aegrida koos võimalusega teostada pildidel erinevaid jah/ei tüüpi kokkuvõtteid (kas mingi objekt on ehitusplatsil, kas mingi osa on valmis 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.

1.1.1 Sissejuhatus masinnägemisse

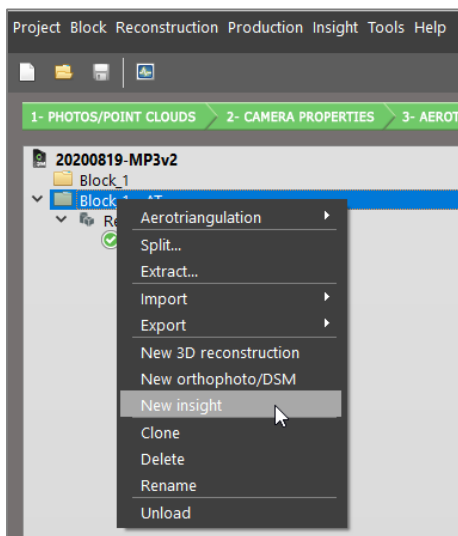
Masinnägemist on analüüsitud drooniseire andmete baasil. Kasutatud tarkvara on Bentley ContextCapture, mis oma põhifookuselt on fotogrammeetria tarkvara, kuid milles on kaasatud masinnägemise algoritme. See võimaldab ühelt poolt kasutada vaikumisi masinnägemise detektoreid (kokku 86), millest ehitusega seotud objektiklassidest võiks välja tuua järgmised: inimene, erinevad liikumisvahendid (sh auto, veoauto), liikluskorraldusvahendid (sh valgusfoor, liikluskärgid) ning muud iseloomulikud tänava komponendid (nt hüdrant). Antud analüüsi käigus ongi keskendutud olemasolevatele detektoritele. Üheks suureks eeliseks antud töövoolus 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.

1.1.2 Masinnägemisalgoritmi seadistus ning analüüs

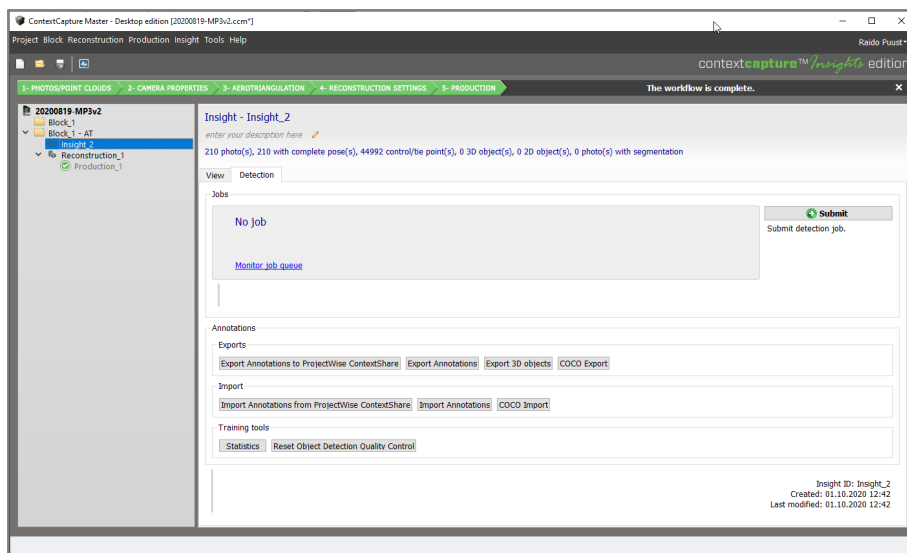
Näitena on kasutatud Mäepealse 3 drooniseire andmeid. Selleks, et masinnägemise poolt leitud komponenti saaks tähistada 3D ruumis, on loodud fotogrammeetria baasil mudel (vt peatükki 1.2, milles on lähemalt tutvustatud fotogrammeetriat puudutavat analüüsi). Allpool on esitatud fotogrammeetria baasil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



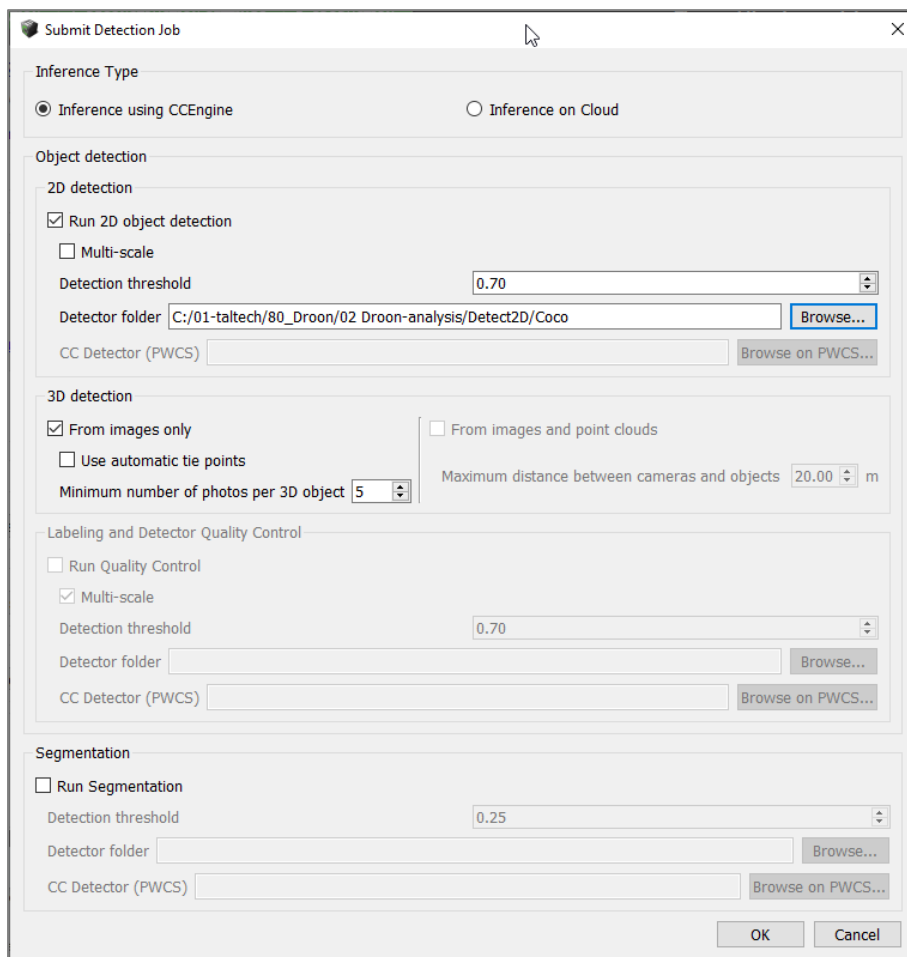
Kuna fotogrammeetriat saab luua väga erinevate tarkvaradega, siis ei püüa antud tulem esitada sama asja erinevate tarkvarade vaatevinklist, vaid lähtuda ühe või teise tarkvara lisavõimalustest (kasutusjuhtude ja prototüüpide perspektiiviga). Olles arvutanud 3D võrkmodeli, liigu ContextCapture tarkvaras 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 treenida 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.

1.2. Fotogrammeetrial baseeruv analüüs

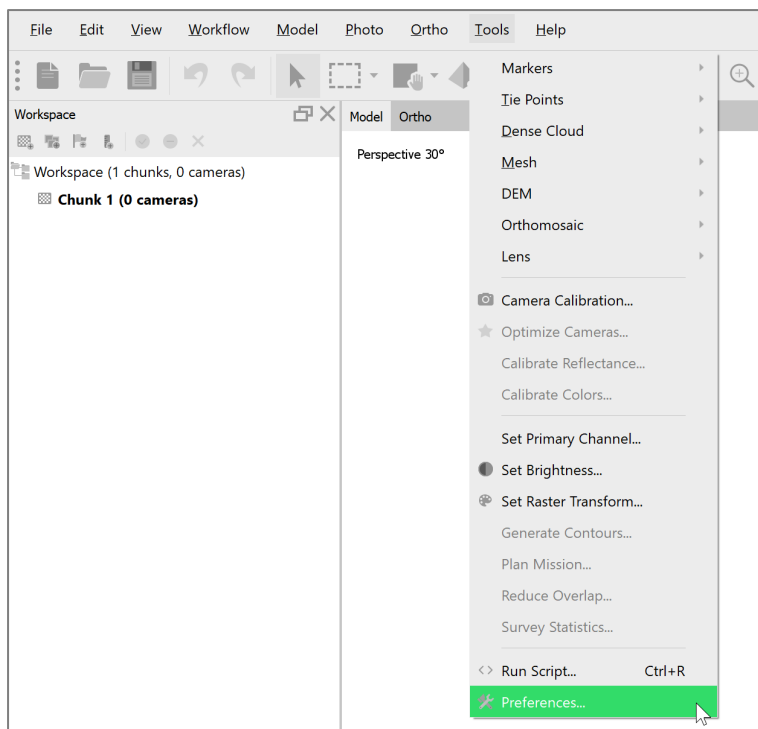
Fotogrammeetria on fotode abil objektide asendi, mõõtmete ja kuju määramine. Fotogrammeetria tulemuseks on 3D mudel, mis võimaldab sellelt võtta mõõtusid, võrrelda teisel ajahetkel teostatud 3D mudeliga (või projektudeliga), et järgida ehitusprotsessi, tuua välja mahtusid, analüüsida ehitusobjekti kui 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.

1.2.1 Sissejuhatus

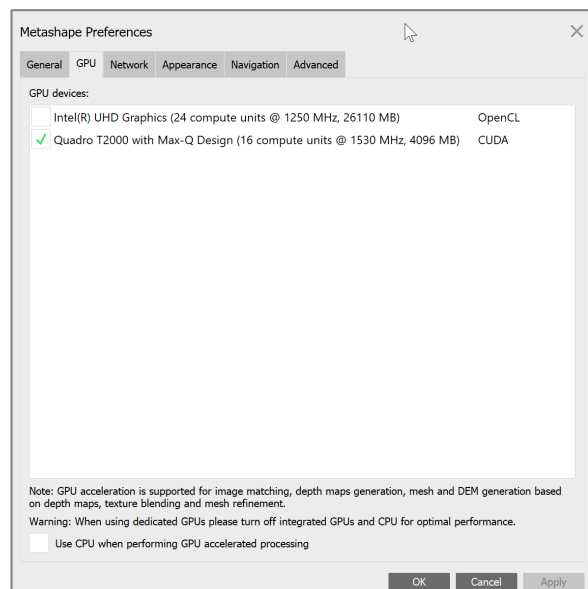
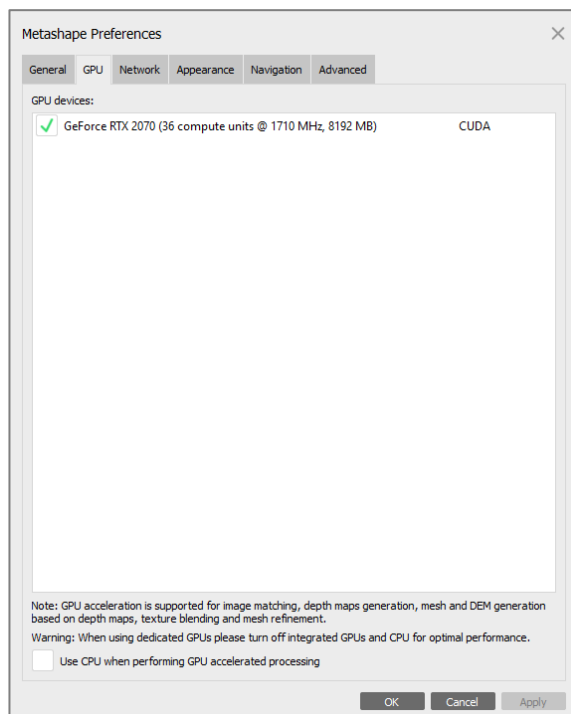
Käesolev analüüs lähtub Agisoft Metashape Professional tarkvara versioonist 1.6.2. Samas saab siin kirjeldatud tööprotsesse üle kanda ka teistele tarkvaradele (nt Bentley ContextCapture jt). Antud juhend lähtub ennekõike eeldusest, et lähtematerjal on kogutud drooniga, mis kasutab RTK-GNSS tehnoloogiat, 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 muutuda 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.

1.2.2 Arvuti ettevalmistus

Fotogrammeetrial 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, www.dronedeploy.com, 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**.



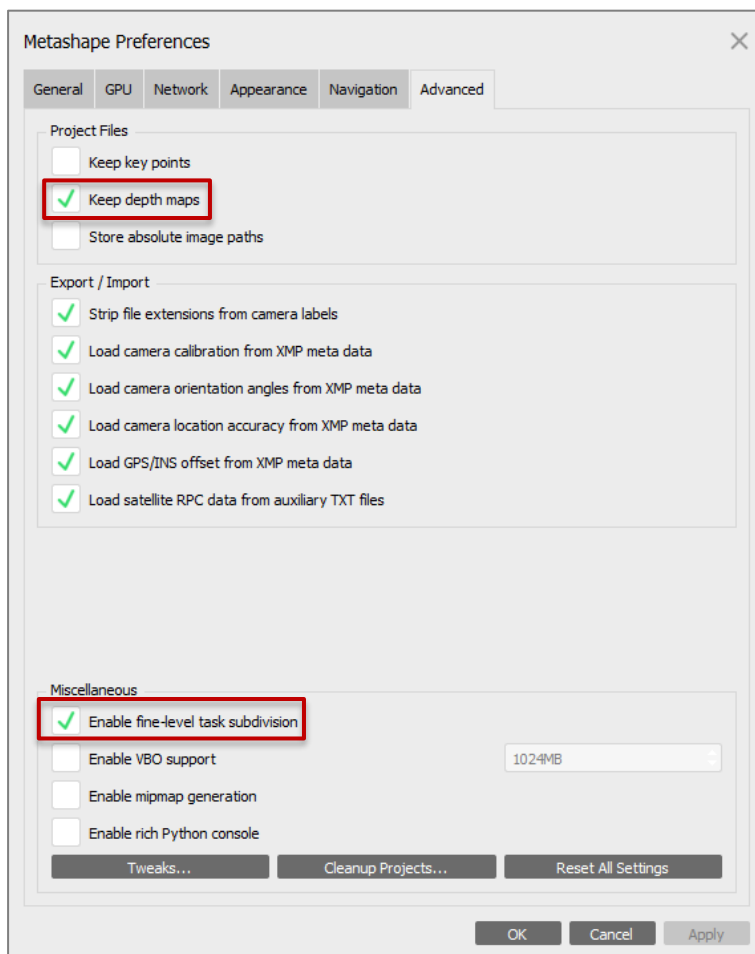
Avanevas dialoogis liigu paanile **GPU**. Siin kuvatakse kasutatava arvuti graafikakaardid (protssessorid). Alloleval pildil on toodud näide lauaarvuti (vasakul) ning sülearvuti (paremal) graafikaprotsessoritest. Mitte kõik graafikaprotsessorid ei pruugi kiirendada arvutusprotsessi, mistõttu on soovitatav 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

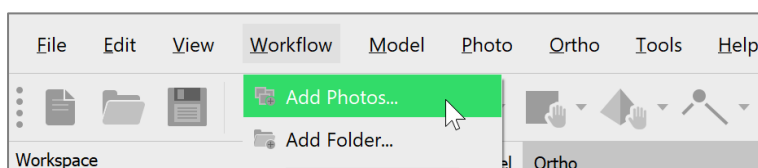
täielikult. Pane tähele, et juhul kui arvutis on kasutusel omaette graafikakaart, siis on soovitatav välja lülitada säte, mis lubab CPU-d kasutada GPU põhises analüüsis (vt sätet **Use CPU when performing GPU accelerated processing**). Olukorras, kus GPU võimekus on samaväärne või väiksem CPU-ga, võib antud säte siiski mõjutada ka arvutuse kiirust. Seetõttu tasub taas testida. Seadete muutmisel kliki 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

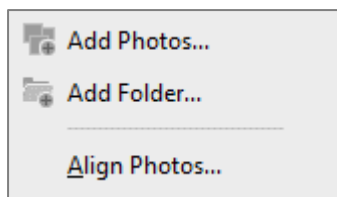


1.2.3 Drooniseire piltide import ning joondamine

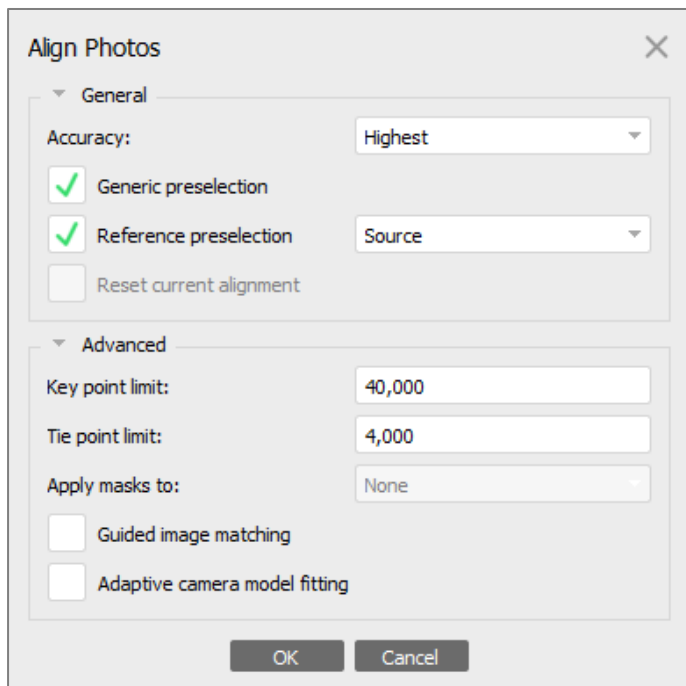
Piltide importimiseks vali tarkvara peamenüüst: **Workflow > Add photos / Add Folder...**



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**.



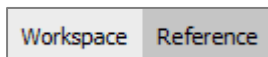
Teised **Accuracy** valikud (**Lowest**, **Low**, **Medium**) ei ole soovitatavad, kuna need vähendavad piltide kvaliteeti (vastavalt 64, 16 ning 4 korda). Samas **High** säte jätab skaala paika ning **Highest** tõstab skaalat 4 korda. Skaala suurendamine võib aidata piltidelt tunnuspunktide leidmist 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).

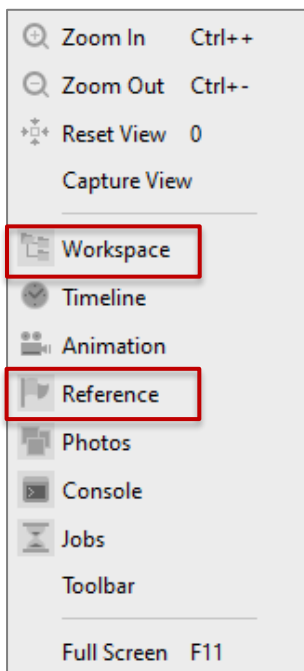
Soovitav on kasutada väärtust 4000. Olukorras, kus objekt on väike (telemast, sammas jne) ja vajatakse väga suurt täpsust, peaks punktide arvu kasvatama.

- 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 vaikinisi sätteid (säte ei ole aktiivne).

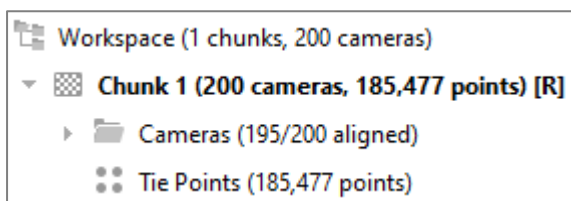
Peale sätete paika seadmist, klikki OK (dialoogi alaosas). Tulemiks arvutatakse hõre punkt pilv, millest lähtuvad järgnevad arvutused. Esialgse joondamise vaatamiseks vali paan: **Workspace**.



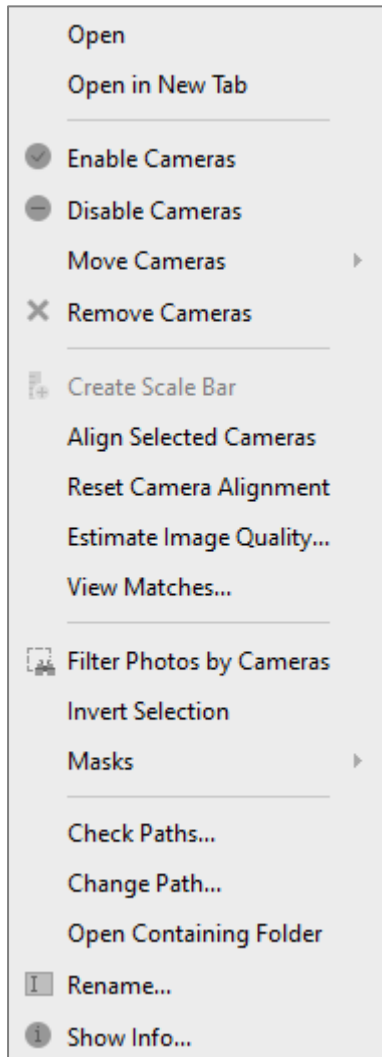
Märkus: Kui **Workspace** valik pole kuvatud, veendu, et peamenüüst oleks valitud: **View > Workspace**. Veendu, et ka **View > Reference** oleks aktiivne.



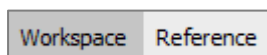
Workspace paan kuvab piltide koguarvu ning tunnuspunktide (**Tie points**) arvu.



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.



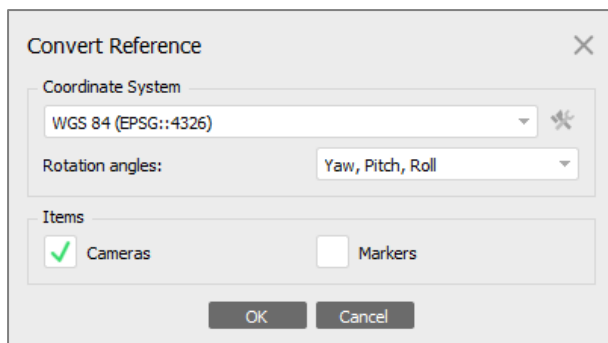
Järgnevalt seadistame koordinaatsüsteemi (kehtib vaid olukorras, kus kasutati RTK-GNSS UAV-d; kui seda ei kasutatud, vaata hilisemat alalõiku). Vali paan **Reference**.



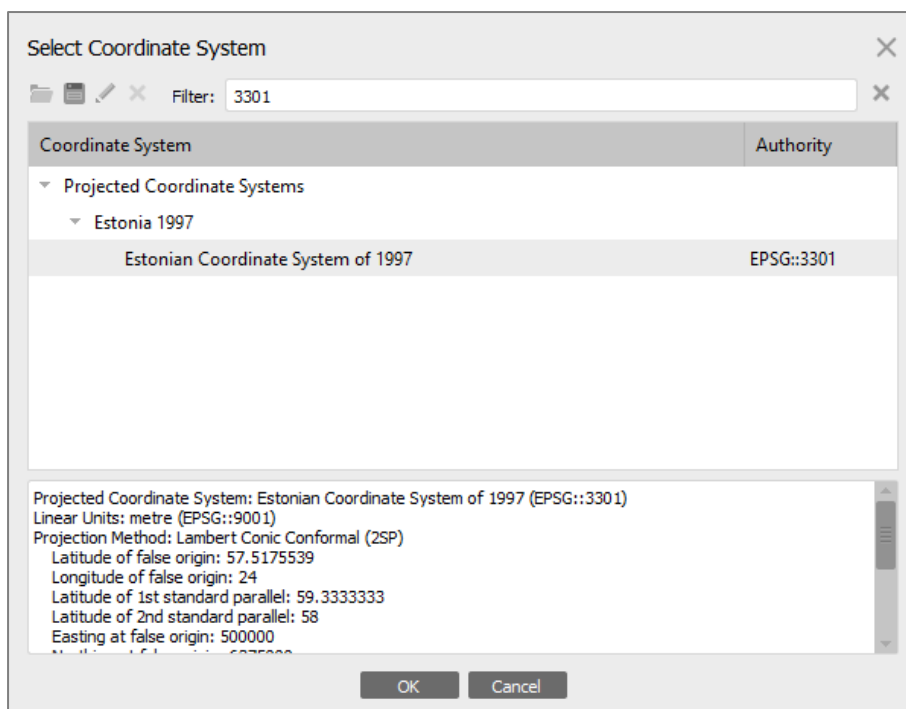
Reference menüüst vali **Convert** säte (vasakult neljas).



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



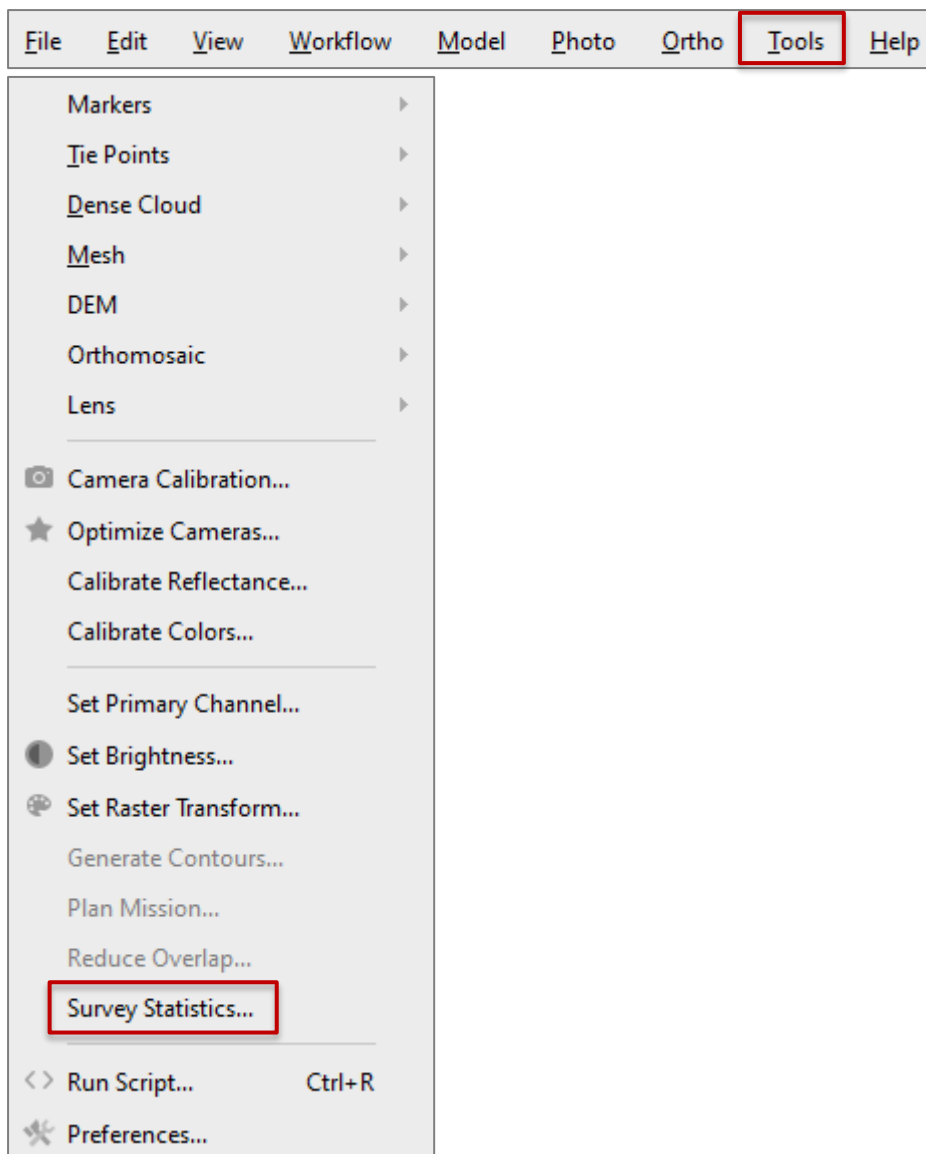
Kliki **Coordinate System** hüpikus, **More...** valik. Saad seejärel valida sobiva koordinaatsüsteemi. Kasuta filtrina: **3301**. See on Eesti koordinaatsüsteemi EPSG kood.



Vali **Estonian Coordinate System of 1997** nii, et see rida oleks hallikas. Sulge dialoog. 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 joondamisel 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.

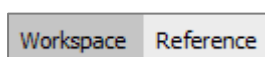
Joondamise statistilist andmestikku näed valikust: **Tools > Survey Statistics**.



1.2.4 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 ülesvõtteid (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**.

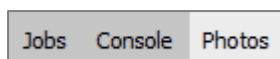
Avanevas dialoogis vali kataloog, millest leiad tekstifaili ühes maapealsete kontrollpunktide infoga. Vali fail ning impordi see oma projekti (kliki **Open**). Seejärel kuvatakse dialoog **Import CSV**.

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 saadaaval 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**.

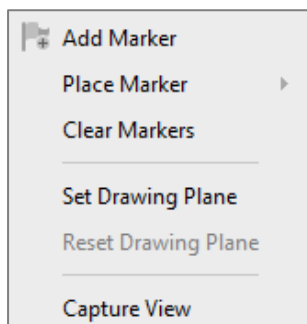
Nüüd kuvatakse imporditud maapealsed kontrollpunktid paanil **Reference**. Veendu, et kõik read veerus **Markers** oleks tähistatud linnukesega.

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								

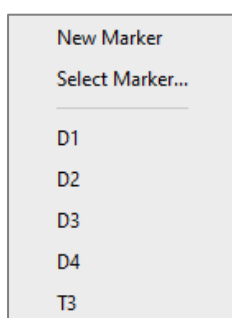
Liigu paanile **Photos**.



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
Total Error								
	Control points					0.007144		1.509
	Check points							

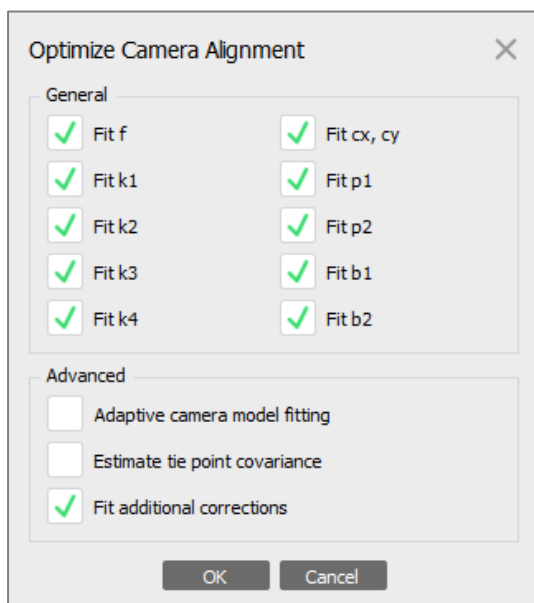
Järgneva olulise sammuna on vaja tagada, et markerid oleks korrektselt paigutatud ka teistel piltidel, millel need on esindatud. Seda tuleb teha ka siis, kui mudel on otseselt georefereeritud. Redigeeritud markerid kuvatakse roheliste lipukesega ning lisaks näidatakse neid ka **Reference** paanil **Projections** veerus kui lisareferentse (projektsioone). Pane tähele, et veerg **Error** esitab mudeli jääkvea vektorite keskmise pikkuse (praktikas 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 soovitatav 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 soovitatav 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 joondamist läbi maapealsete kontrollpunktide. Selle tulemusel peaksid mudeli vead (isekalibreerimise ning RTK-GNSS vigade summa) vähenema.



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

Lisaks on soovitatav 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 joondamise 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
Total Error							
Control points	0.010829	0.007056	0.005489		0.014042		0.297
Check points							

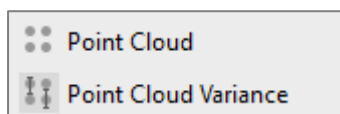
Alt. Err komponent peaks nüüd olema võrreldav plaaniliste veakomponentidega. Peale maapealsete kontrollpunktide märkimist markeritega on antud komponent tõenäoliselt suurim oma väärtuselt, ja seda siis enne **Optimize Cameras** kasutamist.

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

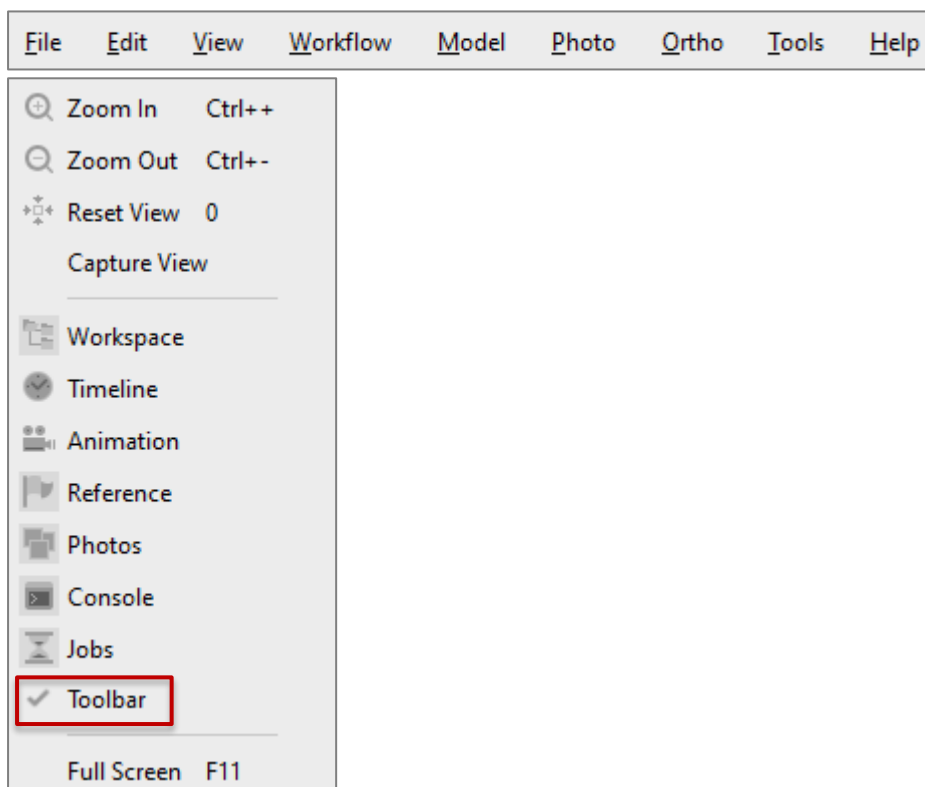
Juhul kui **Estimate tie point covariance** oli valitud kaamera optimeerimise käigus (*Optimize Cameras*), lisatakse projekti ka iseloomulike punktide dispersioonimudel. Selle nägemiseks vali **Point Cloud**.



Seejärel vali **Point Cloud Variance** säte.



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



1.2.5 Võrkmodeli arvutamine

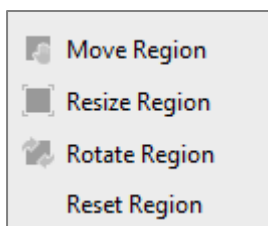
Hõredast punktipilvest lähtudes saab liikuda järgmise etapi juurde – võrkmodeli arvutamine (ingl *triangle mesh model*). Soovitatav on modelleerimist teostada sügavuskaartide (ingl *depth maps*) baasil, kuna tiheda punktipilve (nii sügavuskaardid kui ka tihe punktipilv on vaheprodukt enne võrkmodeli 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 modelleerimisulatuse) 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.

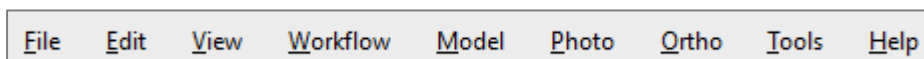


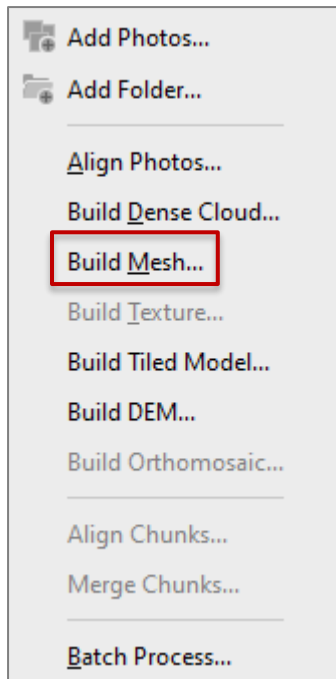
- **Move Region** – võimaldab lineaarselt perimeetri kasti nihutada
- **Resize Region** – võimaldab muuta perimeetri ulatust
- **Rotate Region** – võimaldab perimeetri kasti pöörata

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



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





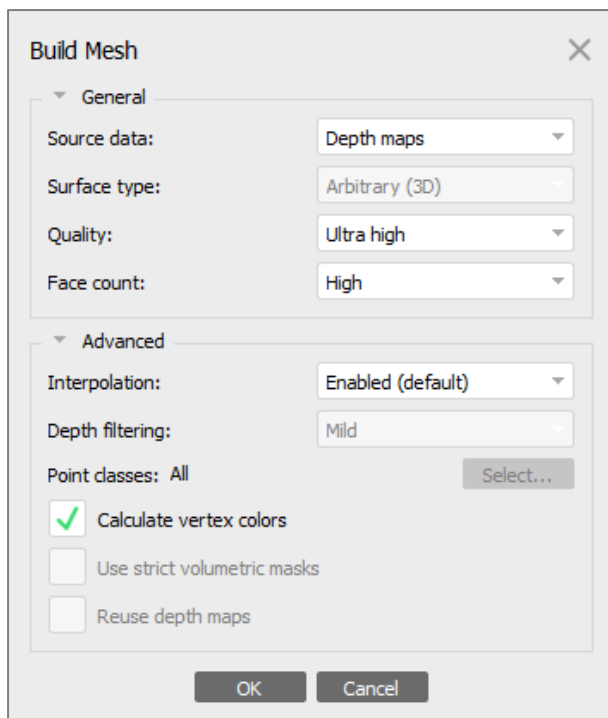
Avanevas dialoogis vali:

- **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* sättest, 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 lõppmudel. Võimalik on valida sätete *High*, *Medium* ning *Low* vahel. Need määravad optimaalse polügoonide arvu lähtuvalt mudeli detailsusastmest (määratud parameetriga **Quality**). Soovitav 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 võrkumodeli punktidele värvitoonid. Kui seda mitte valida, siis värve võrkumodelisse ei lisata.

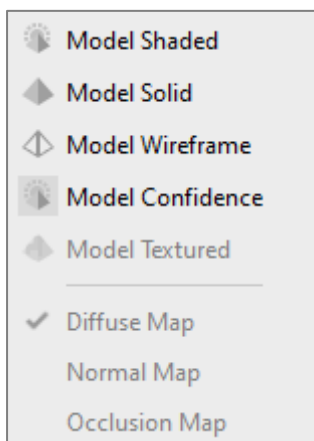
Säte **Use strict volumetric masks** on oluline vaid olukorras, kus kasutatakse tausta eemaldust (ingl *masking*) ning kui eesmärgiks on modelleerida üksikuid objekte (nt ausammas). Samas on see parameeter oluline kui soovitakse eemaldada näiteks haljastust üldisest arvutusprotsessist.

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

Peale seadete määramist võid klõpsata OK, misjärel viiakse läbi arvutus ning esitatakse lõppmodel. 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 usaldusväärsust 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.

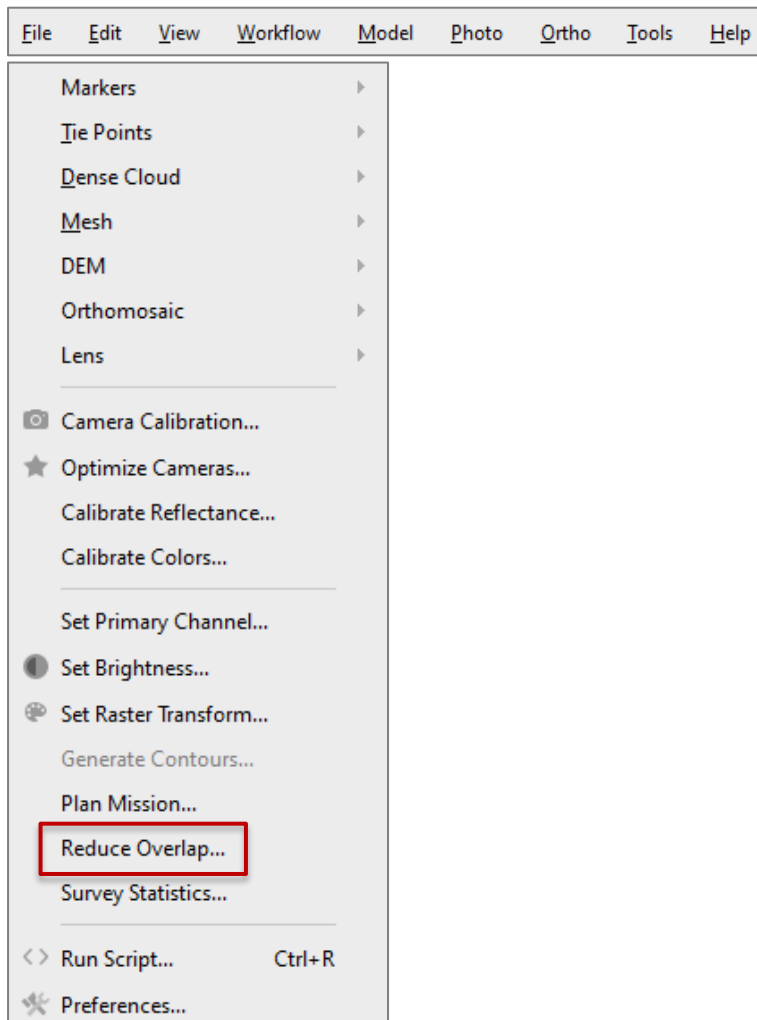
1.2.6 Võrkumodeli arvutussuutlikkuse parendamine

Olukorras, kus võrkumodeli 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.

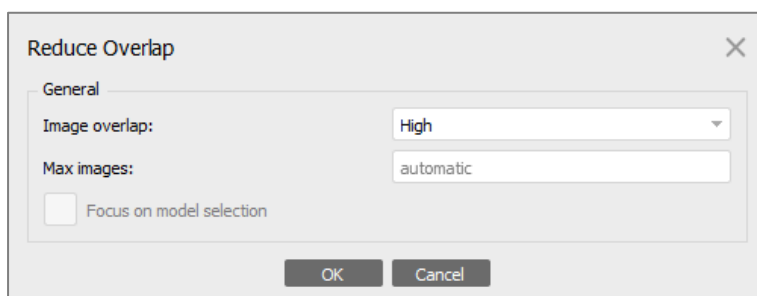
Kui perimeetrit pole võimalik vähendada, saab taimestiku piltidelt ka enne arvutamist eemaldada. Tegemist on siiski üsna aeganõudva protsessiga, mistõttu ajalist võitu ei pruugi me kokkuvõttes saavutada.

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**.



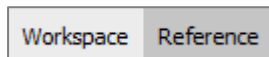
Avanevas dialoogis vali **Image overlap** osas kas *Low*, *Medium* või *High*. Soovitav on siiski jääda *High* sätte juurde.



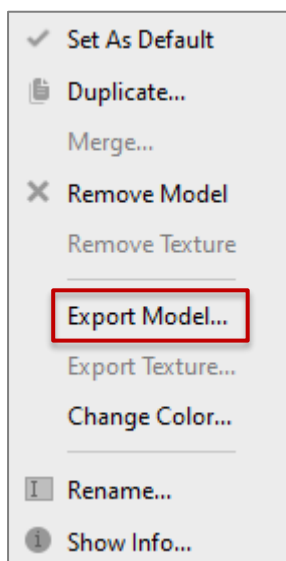
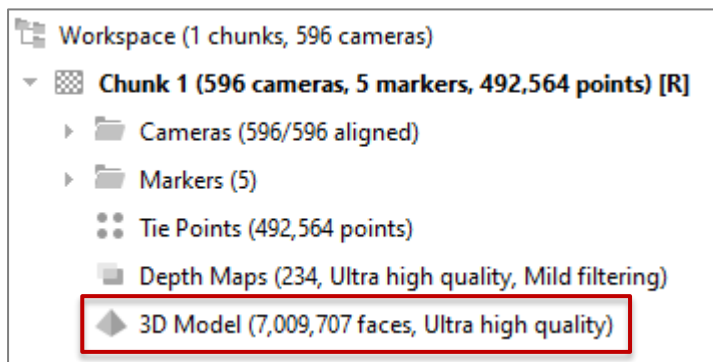
Säte **Max images** võib jääda vaikimisi seadele ehk **automatic**. Sätet **Focus on model selection** pole vaja aktiveerida. Seejärel käivita arvutus (klikki OK). Peale tegevuse lõppemist eemaldatakse pildid, mis pole optimaalse tulemuse saavutamiseks olulised (ja neid ei arvestata võrkmodeli loomisel).

1.2.7 Võrkmodeli eksport

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



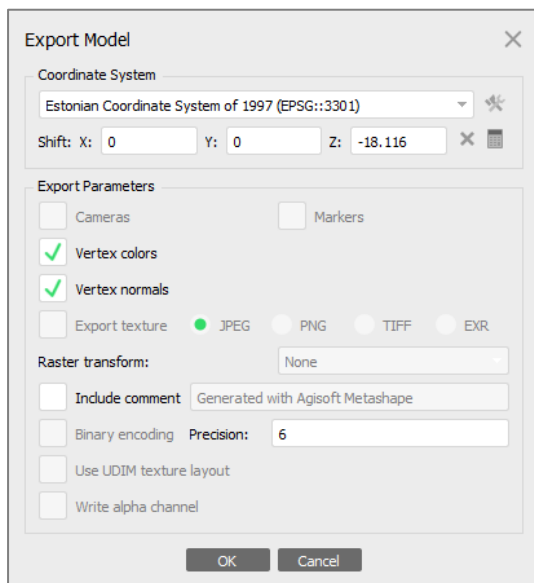
Tee paremklikk **3D Model** peal ning vali **Export Model**.



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 võrkmodelist 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

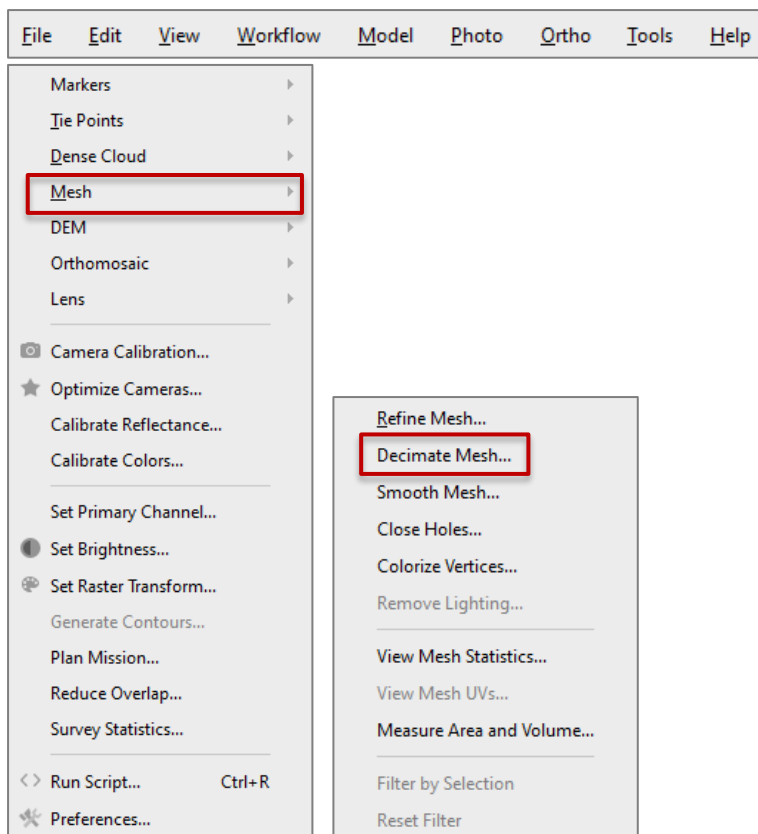
täpne meetod kõrguse teisendamiseks ning tekitab väikeseid vigasid mudelisse (Mäepealse 3 näitel jäävad need 3-4 mm juurde servaaladel, kusjuures vead vähenevad suunaga objekti keskele).



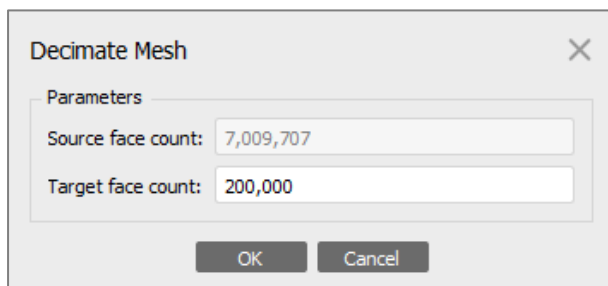
Juhul kui mudeli loomisel arvutati võrkmodelile ka värvid, siis peaksid valima **Vertex colors** sätte ja see info kaasatakse eksporti. Lisaks tasub valida **Vertex normals** säte. Järgnevalt kliki OK, et mudeli eksport teostada.

1.2.8 Võrkmodeli lihtsustamine

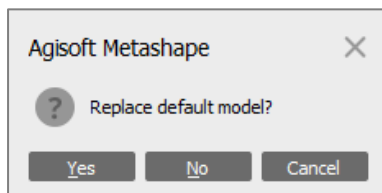
Juhul kui tarkvara kuhu võrkmodel järgnevalt imporditakse ei suuda seda visualiseerida/kuvada ning see on siiski oluline, tuleb vähendada tahkude arvu. Sellisel juhul vähendatakse geomeetrilist resolutsiooni ning algsest võrkmodelist saadakse lihtsustatud võrkmodel. Samas peaks lihtsustatud mudel esitama 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**.

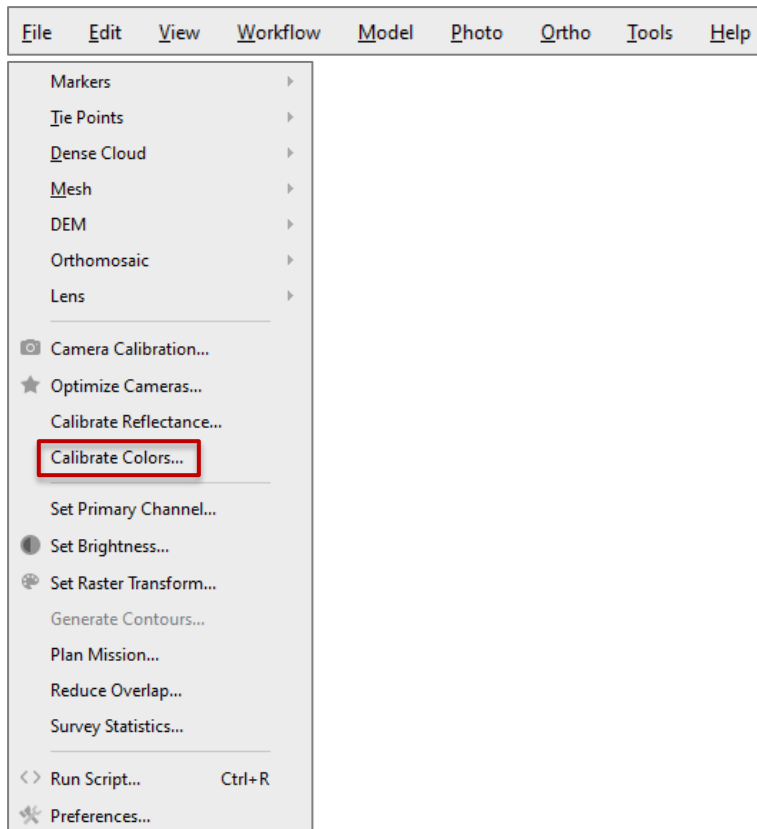


Olles tahkude arvu määranud, sulge dialoog OK nupust. Juhul kui tarkvara küsib, kas algne model asendada, siis on soovitatav siiski valida **No** valik.

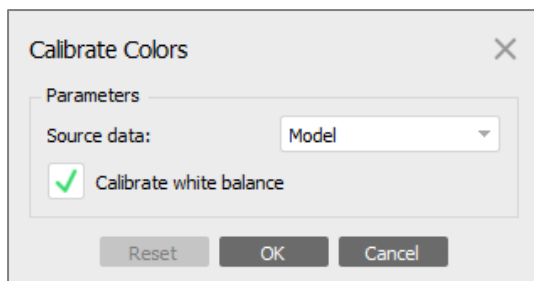


1.2.9 Ortomosaigi loomine

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...**

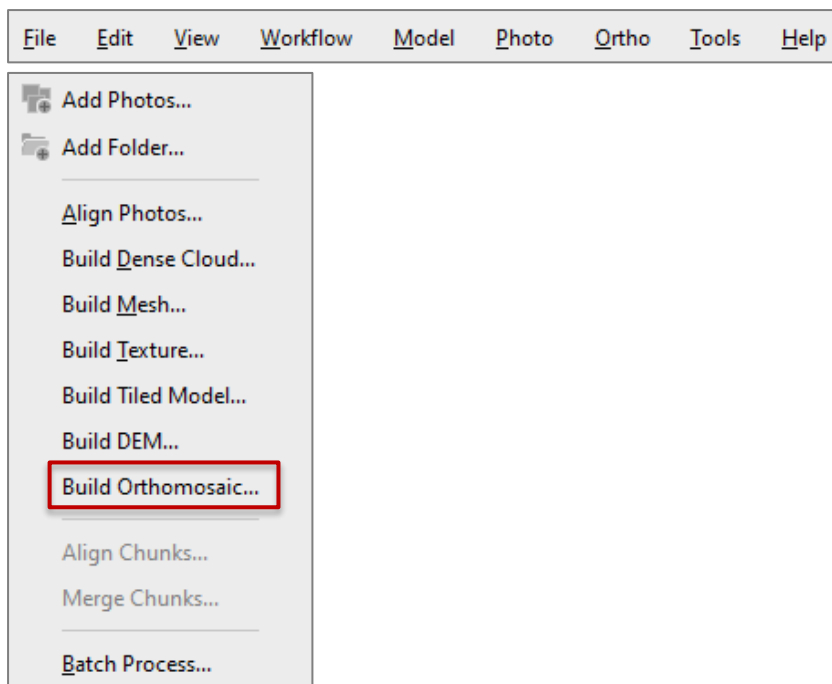


Avanevas dialoogis veendu, et **Source data** = **Model**. Lisaks on soovitatav valida ka **Calibrate white balance**.

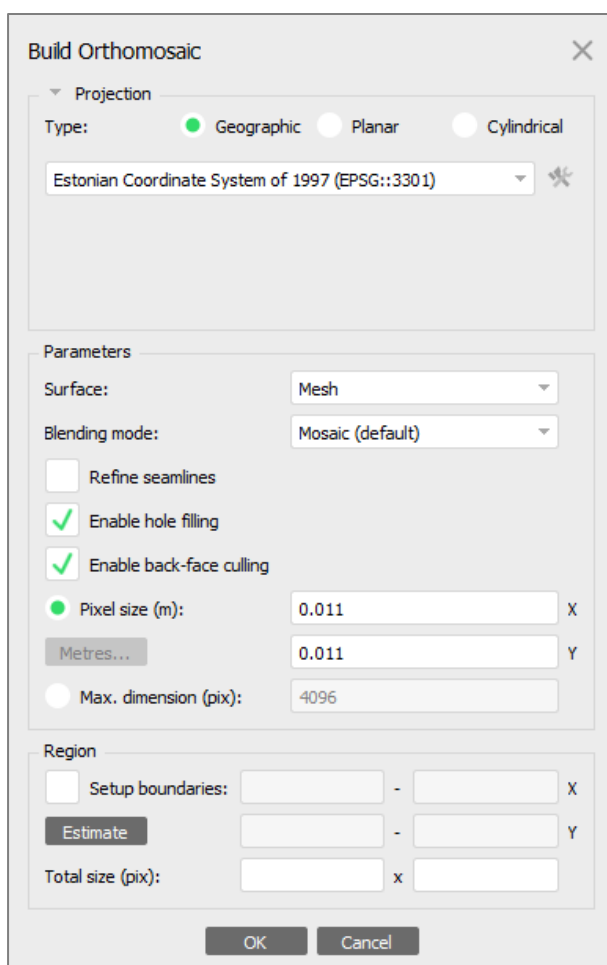


Sulge dialoog läbi OK valiku. Mudeli värvid on nüüd kalibreeritud.

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 ortomosaiki arvutatakse **DEM** (ingl *Digital Elevation Model*) baasil, kuid selleks peab esmalt DEM mudeli looma/arvutama, mistõttu võibki lähtuda juba olemasolevast võrkumudeli 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 võid 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 ortomosaikidele. 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).

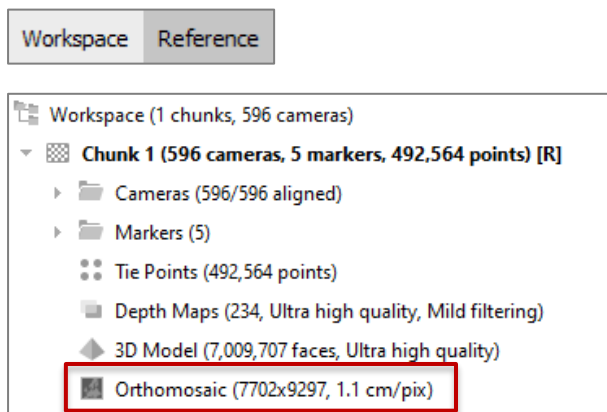
Enable back-face culling – võimaldab välja jätta need pindade osad, mille pinnanormaalid on vastupidised projekteeritud pinna suhtes. Seeläbi on võimalik suurendada arvutusefektiivsust (seega tasub aktiveerida).

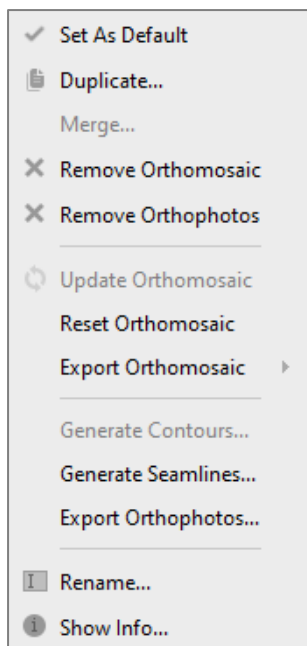
Pixel size – peaks olema suurem või võrdne pikslile vastava kaugusega maapinnal (ingl *ground sampling distance*, GSD). Väiksem väärtus suurendab pikslite arvu kui mitte efektiivset resolutsiooni.

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

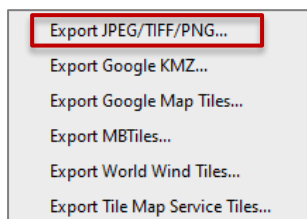
Peale seadete määramist saab liikuda ortomosaigi loomise juurde, kliki OK.

Ortomosaigi 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 Coördinate System of 1997**. Juhul kui eksportida TIFF formaati (soovitatav) võivad ülejäänud sätted jääda vaikimisi seadetele.

Export Orthomosaic

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

Raster
☒ Pixel size (m): 0.011 X
 Metres... 0.011 Y
☐ Max. dimension (pix): 4096
☐ Split in blocks (pix): 10000 x 10000
 Raster transform: None
 Background color: White

Region
☐ Setup boundaries: 537472.527 - 537557.249 X
 6584239.468 - 6584341.735 Y
 Reset
 Total size (pix): 7702 x 9296
☐ Write KML file
☐ Write World file
☐ Write tile scheme

Compression
 Image description:
 TIFF compression: LZW
 JPEG quality: 90
☒ Write tiled TIFF
☐ Write BigTIFF file
☒ Generate TIFF overviews
☒ Write alpha channel

Export... Cancel

Pixel size – vaikimisi 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 eksportida 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).

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 mees pidada, et georefereerimise ning valideerimise punktid ei tohi omavahel kattuda.

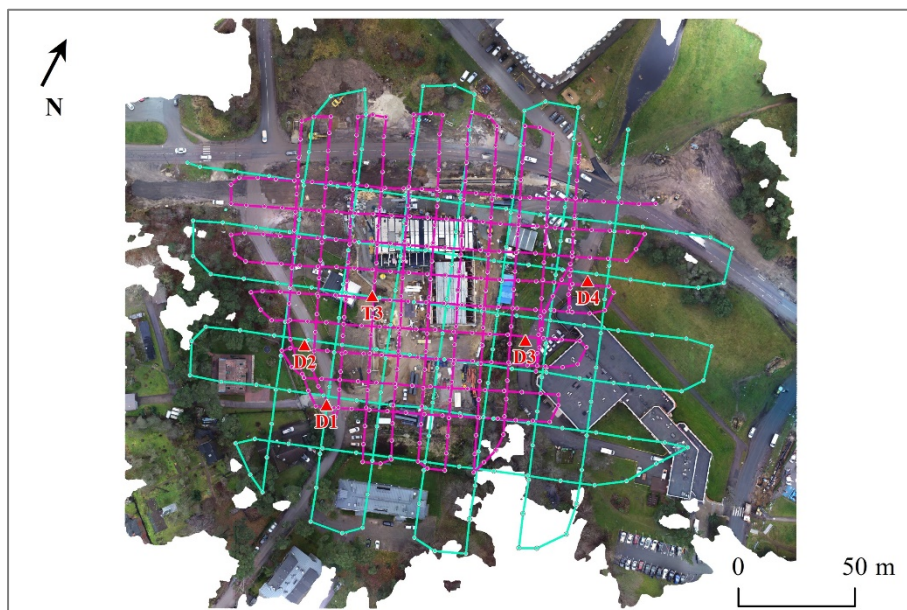
2.1. Hoone mõõdistamise veaanalüüs

Hoone valideerimise näide on läbi viidud pilootala Mäepealse 3 (TalTech linnaku õppehoone) juures. Mäepealse kontrollpunktid on esitatud tabelis 2.1 ning märgitud koos drooni lennutrajektooriga joonisele 2.1.

Tabel 2.1. 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

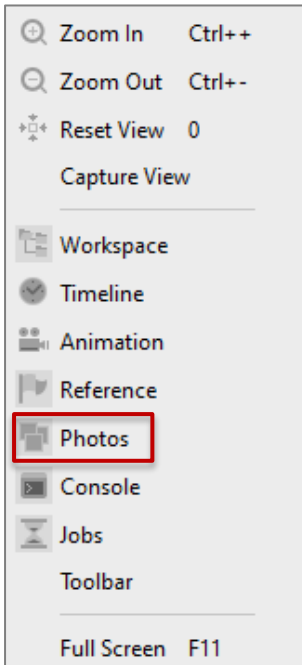
* T3 võib olla ebatäpne ning seda ei saa kasutada valideerimisel, kuid võib kasutada georefereerimisel.



Joonis 2.1. Ortomosaiik Mäepealse 3 pilootalast ühes drooni lennutrajektooriga 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**.



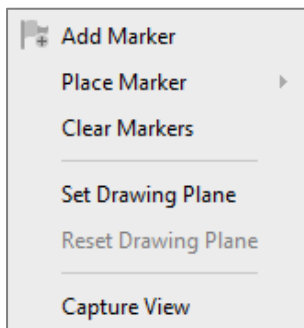
Fotode paanilt vali juhuslik pilt, mis kuvatakse seejärel tarkvara peamises vaateaknas. Täpsete koordinaatide saamiseks mudelist on soovitatav valida pilt nii, et kontrollpunkt jääks enam-vähem alloseval pildil näidatud punase sõõri sisse.



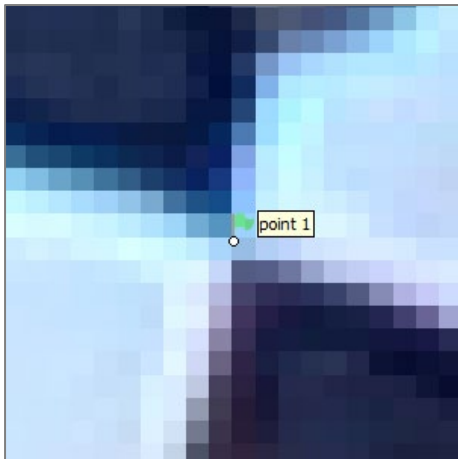
On oluline, et kontrollpunkti keskpunkti saab täpselt tuvastada. Näiteks:



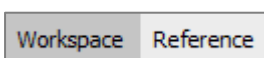
Üldiselt peaksid kontrollpunktid (nt matid) olema joondatud UAV liikumise suunas (sellisel juhul on keskpunkti lihtsam tuvastada). Järgnevalt tee paremkliik punktis, kuhu soovid lisada markerit. Kuvatakse menüü, kus vali **Add Marker**.



Seejärel kuvatakse marker pildil (rohelise lipuna).

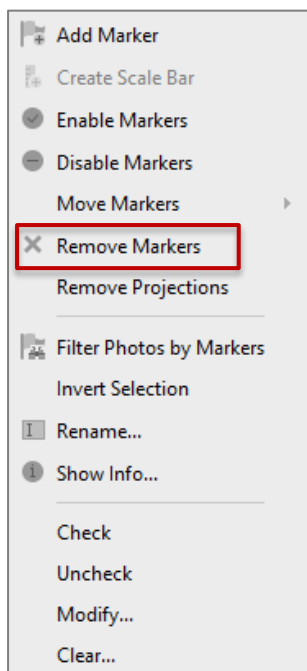


Koordinaadid (**Easting, Northing, Altitude**), mis on markeriga seotud, on lõplikud ning need kuvatakse **Reference** paanil. Need väärtused ei muutu ka siis kui markerit pildil korrigeeritakse. Veendu, et markeri ees ei oleks linnukest.



Markers	Easting (m)	Northing (m)	Altitude (m)	Accuracy (m)	Error (m)	Projections	Error (pix)
point 1	537496.977327	6584287.701684	41.059705	0.005000	0.000000	50	0.000
Total Error							
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 paremkliik (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
Total Error							
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**.

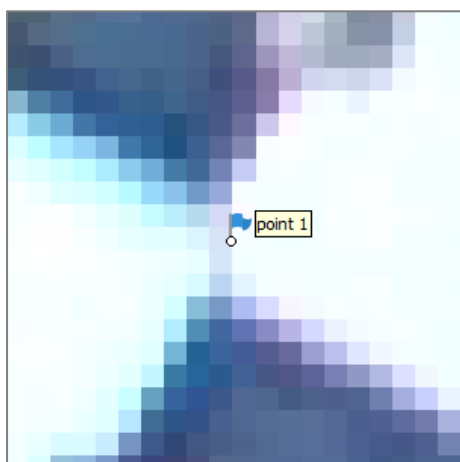


Seejärel kuvatakse vea komponendid:

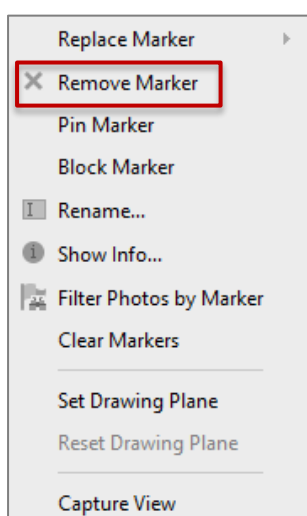
Markers	East err (m)	North err (m)	Alt. err (m)	Accuracy (m)	Error (m)	Projections	Error (pix)
 point 1	0.001279	-0.002002	0.006644	0.005000	0.007056	48	0.112
Total Error							
Control points							
Check points	0.001279	0.002002	0.006644		0.007056		0.112

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.

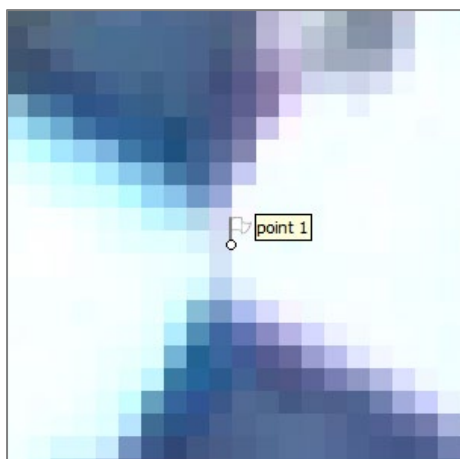
Kui markerit ei ole täpsustatud, kuvatakse see sinise alatooniga.



Peale markeri redigeerimist muutub see roheliseks. Kui kontrollpunkti keskohta 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 analoogsse tulemuseni nagu alloleval pildil.

Markers	Easting (m)	Northing (m)	Altitude (m)	Accuracy (m)	Error (m)	Projections	Error (pix)
☐ point 1	537509.060878	6584322.681082	40.872283	0.005000	0.008250	36	0.318
☐ point 2	537429.794762	6584274.368014	44.393388	0.005000	0.000737	40	0.410
☐ point 3	537496.974410	6584287.709404	41.035494	0.005000	0.022003	47	0.308
☐ point 4	537413.624326	6584242.340731	44.258457	0.005000	0.007600	35	1.682
☐ point 5	537433.877893	6584223.924206	44.297827	0.005000	0.005015	28	0.383
Total Error							
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 ülaseras 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 tõenäolisemad koordinaadid. Sellisel juhul ei pöörata tähelepanu veerus **Error** kuvatavale informatsioonile (kuna projektsioone ei täpsustata, siis jääb see alati 0).

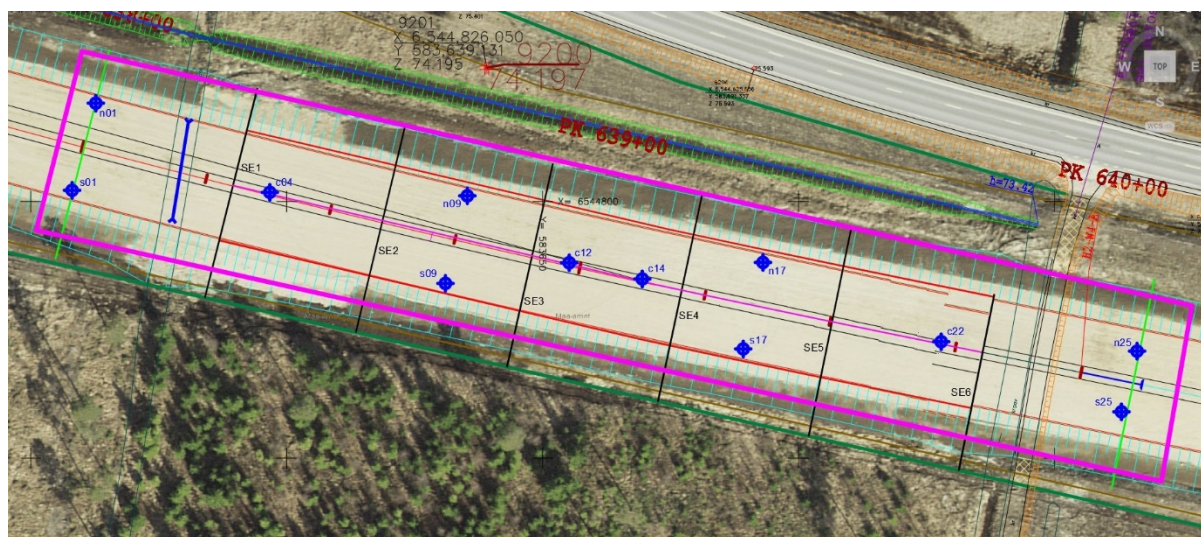
Antud protsessi lõpptulemusena saame UAV poolt leitud koordinaadid. Kui seda võrrelda tabel 2.1 poolt esitatud väärtustega, saamegi mudeli enda vea. Veaanalüüsi koondtulemused Mäepealse 3 näitel on esitatud artiklis Varbla et al. (2020).

2.2. Sõidutee mõõdistamise veaanalüüs

Sõidutee valideerimine on läbi viidud pilootala Kose-Võõbu maantee juures. Valideerimiseks on kasutatud terrestriilist laserskaneerimist a priori täpsusega 2 mm. Maapealsed kontrollpunktid on esitatud tabelis 2.2 ning joonisel 2.2. Drooni ülelennud on teostatud erinevatelt kõrgustelt (40 m, 50 m, 60 m).

Tabel 2.2. 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 2.2 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 m². 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.

2.2.1 Otsene georefereerimine

Georefereerimisel on kasutatud vaid kaamera enda koordinaate (saaduna navigatsiooni andmetest). Tulemused on esitatud tabelis 2.3.

Tabel 2.3. Otsene georefereerimine, veaanalüüs lähtuvalt terrestrialselt 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

2.2.2 Integreeritud georefereerimine (0.005 m)

Lisaks kaamera positsioonidele on sõiduteel märgitud 12 maapealset kontrollpunkti (vt joonis 2.2 ning tabel 2.2), millega täpsustati joondamist. Kasutati maapealsete kontrollpunktide vaikumisi täpsust (0.005 m). Tulemused on esitatud tabelis 2.4.

Tabel 2.4. Integreeritud georefereerimine, veaanalüüs lähtuvalt terrestrialselt laserskaneerimisest

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

2.2.3 Integreeritud georefereerimine (0.000 m)

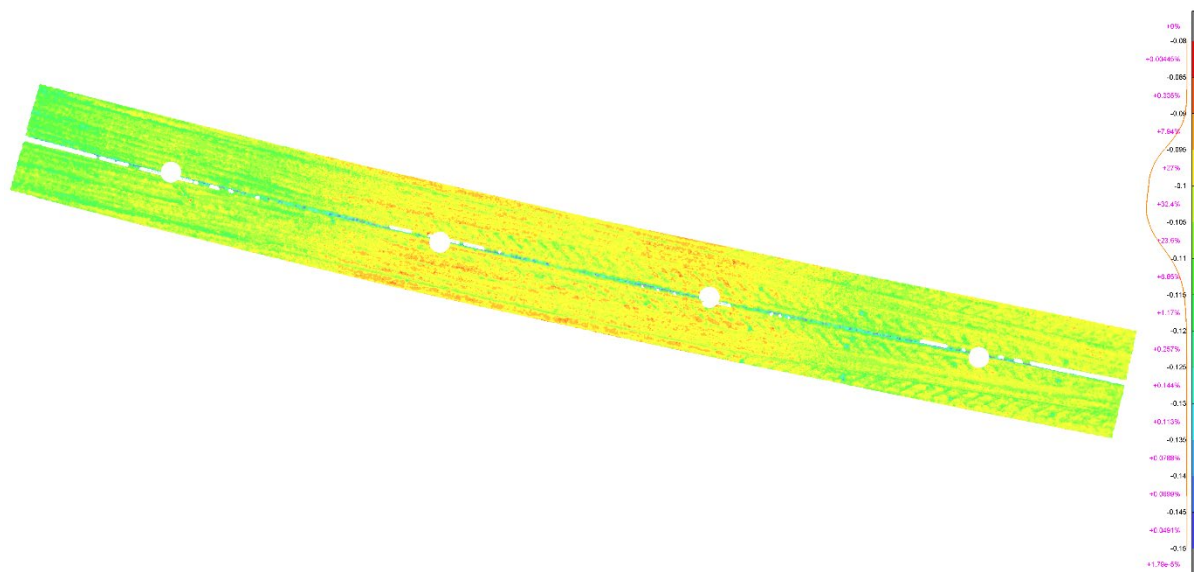
Lisaks kaamera positsioonidele on sõiduteel märgitud 12 maapealset kontrollpunkti (vt joonis 2.2 ning tabel 2.2), millega täpsustati joondamist. Kasutati maapealsete kontrollpunktide täpsust 0. Tulemused on esitatud tabelis 2.5.

Tabel 2.5. Integreeritud georefereerimine, veaanalüüs lähtuvalt terrestrialselt laserskaneerimisest

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

2.2.4 Kokkuvõte

Juhul kui kasutada ainult kaamera koordinaate tekib kausiefekt ning vertikaalne nihe (sõltumata valitud lennukõrgusest, joonis 2.3), mis on suuresti tingitud kaamera isekalibreerimise vigadest.



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

Integreeritud georefereerimine (maapealsete kontrollpunktide täpsus 0.005 m) vähendab mõlemat viga (võrdle tabeleid 2.3 ja 2.4). 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 2.3 saab välja lugeda, et droonimudel ühtlustab teekattemärgistuse). Samas tasub rõhutada, et see omakorda sõltub kasutusjuhust, milleks mõõdistustulemusi hilisemalt kasutatakse.

Referentsid

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