

Kaugseire olemasolevate võimaluste ning lahenduste kirjanduse ülevaade ehitussektorile

Raido Puust, Tallinna Tehnikaülikooli Ehituse ja arhitektuuri instituudi professor

2019

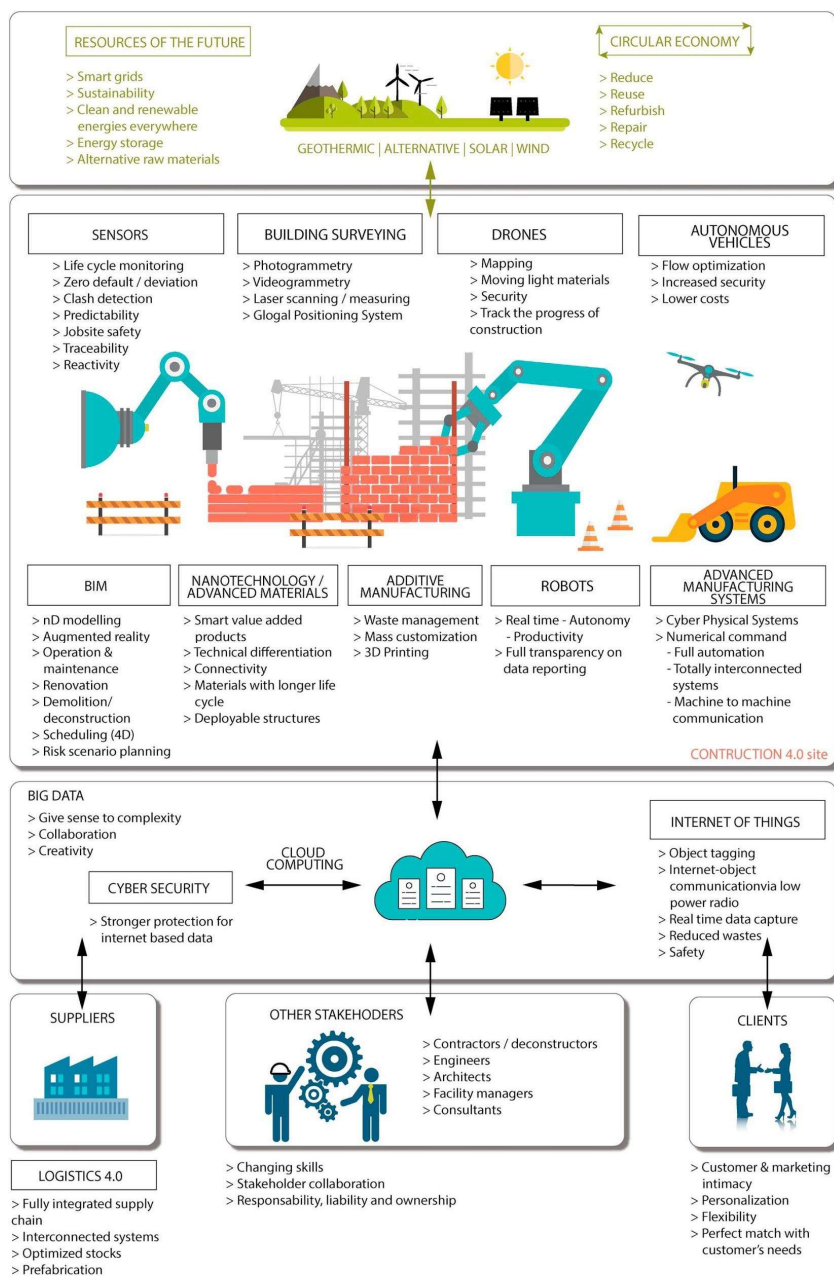
Sisujuht

1.	Kaugseire ehitussektorile	3
2.	Ülevaade kaugseirest	5
3.	Kasutusjuhud	8
3.1	Satelliitseire	9
3.1.1	Ladustatud, taaskasutatava ehitusmaterjali mahuline hindamine	9
3.1.2	Ehitustegevuste monitoorimine	9
3.1.3	Olemasolevate konstruktsioonide deformatsiooni monitooring	10
3.1.4	Maapinna (katendi) energiabilansi monitoorimine	11
3.2	Aeroskaneerimine	12
3.2.1	Linnamorfoloogia uuringud	12
3.2.2	3D katuse mudelite progressiivne täpsustamine	13
3.2.3	Ehitiste fassaadide päikesekiirgus	15
3.2.4	Sõidutee koridori valikuga seotud analüüsid	16
3.3	Drooniseire	17
3.3.1	Möödistamine	20
3.3.2	Möödistamine päästeoperatsioonide planeerimiseks	20
3.3.3	Lähteandmete mudel disaini alternatiivide analüüsiks	21
3.3.4	Automatiseeritud kontrolltegevused	21
3.3.5	Semantiline segmenteerimine	23
3.3.6	Infrastruktuuri monitooring	23
3.3.7	Energiaaudit	25
3.3.8	Deformatsioonide mõõtmised	26
3.3.9	Ehitusplatsi monitoorimine	27
3.3.10	Ehituse ohutuse monitoorimine	28
3.4	Mobiilsed LiDAR-süsteemid	31
3.4.1	Üksikute elamute eraldamine	31
3.4.2	Infrastruktuuri kontroll	31

3.4.3	Sõiduraja märgistuse analüüs	33
3.4.4	Nähtavuse ulatuse analüüs	34
3.5	Maapealne laserskaneerimine	35
3.5.1	Scan-to-BIM ning Scan-vs-BIM	35
3.5.2	Automaatne tellingu platvormide kontroll	36
3.5.3	Pragude määramine konstruktsiooni komponentidel	36
3.5.4	Niiskustaseme määramine ehitusmaterjalides	36
4.	Kokkuvõte	38
	Lisa 1. Tänaused rakendused (kokkuvõte)	39
	Referentsid	41

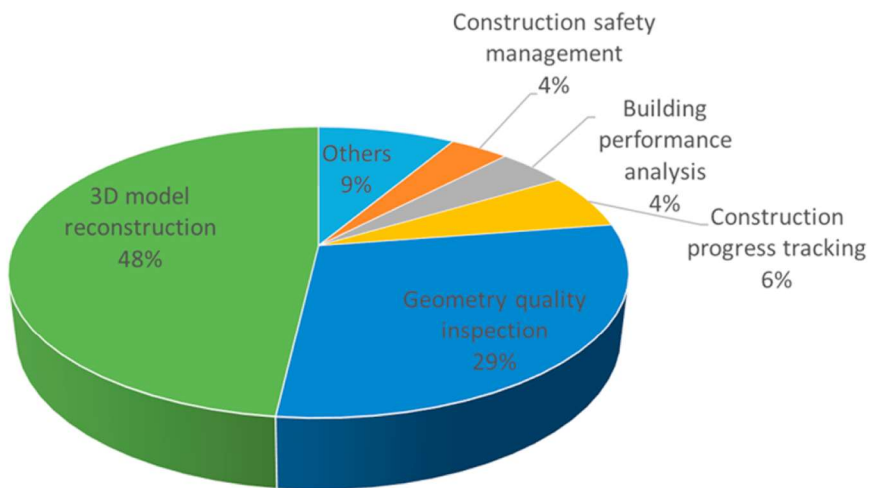
1. Kaugseire ehitussektorile

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 punkt pilve rakenduste lõikes ehitussektoris (allikas: Wang and Kim, 2019). Grupp “Others” sisaldab: hoonete renoveerimist, ehitustegevuste automatiseerimist, pärandiga seotud ning robotiseeritud navigeerimist.

Punkt pilvest teostusmodelite (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) geomeetriline modelleerimine; (b) objekti tuvastus ning (c) objekt-relatsiooniline modelleerimine.

2. Ülevaade kaugseirest

Üldjoontes võib kaugseirena vaadelda mistahes objekti vaatlust, mis toimub distantsilt ning ei ole vaadeldava objektiga otseses kontaktis (Toth and Jóźków, 2016). Viimase kümnendi jooksul on kaugseire meetodid ning võimalused oluliselt täienenud ja seda ennekõike tehnoloogia (sh sensorite) arengute tõttu. Näiteks on droniseire 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 lahusus) ning (c) vaatluse kordumise vahemik (ajaline lahusus). Sellest lähtuvalt jagame me siinses ülevaates kaugseire nelja suuremasse gruppi, mis on kokku võetud tabelis 2.1.

Tabel 2.1. 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)

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).

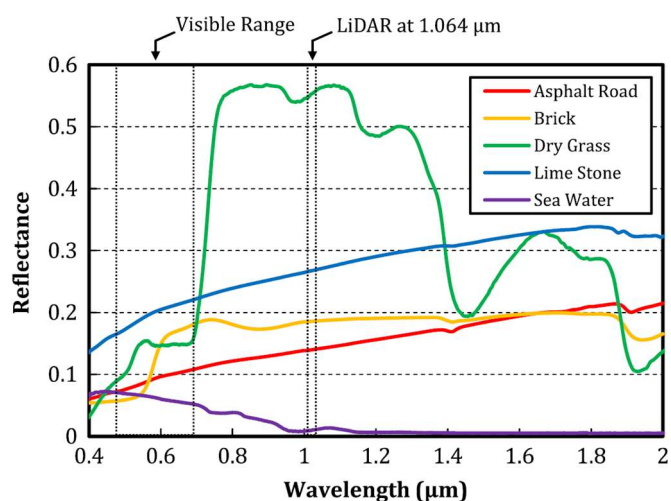
Satelliidil baseeruvaid seiresüsteeme on väga palju erinevaid ja seda nii kommerts- kui vabakasutuseks, antud ülevaates keskendume ennekõike avatud andmetele (tabel 2.2). Enne satelliitseire võidukäiku toimus kaugseire peaausjalikult õhuseire platvormide kaudu. Täna päeval on need kaks platvormi aga üha rohkem üksteisele lähenemas ja seda just lahususvõime 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 2.2. Sentinel seeria kaugseire satelliitsüsteemid (allikas: Toth and Józków, 2016)

Nimetus	Kasutusel	Konstellatsioon	Sensor	Ruumiline eraldusvõime (m)	Vaalu laius (km)	Korduseire (päevad)
Sentinel-1	2014 2016	Duaal	C-band SAR	5 x 5 5 x 20 25 x 40	80 250 400	12 6 (duaal)
Sentinel-2	2015 2016	Duaal	13 MS	10 x 10 20 x 20 60 x 60	290	10 5 (duaal)
Sentinel-3	2015 2017	Duaal (kolmsus plan.)	21 MS 11 MS (IR)	300 x 300 500 x 500 1000 x 1000	1270 1420 750 (nadir)	< 2

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 2.1).



Joonis 2.1. Erinevate materjalide spektraalne peegeldustegur nähtavast valgusest infrapunakiirguseni (allikas: Yan *et al.*, 2015)

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 2.3). 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.

Droone opereeritakse üldjuhul vaatlusala lähedusest, mistõttu on ka oluline tähele panna kohalikke 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 2.3. 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.

3. Kasutusjuhud

Kaugseiret saab ehitussektoris kasutada mitmeti. Uued kasutusjuhud saavad võimalikuks tänu kaugseire tehnoloogia pidevale täiustamisele. Seda saab kasutada nii ehitustegevuste jälgimisel kui olemasoleva möödistamisel. 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 3.1.

Tabel 3.1. 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"> • 2D pankromaatiline/spektraalne, 2D vektor 	<ul style="list-style-type: none"> • 3D punktipilv, digitaalne pinnamudel, stereopilt, stereo-panoraamid, mitmik-vaatepunktiga pildid, 3D mudel jpt.
Rakenduse ulatus	<ul style="list-style-type: none"> • Maa-ala madal-ning keskmise resolutsiooniga kaardistus • Piiratud rakendusvõimekus kõrgematel resolutsioonidel, sh ehitise tasandil kasutamine 	<ul style="list-style-type: none"> • Üldiselt rakendatav mistahes andmetele (erinevate resolutsioonidega) • Võimalus kasutada erinevate vaatenurkade alt
Eelised	<ul style="list-style-type: none"> • Väga hästi läbi uuritud • Lihtne andmehõive • Lihtne kasutusele võtta 	<ul style="list-style-type: none"> • Kõrgusinfot saab filtreerida valgustugevusest lähtuvalt • Perspektiiviga seotud moonutuste vaba • Mahulised erisused
Puudused	<ul style="list-style-type: none"> • Sõltub valgustatusest ning atmosfääri tingimustest • Piiratud vaatenurgad, perspektiivi moonutused 	<ul style="list-style-type: none"> • Ebausaldusväärne 3D info võib kaasata tehisklikku infot • Osaliselt tegemist veel endiselt kuluka andmehõive- ja töötlusmeetodiga

3D vaatlused on ehitussektori omapära silmas pidades väga väärtuslikud, kuna kõiki möödistusi saab analüüsida lähtuvalt ehitusinfo mudelitest. 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.

3.1 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 peegeldumishäitaja korral ühes suurema spektraalse selektiivsuse indeksi väärtustega (ingl *spectral discrimination index* ehk SDI).

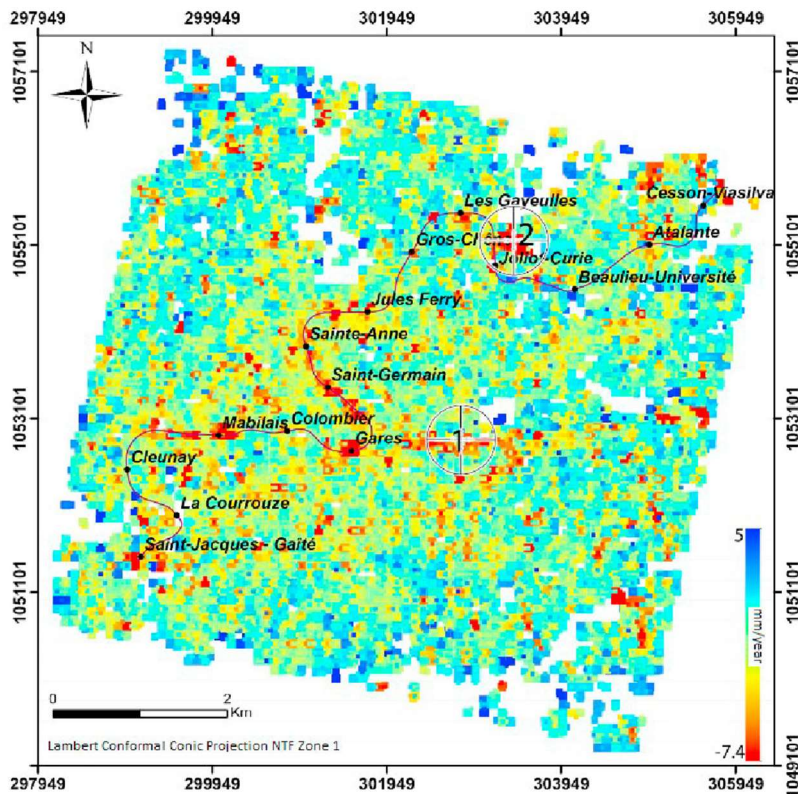
3.1.1 Ladustatud, taaskasutatava ehitusmaterjali mahuline hindamine

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 täpsus 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 igaaastastest missioonidest, saab läbi viia ajaloolisi analüüse, mille näiteks vaadeldakse taaskasutatava asfaltreespuru ladustamisplatse (Ashtiani *et al.*, 2019). Taaskasutatavuse protsent antud materjalile on USAs ca 20% uue asfaldi koostisest, mistõttu lihtne metoodika 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.

3.1.2 Ehitustegevuste monitoorimine

Suuremamahulisi maapinna liikumise kiiruseid saab väga täpselt arvutada satelliidipiltide aegreast läbi PSIinsar (ingl *permanent scatter in synthetic aperture radar interferometry*) meetodi. Maapealsete

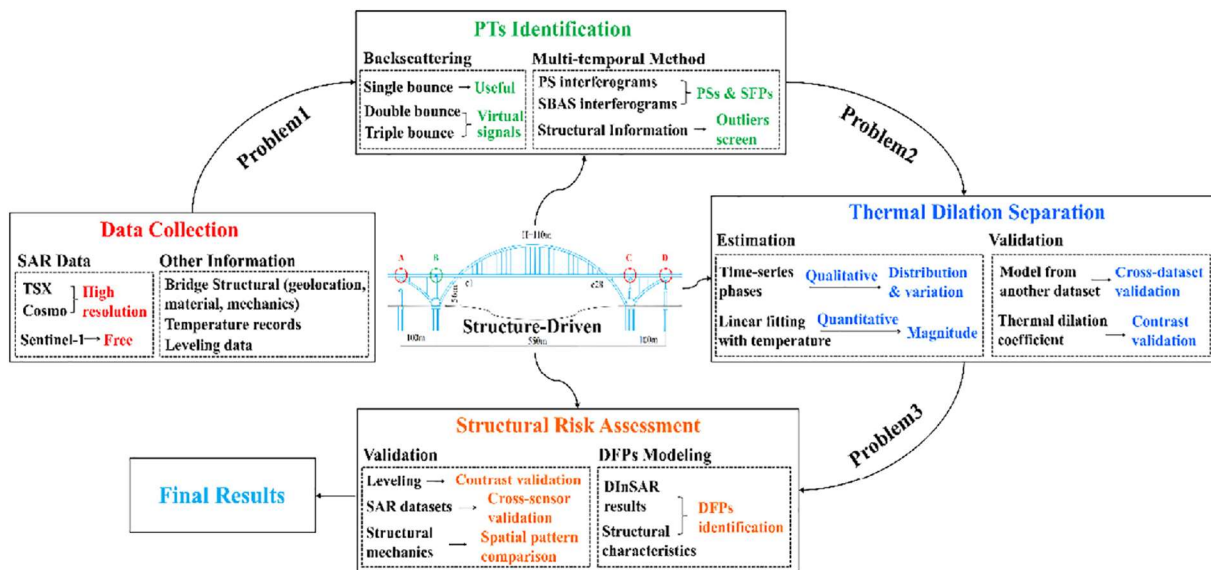
kontrollmõõtmiste tulemusena on saadud keskmiseks vertikaalse liikumise tuvastamise täpsuseks 0.75 mm (Voormansik, 2013). Antud meetodid on rakendatud nii hoonete (Voormansik, 2013), sildade (Varik, 2017) kui tunneli ehituse monitooringute juures (Nahli *et al.*, 2018). Näiteks, Nahli *et al.* (2018) kasutas Sentinel-1 andmeid, et monitoorida tunneli ehitusega kaasnevat maapinna liikumisi, 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 3.1). 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.



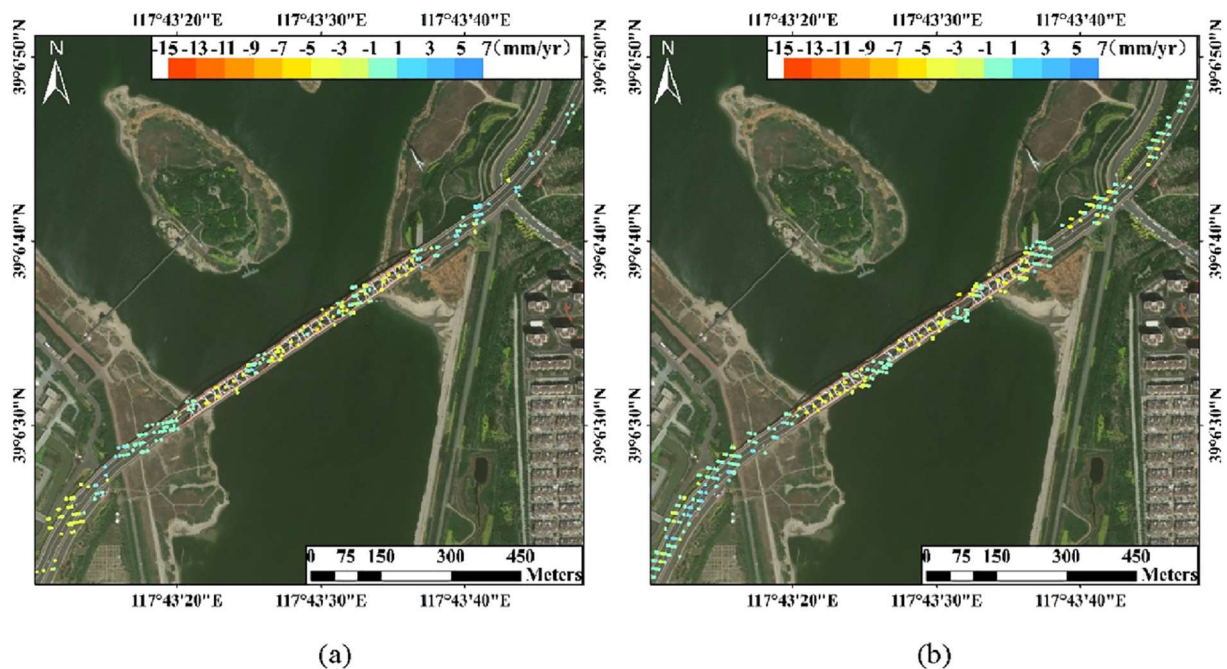
Joonis 3.1. Deformatsiooni kiirus (mm/aastas) vahetult metrooliini ümbruses (joonisel märgitud tumeda joonena) (allikas: Nahli *et al.*, 2018)

3.1.3 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 põhist 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 3.2). Näidisdeformatsioonide kaart on esitatud joonisel 3.3.



Joonis 3.2. Üldine tehniline raamistik konstruksiooni vaatluseks läbi mitme-aastase DInSAR meetodi (allikas: Qin et al., 2018)



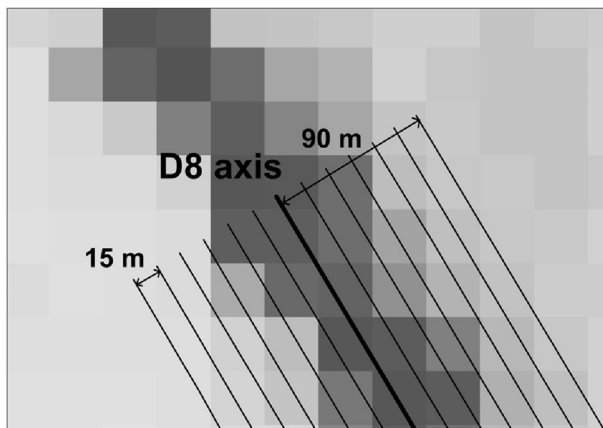
Joonis 3.3. Deformatsiooni kiiruste kaart kaarsilla näitel: (a) tõesva ning (b) langeva orbiidi Sentinel-1 andmestikult (allikas: Qin et al., 2018)

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

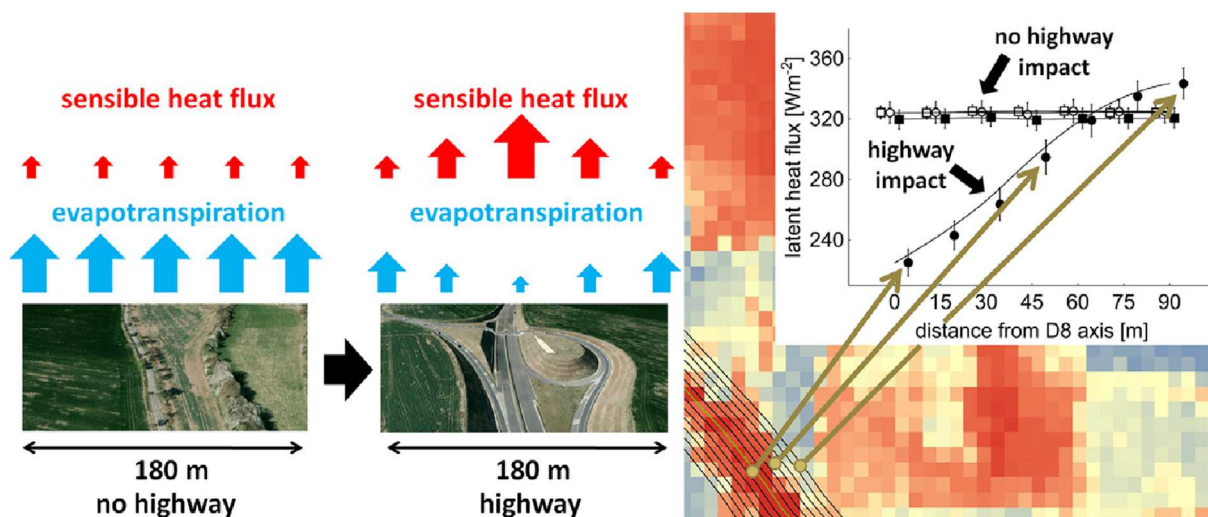
3.1.4 Maapinna (katendi) energiabilansi monitoorimine

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). Ennekoike 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 lähisinfraunalainelas ning

120 m termoinfrapuna laineala 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 3.4, joonis 3.5). 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 m^3 / kiirtee kilomeetri kohta. Väheneva jahutusefekti tõttu (keskmiselt 29.7 MWh võrra) võib sõidutee pinna temperatuur kasvada kuni $7 \text{ }^\circ\text{C}$ (suvapäeval). Soovitusena tuuakse välja, et selle efekti minimeerimiseks oleks oluline tagada sõidutee vahetus ümbruse haljastuse olemasolu (põõsad, puud).



Joonis 3.4. Iga parameetri jaoks arvatud keskmisi piksliväärtuseid esitavad jooned. Ruumiline lahutus on peamiseks täpsust piiravaks asjaoluks. (allikas: Nedbal and Brom, 2018)



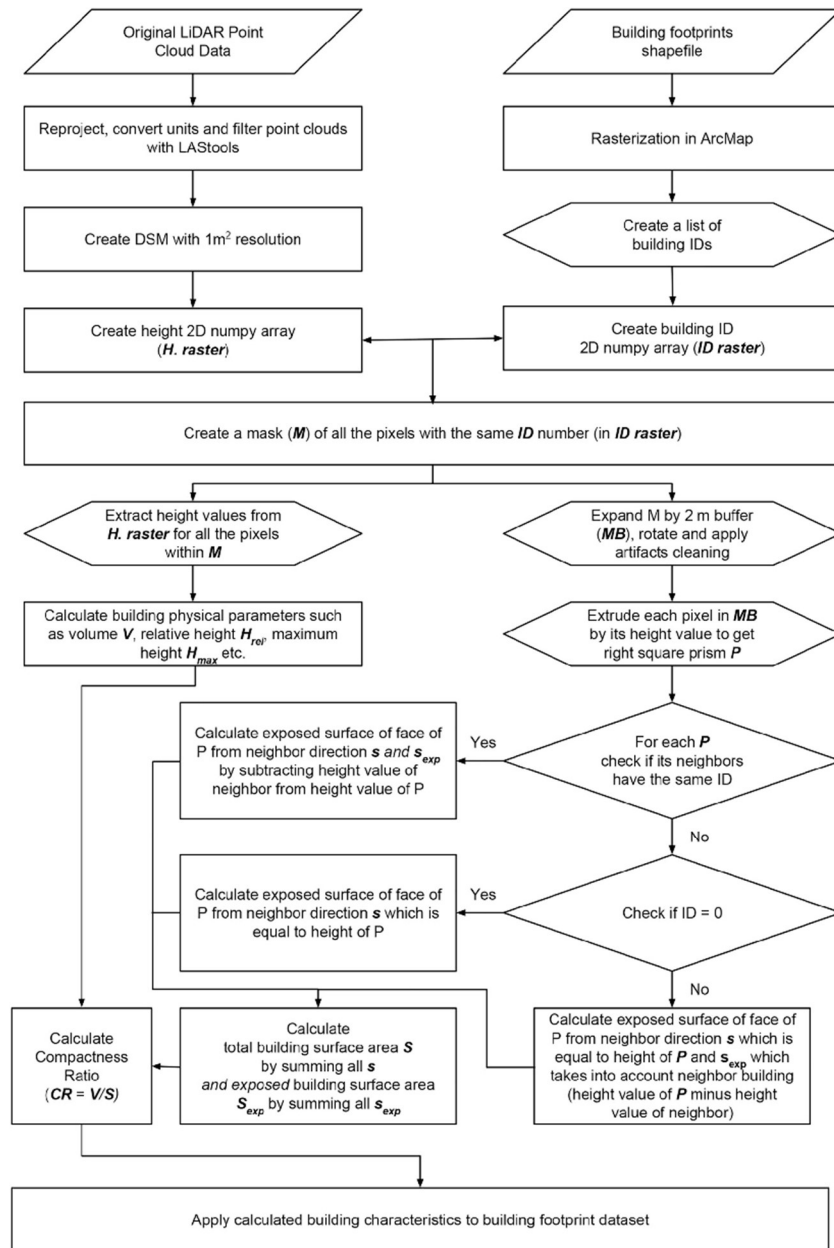
Joonis 3.5. Kiirtee mõju energiabilansile (allikas: Nedbal and Brom, 2018)

3.2 Aeroskaneerimine

3.2.1 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

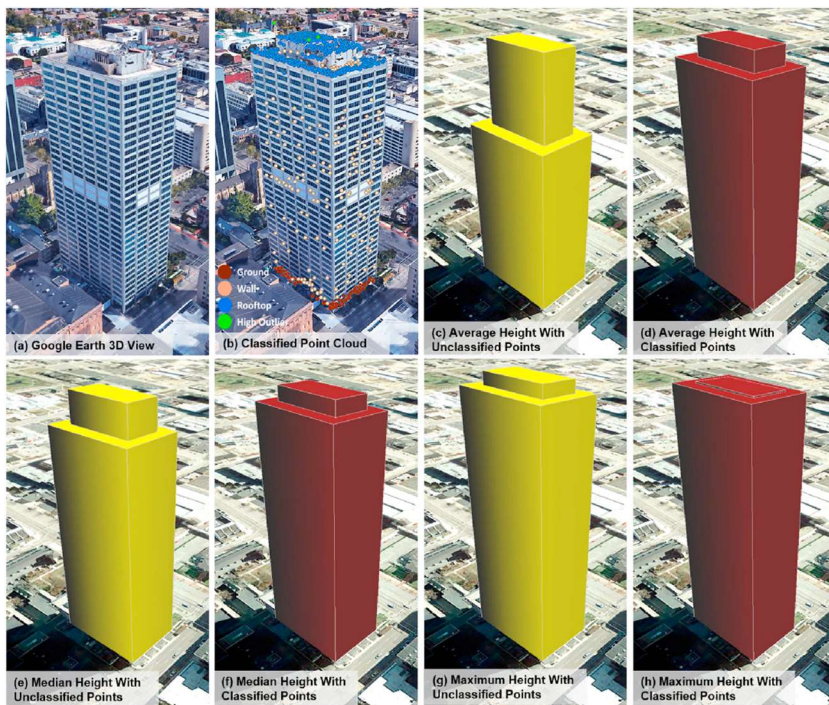
kompaktsuse suhet ning nende poolt kaetavat maa-ala. Kasutatakse vokselitel (punktid) baseeruvat meetodit, et eraldada disainiga seotud parameetreid keerukamatest linnaruumidest (valitud näidislinn - New York, hoonete arv – 1 miljon, maa-ala – 800 km²) (joonis 3.6). Disainiga seotud parameetriteks võivad olla hoone maht, kõrgus, ruumala, kaetav maa-ala ja kompaktsuse suhe.



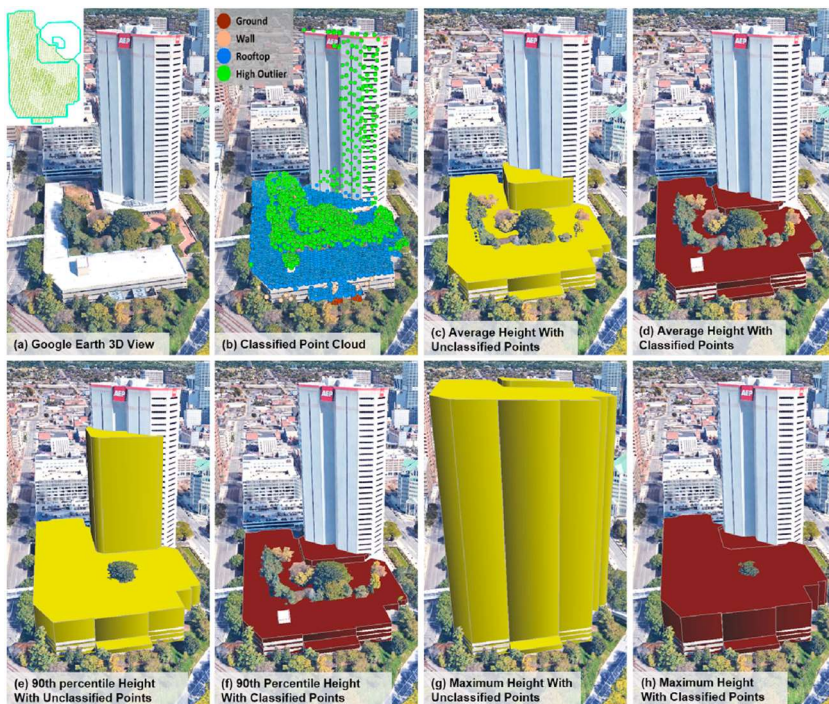
Joonis 3.6. Andmetöötuse protsess (allikas: Bonczak and Kontokosta, 2019)

3.2.2 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 Guldmann, 2019). Klassifitseerimine omab eeliseid just kõrghoonete juures (97.3 %), tüüpilisemate kortermajade korral jääb täpsus 93 % juurde (joonis 3.7, joonis 3.8).



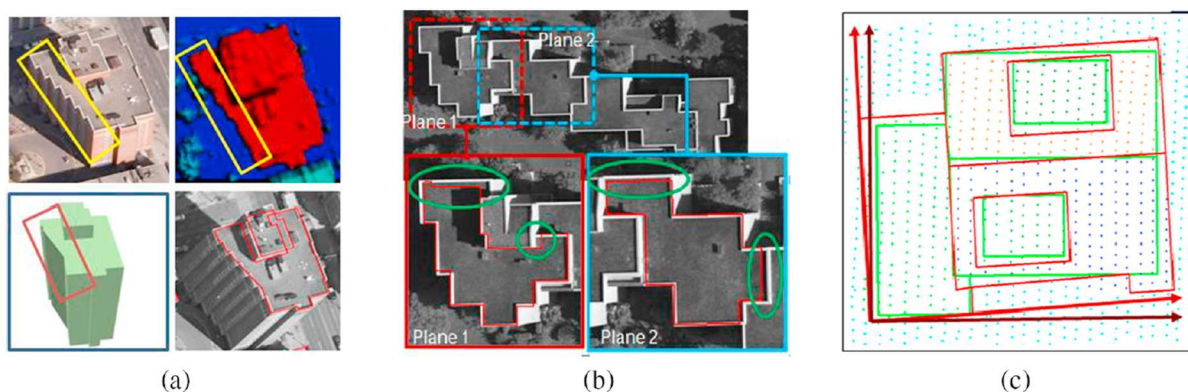
Joonis 3.7. Visualiseering: kõrghooned (allikas: Park and Guldmann, 2019)



Joonis 3.8. Visualiseering: keskmise kõrgusega hooned (parkimismaja) ühes kõrghooneetega, et võrrelda punktipilve klassifitseerimise eeliseid (allikas: Park and Guldmann, 2019)

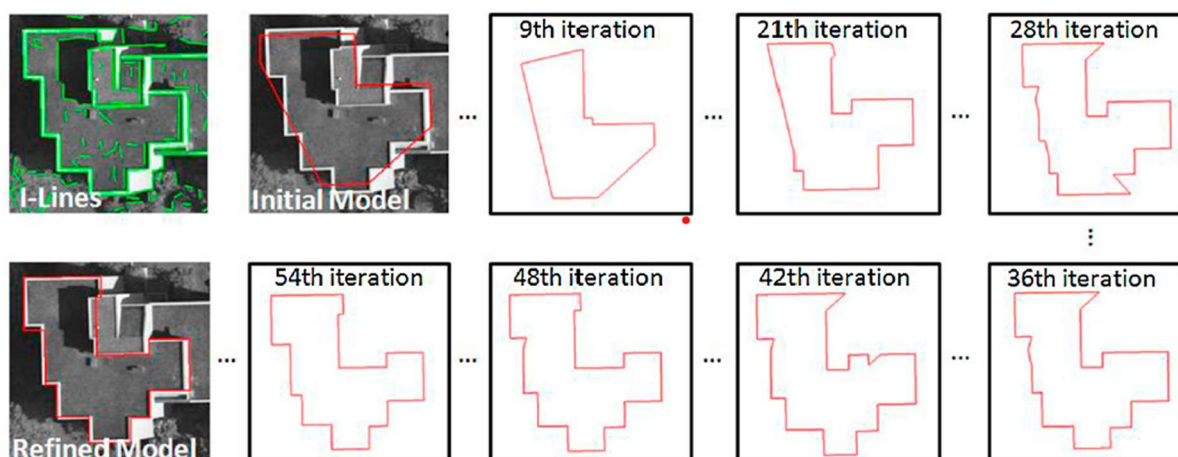
Linnaruum on pidevas muutumises. On ilmne, et 3D linnaruumi digitaalne kaksik peegeldab hetke, mil see loodi. Samas, dünaamiliste analüüside läbiviimiseks tuleb mudelit pidevalt uuendada. Kuna aeroskaneerimist (LiDAR) kasutatakse paljudes omavalitsustes saab kogutud infot kasutada progressiivseks 3D 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 3.9.



Joonis 3.9. 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 katusemodeliga. Mistahes erisusi analüüsitakse läbi globaalse optimeerimise meetodi, et leida parim täpsustus (joonis 3.10).



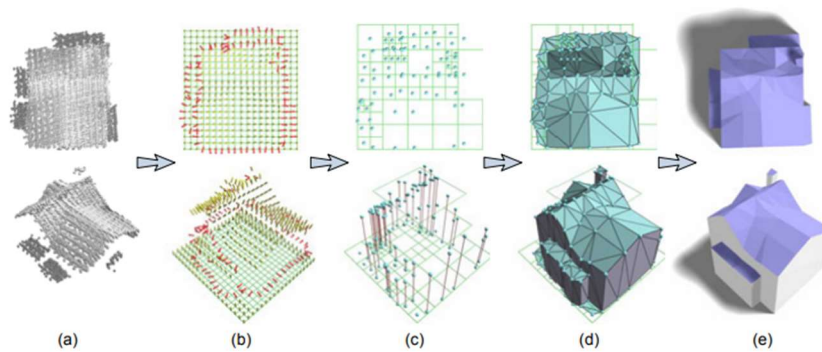
Joonis 3.10. Paranduste tulemus (üle-lihtsustatud juht) ning mudeli erinevad esitused läbi mitmete variatsioonide (allikas: Jung and Sohn, 2019)

Korrekse katuse tüübi määramiseks (näiteks lamekatuse, varjualune, viilkatus, 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/m² (madal resolutsioon). Huvitaval kombel, kui lahutust tõsteti (6-8 punkti/ m²), ei paranenud sellest katuse tüübi klassifitseerimise edukuse määr. See tagab välja pakutud meetodika kasutuse suurematel aladel. Tänu sellele meetodile on võimalik täpsemalt planeerida regionaalseid päikeseenergia süsteeme.

3.2.3 Ehitiste fassaadide päikesekiirgus

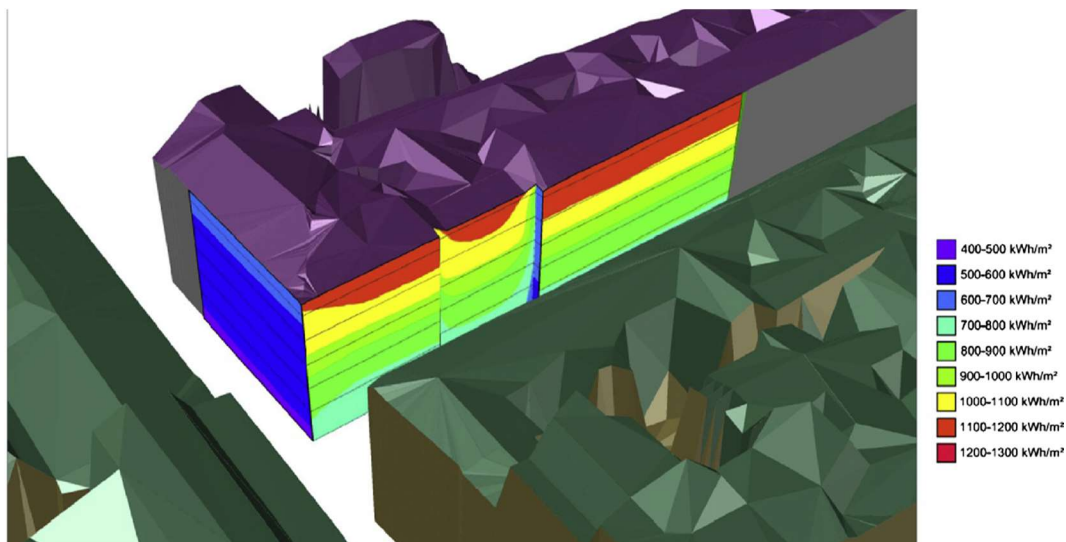
Ehitise fassaade saab kasutada päikese kiirguse kogumiseks, et seeläbi toota kohapealset energiat ja katta majapidamise energiavajadusest isegi kuni 100%. Aeroskaneerimisel saadud LiDAR andmestikku

(0.5 punkti/m²) võib kaasata päikesekiirguse (kWh/m²) potentsiaali hindamiseks lähtuvalt kuupõhistest kiirgusandmetest (Martínez-Rubio *et al.*, 2016) (joonis 3.11).



Joonis 3.11. 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 3.12).



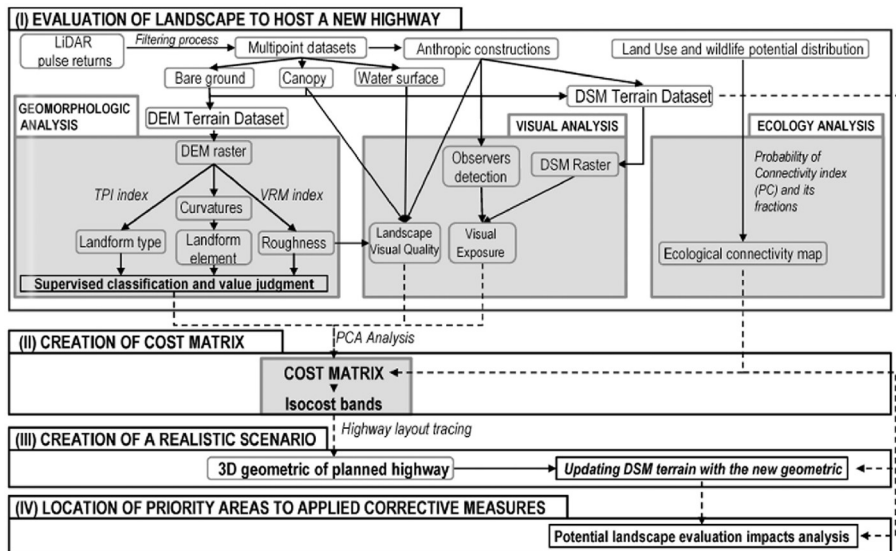
Joonis 3.12. Aastane summaarne päikesekiirgus ehitise fassaadil (adapted from Martínez-Rubio *et al.*, 2016)

Kiirguskaartide olemasolu aitab läbi viia keskkonnasäästlike ning CO₂-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.

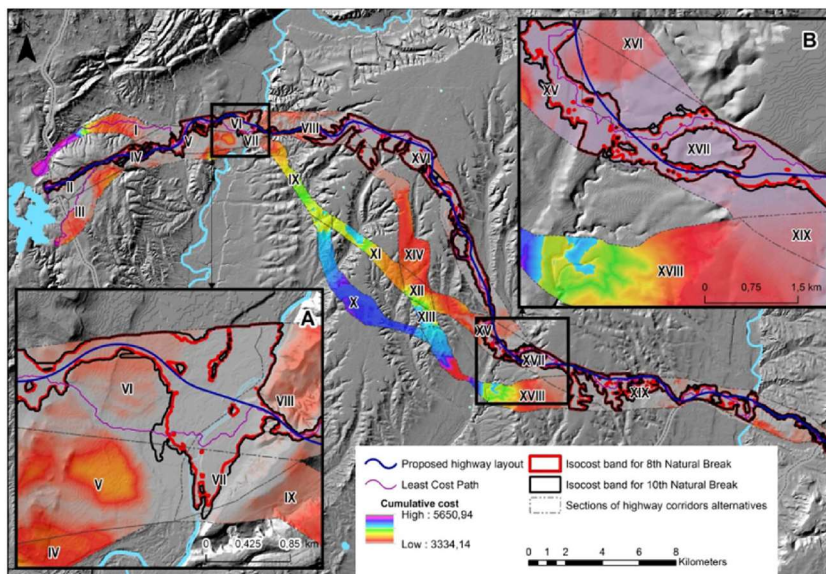
3.2.4 Sõidutee koridori valikuga seotud analüüsid

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 3.13, joonis 3.14). 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 mõjujalad teemakaartidena.



Joonis 3.13. 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 3.14. Samakulujoonte kaart erinevatele sõidutee koridori alternatiividele ühes minimaalse nõutava laiusuga (30 m) (allikas: Loro, *et al.*, 2017)

3.3 Drooniseire

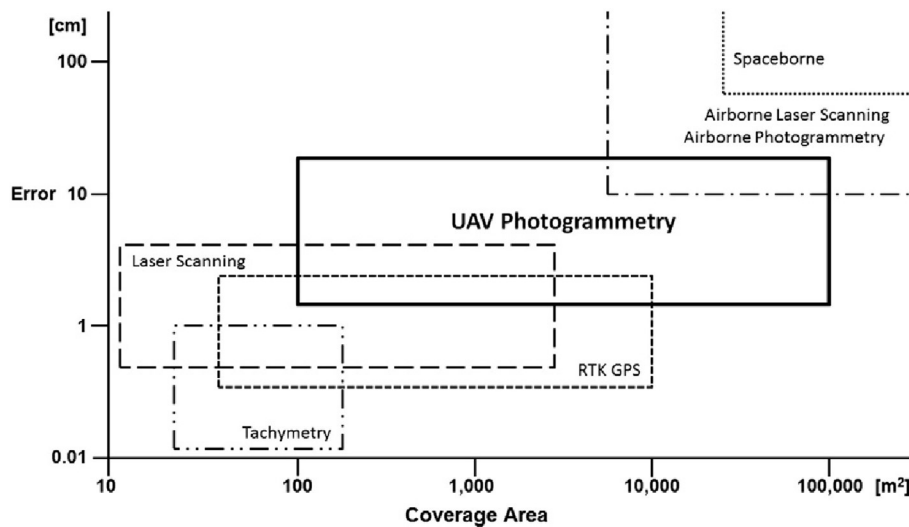
Drooniseire on ennekõike alguse saanud militaarvaldkonnast aga seda on kasutatud ka planetaarsete uuringute ja päästeoperatsioonide läbiviimisel. McKinsey & Company (2017) poolt teostatud uuring tõi välja, et aastal 2016 toimus esimene suur hüpe kommertskasutuseks mõeldud droonide rakendustes. Täpsemalt 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 3.2.

Tabel 3.2. Soovituslik droonidel baseeruva ehitusinfo modelleerimise tööprotsess (allikas: Dupont *et al.*, 2017)

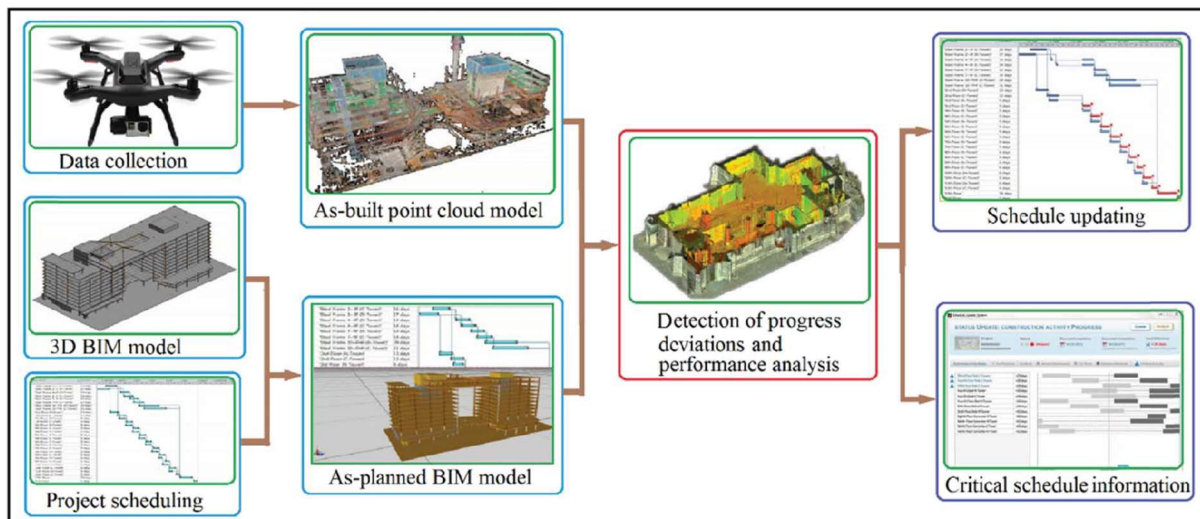
Tegvus	Ehitusplatsi mõõdistus	Tegevuse monitooring	Varustuse ja materjalide jälgimine	Ehitustegevus	Ehitise korrashoid
Kasutaja vajadus	<ul style="list-style-type: none"> Täpse ning sobiliku projektlahendi loomine, et vähendada lisakulu Projekti kommunikatsioon eelpakkumise ajal 	<ul style="list-style-type: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

Potentsiaalne dronide rakenduste ulatus mõõdistustöödel on kokku võetud joonisel 3.15 ning tööprotsess, mis ühendab ehitusinfo mudeli ning punktipilve, joonisel 3.16.



Joonis 3.15. Potentsiaalne dronide rakenduste ulatus mõõdistustöödel võrrelduna teiste kaugseire tehnoloogiatega (allikas: Siebert ja Teizer, 2014)

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



Joonis 3.16. Monitoorimise protsess läbi punktipilve ning BIM mudeli võrdluse (allikas: Li and Liu, 2018)

Droni lennutamine eeldab esmalt missiooni simuleerimist. Dronisimulaatoreid (missiooni planeerimiseks) on üksjagu ja nende kohta leiab võrdluse artiklist Mairaj *et al.* (2019). Dronide 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 reaalajas ülekandeid, kus siis operaator analüüsib nähtut või kaasata tehisintellekti, milles andmete analüüs toimub lähtuvalt teatud kriteeriumitele ja seeläbi automatiseerida teavitust ohtlikest olukordadest. Pildistamine ja

otseülekannte 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.

3.3.1 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 digitaalsete 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.

3.3.2 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). Näidisenäiteks teostati staadioni ülesmõõdistus, milles arvestati

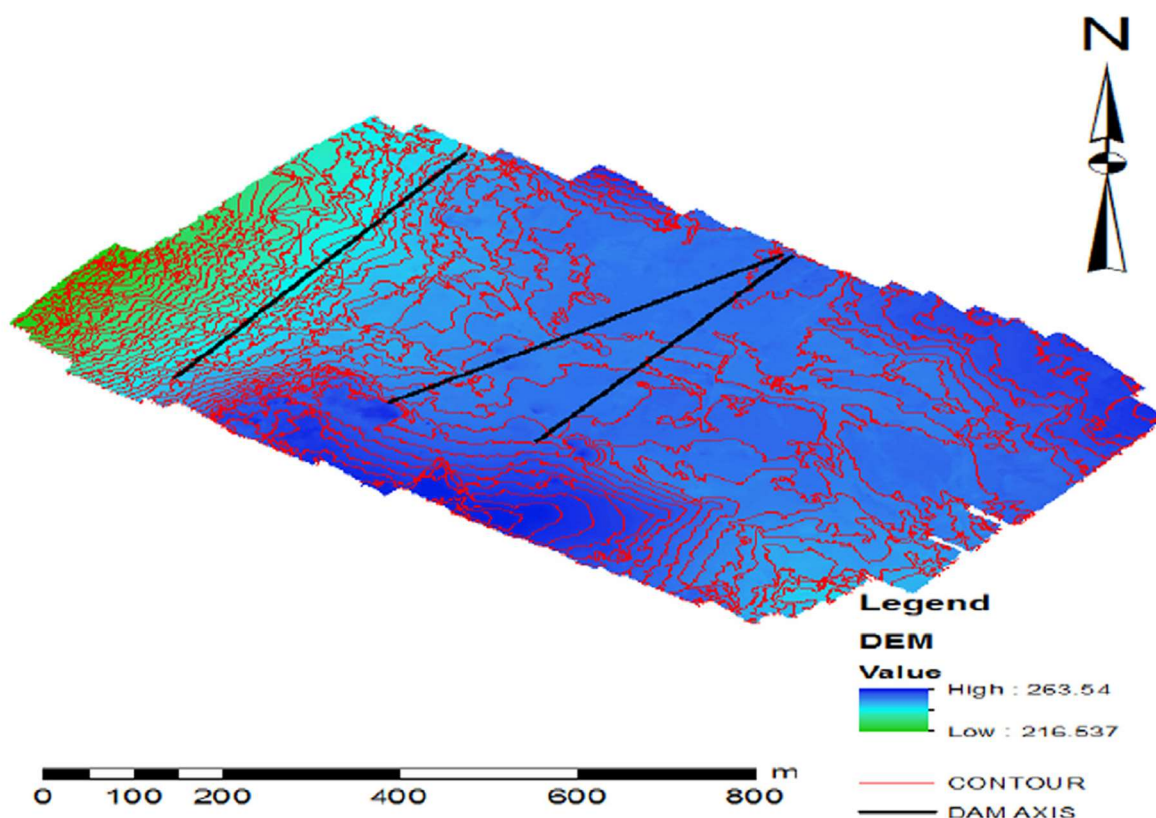
mitmete erinevate parameetritega (pikkus: 130 m; laius: 116 m, perimeeter: 473 m, kõrgus: 30 m), mis on kokku võetud tabelis 3.3.

Tabel 3.3. 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"> • Keskmise viga < 20 cm • Standardhälve < 11 cm
Mitme drooni kasutamine	515	15 min (3 drooni)	~ 1 h	

3.3.3 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 3.17).

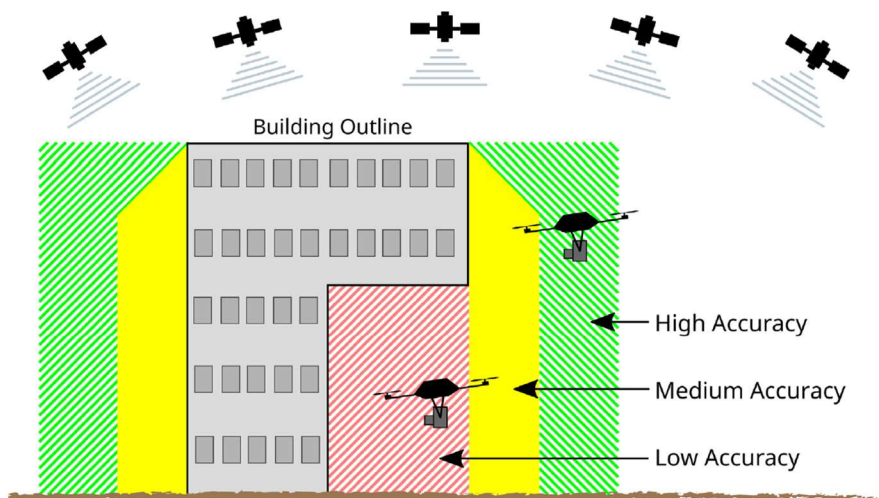


Joonis 3.17. Võimalikud tammide asukohad (joontena) lähtuvalt maapinna kontuurjoontest digitaalse kõrgusmudeli järgi (allikas: Ajayi et al., 2018)

3.3.4 Automatiseeritud kontrolltegevused

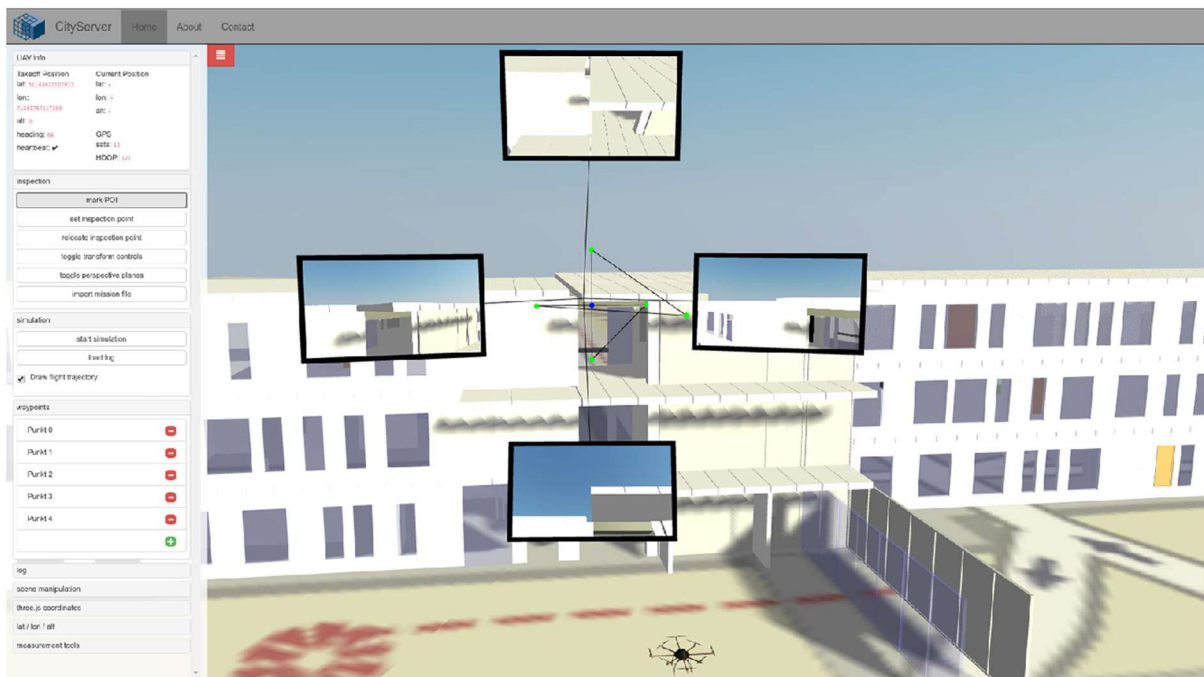
Droone on võimalik rakendada automatiseeritud kontrolliks, milles ehitusinfo mudelid on kaasatud optimaalsete 3D liikumistrajektooride koostamiseks (Freimuth and König, 2018). Eelnev missiooni

planeerimine, milles kasutatakse teostatud ehitusprojekti digitaalset kaksikut ehk 3D mudelit, aitab võimalikke kokkupõrke-olukordi minimeerida. Oluliseks saab GPS signaali kvaliteet olukorras, kus dron satub mõõdistuse tegemisel kehva levi piirkonda (joonis 3.18).



Joonis 3.18. Eeldatav positsioneerimise täpsus ehitiste läheduses (allikas: Freimuth ja König, 2018)

Mudelipõhise drooni missioonide planeerimist saab rakendada ka olukorras, kus on oluline tagada õiged monitooringu vaatenurgad (joonis 3.19). See eeldab ehitusinfo mudel teisendamist õigetes geodeetilistesse koordinaatidesse.

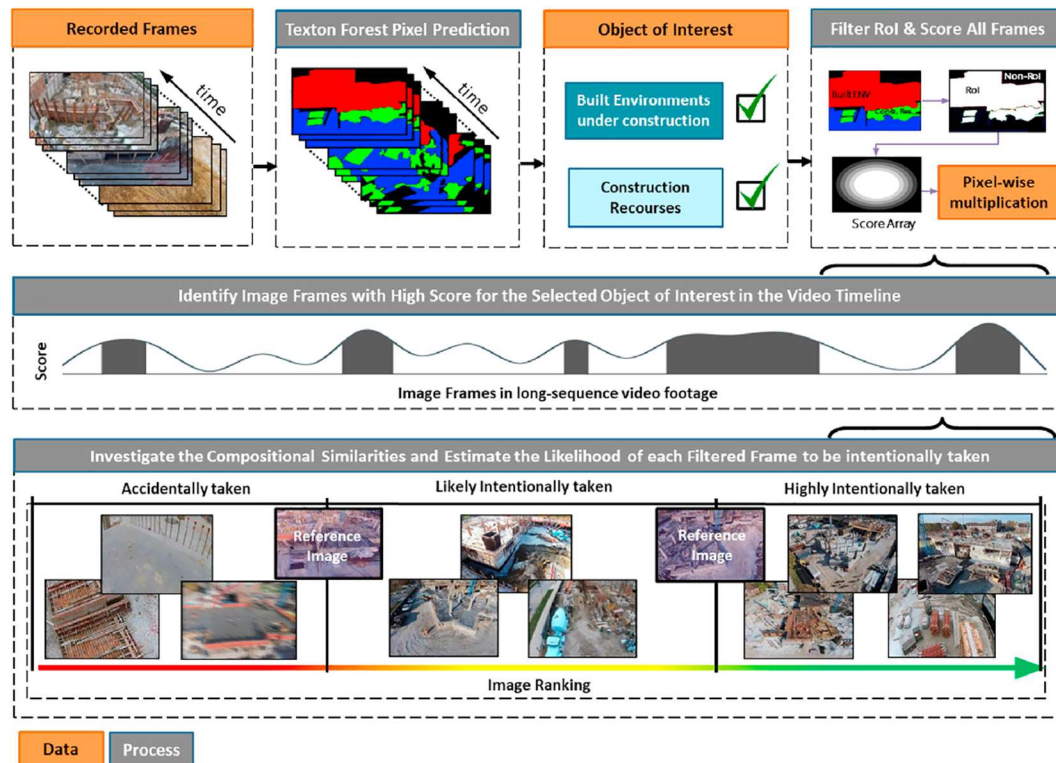


Joonis 3.19. Eelvaadete pildid, mida dron peab monitooringu käigus üles võtma (allikas: Freimuth and König, 2018)

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).

3.3.5 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 treenida 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 3.20).



Joonis 3.20. Pildi filtreerimisprotsessi ülevaade, kus lähtematerjaliks on ehitusobjektilt kogutud pildimaterjal (allikas: Ham ja Kamari, 2019)

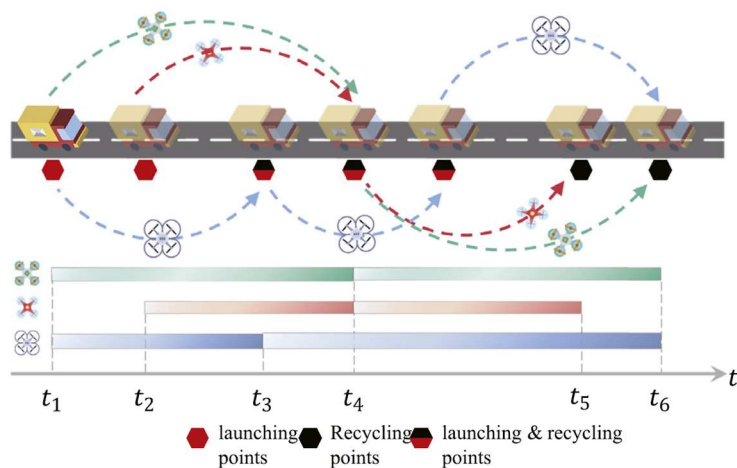
Antud meetodi peamiseks puuduseks on aga asjaolu, et ehituses saame rääkida väga paljudest erinevatest objektidest ja nende võimalikust tuvastamisest, mistõttu oluliseks saab kui suures mahus on seda võimalik automatiseerida.

3.3.6 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.

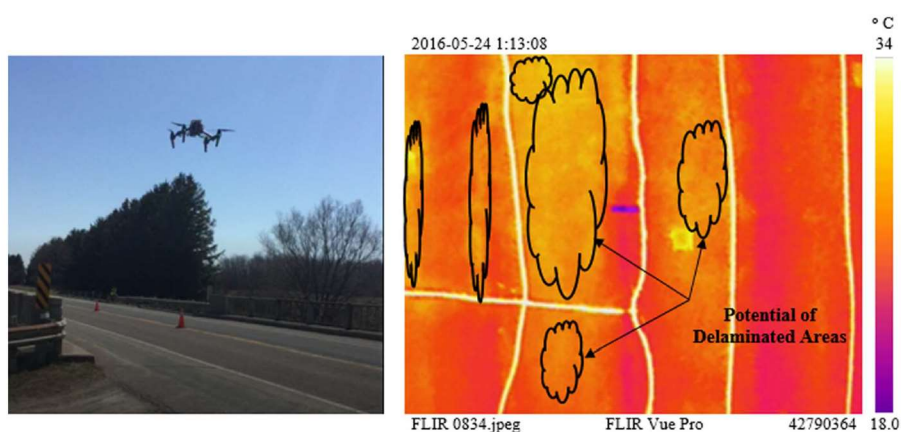
Droone saab kasutada sildade, elektriliinide, torustike ning suurte hoonete vaatlusel. Seeläbi välditakse riskantseid juhtumeid, kus ohtu võib sattuda inimelu või kaasnevad muud kulukad tagajärjed. Drooniseire algatus ei nõua suurt ettevalmistust, mistõttu saab seda pidada efektiivseks meetodiks võimaliku 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 3.21).



Joonis 3.21. Näide droonide ajalisest planeerimisest (allikas: Hu *et al.*, 2019)

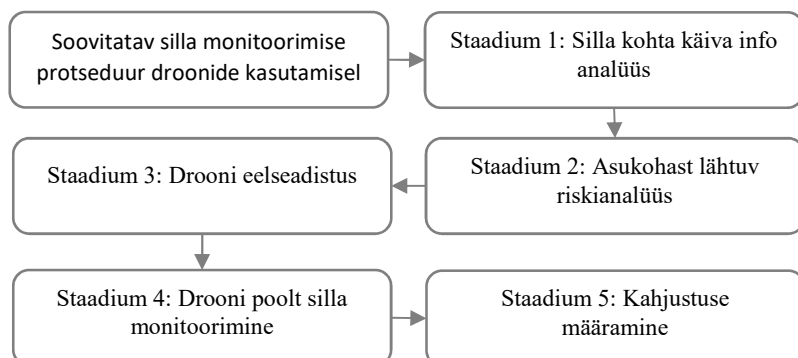
Droonide juures saab kasutada väga erinevaid kaamera tüüpe. Näiteks soojuskaamerat on kasutatud aluspinna vajumiste mõju uurimisel silla plaadile (Omar and Nehdi, 2017). Eeliseks on mittepurustav tehnoloogia, mis ei häiri liiklust ja ei ole füüsilist kokkupuudet mõõdetava objektiga. Seeläbi saab teha ülikiireid silla seisundi hinnanguid elukaareüleselt, mis võiks omakorda aidata tagada silla õigeaegse hoolduse ning selleks vajalikud finantsid tulevikus (joonis 3.22).



Joonis 3.22. Väljavõtte drooniga tehtud silla monitooringust (vasakul), kus soojuskaamera andmete analüüsil saab eristada võimalikke aluspinna vajumise mõjusid silla plaadile (parem) (allikas: Omar and Nehdi, 2017)

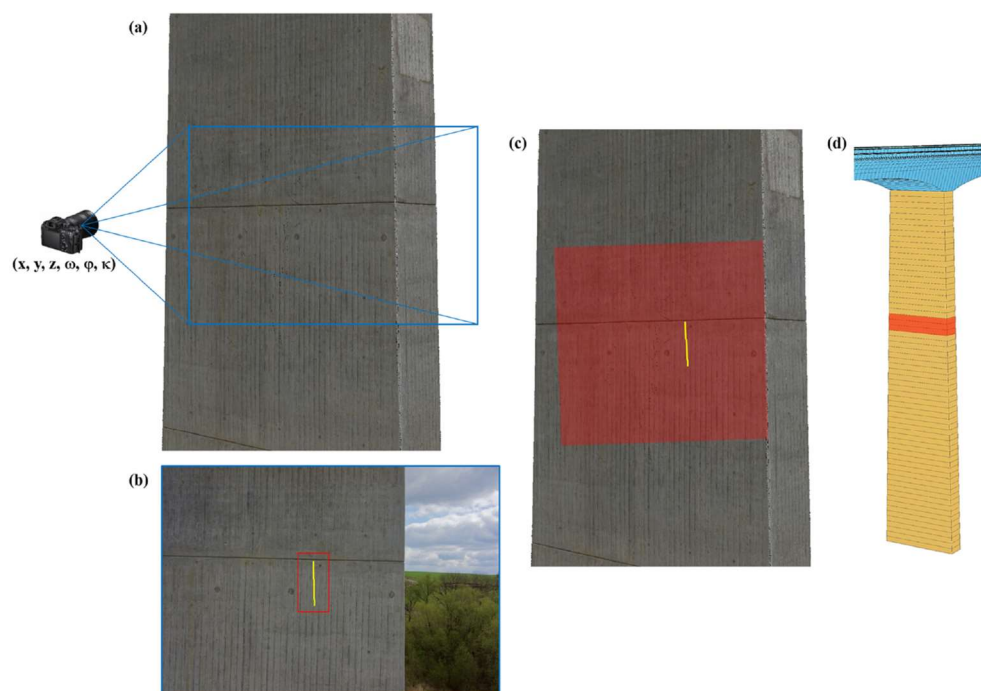
Multispektraalsensoreid saab ennekõike kasutada maakatte kaartide koostamisel. Ehitussektorit silmas pidades saab neid edukalt rakendada ehitusplatsi (sh kaevanduste restaureerimine) restaureerimise monitoorimisel (Padrò *et al.*, 2019).

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 meetoodika, mida võrreldi n-ö tavapärase meetoodikaga, mida transpordiamet oli seni kasutanud (joonis 3.23). Kokkuvõttes leiti, et droonide kasutamine võimaldab kulusid oluliselt vähendada.



Joonis 3.23. Viie-astmeline silla monitoorimise meetoodika drooni abil (allikas: Seo *et al.*, 2018)

Morgenthal *et al.* (2019) töid välja, et kõrg-lahutusega pildimaterjali saab kasutada koormuste mõju uurimiseks konstruktsiooni elementidele (joonis 3.24). Joonise 3.24 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.

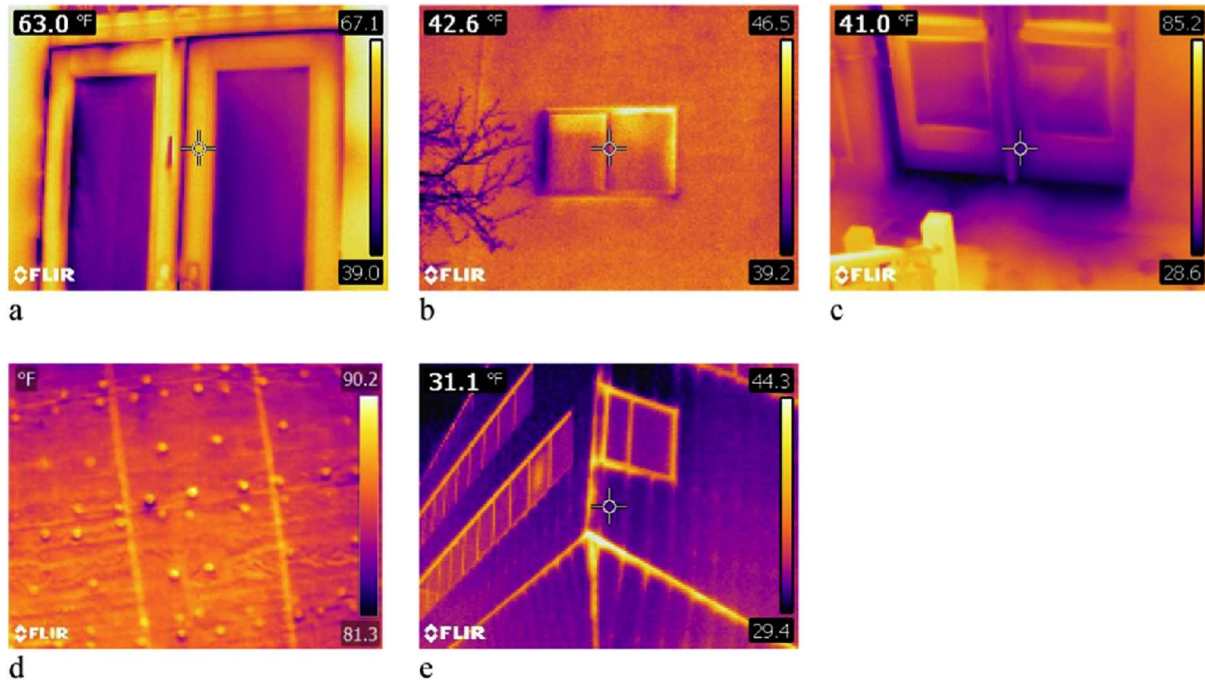


Joonis 3.24. Anomaalia arengu jälgimine (varasemalt leitud asukohtade järgi) ning pragude laiuse ning ulatuse (pikkuse) jälgimine (allikas: Morgenthal *et al.*, 2019)

3.3.7 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

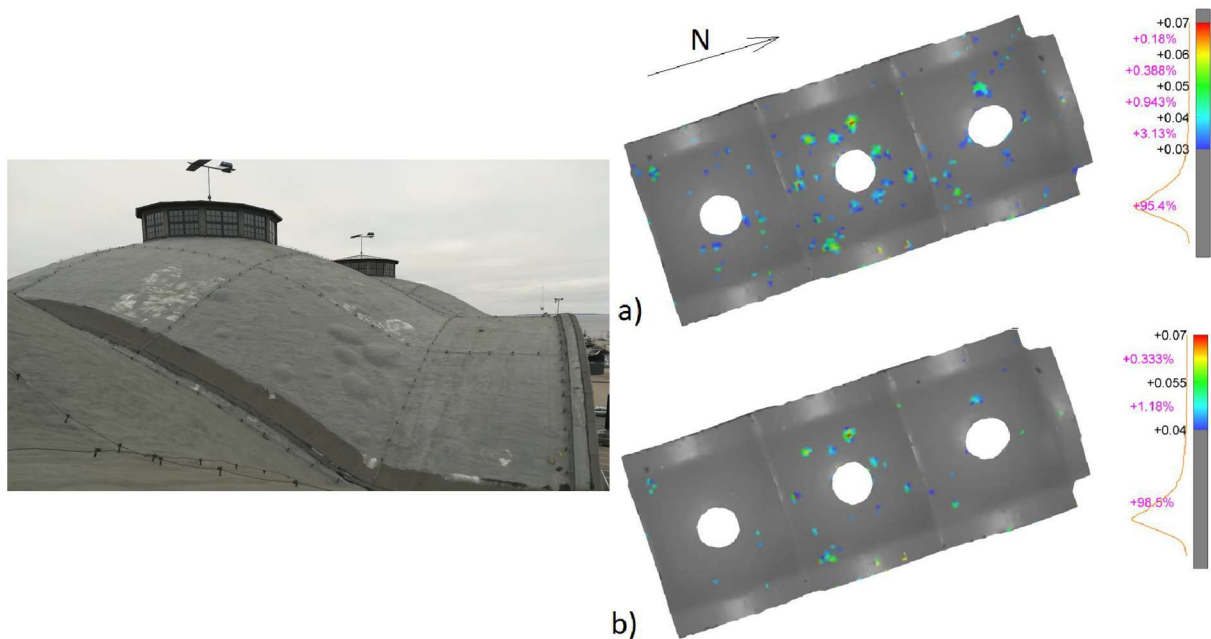
uuritud ning ka alahinnatud. Entrop ja Vasenev (2017) pakuvad välja juhised ehitiste termograafilisteks uuringuteks. Näiteks tuleks termograafilist uuringut külmasildade kindlaks tegemiseks fassaadil teostada just enne päikesetõusu, et seeläbi vältida päikesekiirgusest tulenevaid efekte. Samas, päikesepaneele puudutavad uuringud tuleks läbi viia just päikeselisemates tingimustes. Arvestada tuleb nii kaamera enda parameetritega kui ka pildistamise kauguse ja pildi tegemise nurgaga. Joonis 3.25 esitab hoone karbil jälgitavaid soojuslekked läbi termopiltide.



Joonis 3.25. 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 naelutamisest, mis omab selget mõju katusele ning (e) soojusleke tingitud soojustusega seotud probleemidest (allikas: Rakha and Gorodetsky, 2018)

3.3.8 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 3.26). 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.

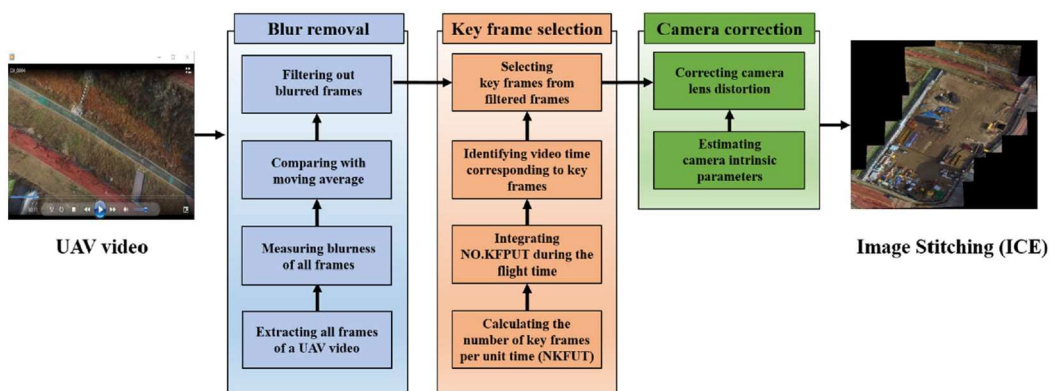


Joonis 3.26 Keeruka geometriaga katus (vasakul) ning deformatsiooni määramine kõrvalekallete analüüsiga (paremal)

3.3.9 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).

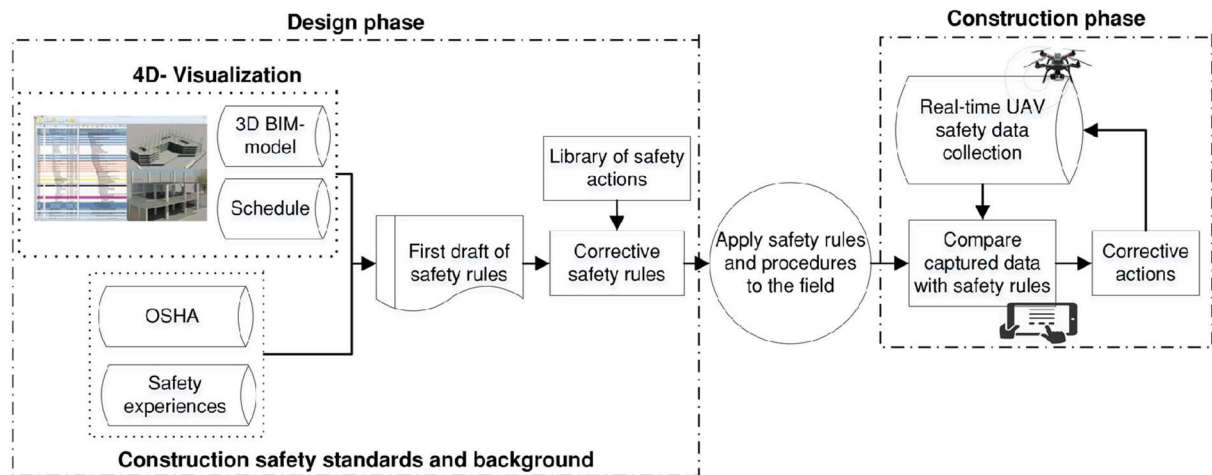
Ehitusplatsi ajaline monitoorimine võimaldab analüüsida ohutusega seotud küsimusi, tootlikkust ning ehitise seisundit. Kuna panoraami loomine sõltub kogutud piltidest ning nende kvaliteedist, saab alternatiivina kasutada droonidelt üles võetud videomaterjali. Seeläbi saab rohkem kaadreid ehitusplatsi olukorra kohta ja mistahes moonutusi on lihtsam eemaldada (joonis 3.27).



Joonis 3.27. Droonivideo baasil panoraami loomise protsess (allikas: Bang *et al.*, 2017)

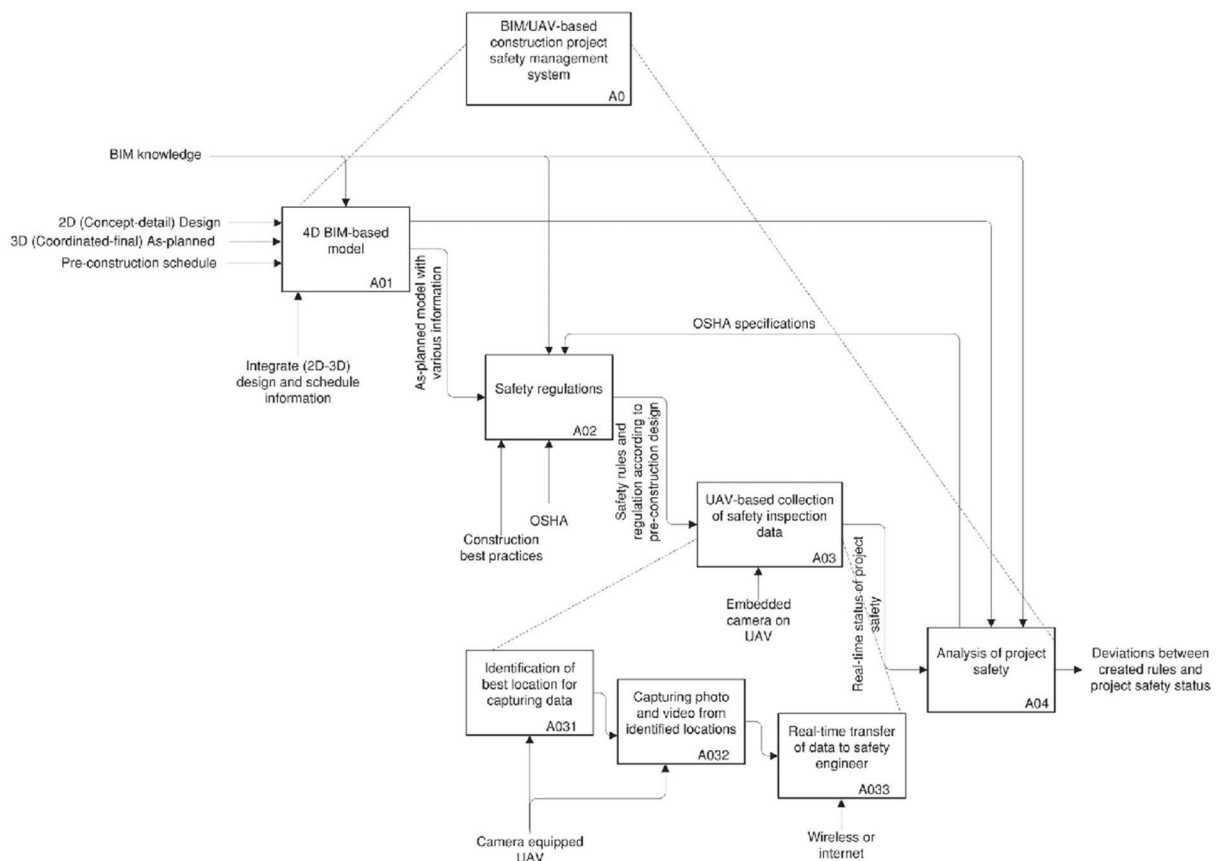
3.3.10 Ehituse ohutuse monitoorimine

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 reaalsajas, andes seejärel kohest (või ligilähedaselt reaalsajale) tagasisidet ehitusplatsil olevate võimalike ohuolukordade kohta. Ohutuse juhtimise mudel läbi 4D BIM mudelite nii projekteerimise kui ehitamise staadiumis on esitatud joonisel 3.28. Selles on 4D (3D mudel + aeg) BIM mudel viidud kokku ohutusstandarditega, et seeläbi määratleda võimalikud ohud ning elimineerida need läbi ohutuseeskirjade kontrollsüsteemi.

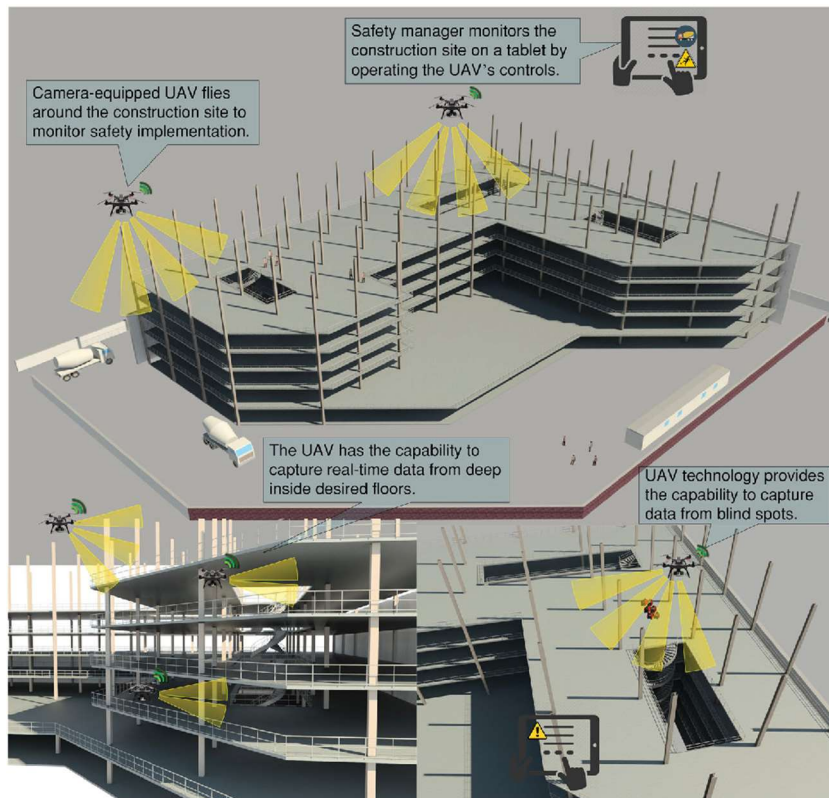


Joonis 3.28. 4D BIM kasutamine ohutuse juhtimiseks nii projekteerimise kui ehitamise staadiumis (allikas: Alizadehsalehi *et al.*, 2018). OSHA - Occupational Safety and Health Administration.

Joonis 3.29 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 3.30). 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 3.29. 4D BIM/UAV ohutuse juhtimine ehitusplatsil (allikas: Alizadehsalehi et al., 2018)



Joonis 3.30. 3D simulatsioon monitooringust ehitusstaadiumis, mida varasemalt on määratud ohtlikuks (allikas: Alizadehsalehi et al., 2018)

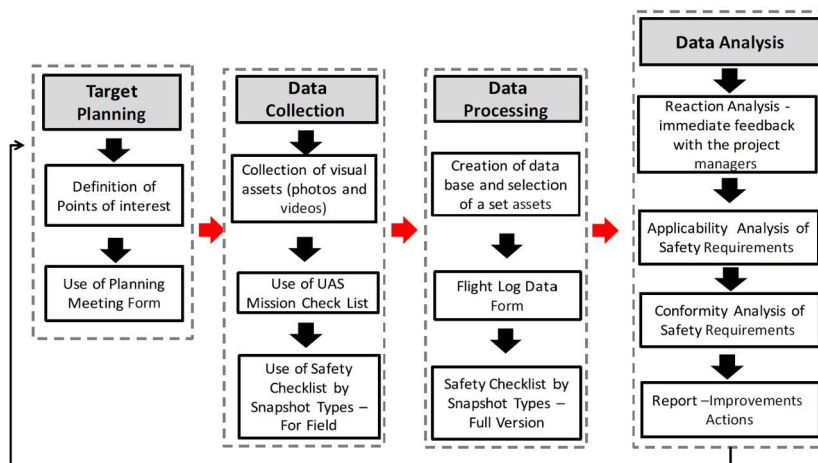
Ohutusinspektorid saavad kasutada droone, et monitoorida ehitustegevusi reaalajas või kasutada hilisemat andmeanalüüsi, milles on muuhulgas kaasatud tehisintellekti võimekus. Soltanmohammadlou *et al.* (2019) annab põhjaliku ülevaate ehituse ohutusega seotud küsimustest. Reaalajas monitoorimise süsteemi 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, mis kõrvutatakse erinevate ohutusega seotud nõuetega.

Tabel 3.4. Ohutusega seotud nõuete nimekiri lähtuvalt ülesvõtte tüübist (allikas: Santos de Melo *et al.*, 2017)

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

Kokkuvõttena toodi välja, et droone saab väga edukalt kasutada regulaarseteks ohutusealasteks kontrollideks (joonis 3.31), kuid tuleb arvestada teatud takistustega. Näiteks füüsilised takistused (seotud ehitise keerukusega), ilmastikutingimused, drooni operatori koolitamine, eelnev ohutusalane kompetents, oskus visuaalseid andmeid analüüsida, vastumeelsus (tehnofoobia) mistahes uue tehnoloogia osas ning droonide integreerimine projekti tervise- ja ohutusjuhtimissüsteemiga.



Joonis 3.31. 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 tötsoonidesse ning (c) kaitsmata servade ja avade monitoorimine.

3.4 Mobiilsed LiDAR-süsteemid

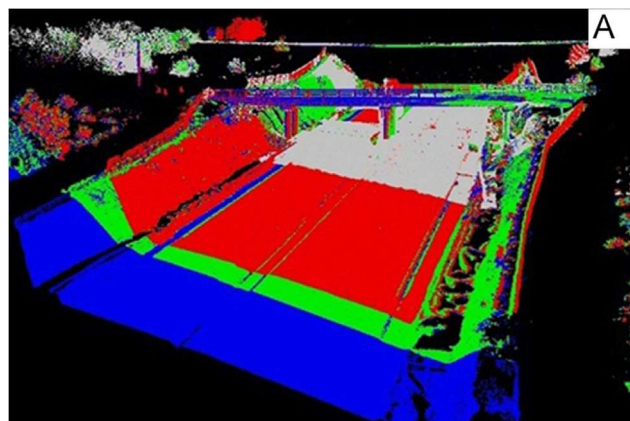
Mobiilse LiDAR-süsteemi kasutamine võimaldab koguda väga kiirelt täpset ning geoseotud, tihedat punktandmestikku 3D punktipilvena (Guan, 2013). Kohalikud omavalitsused ei pruugi sellistest võimalustest teadlikud olla, mis võimaldaks kogutud 3D punktipilvi üle kanda BIM mudeliteks ja teha seeläbi erinevaid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

3.4.1 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).

3.4.2 Infrastruktuuri kontroll

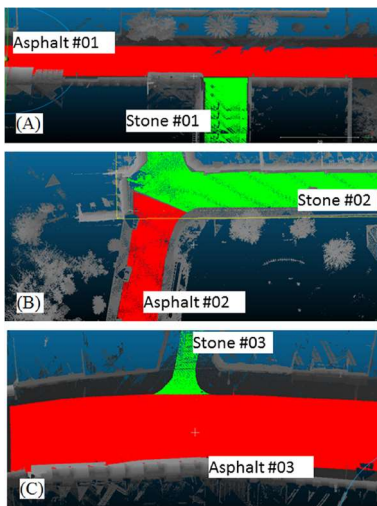
Teekatendi hooldus on teedeametite peamine murekoht. Sõidutee õigeaegne remont omab väga suurt mõju sõidutee ohutusele ning remondikuludele. Sõidutee olukorra hindamiseks on välja töötatud mobiilset LiDAR-it kasutatavad mõõdistuse meetodid, mida saab kasutada läbi erinevate riistvaraliste lahenduste. 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 3.32).



Joonis 3.32. Lynx Mobile LiDAR (vasakul) ning selle kasutamisel saadud katendikihi mudel läbi punktipilve (paremal) (allikas: Puente et al., 2013)

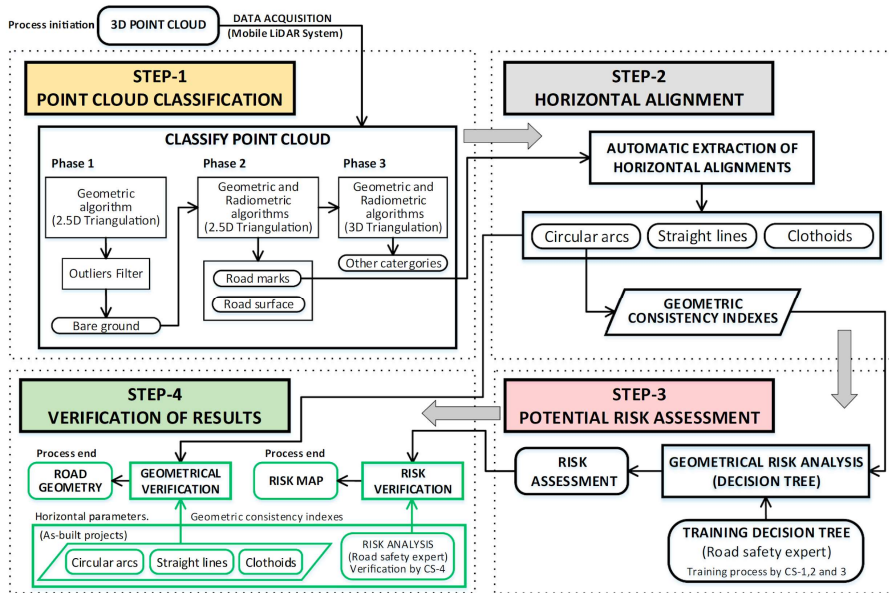
Sõidutee rekonstrueerimise projekti juures on tähtis esmalt olemasolev olukord kaardistada ja teha vajalikud mõõtmised. Siia alla kuulub nii sõidutee pind kui ka selle telg- ning servajooned. Husain ja Vaishya (2018) leidsid, et mobiilse LiDARi kasutamise terviklikkus sõidutee pinna määramisel ulatub 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 vaadelnud 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 3.33). Eraldi toodi välja, et meetodit saaks laiendada kaasates LiDARi RGB ning intensiivsuse andmed. Seeläbi oleks võimalik tuvastada ka erinevaid sõidutee katendeid (objekte).



Joonis 3.33. 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 3.34.



Joonis 3.34. Üldine metoodika sõidutee ohutuse automaatseks hindamiseks läbi sõidutee telgjoone (allikas: Martin-Jiménez et al., 2018)

Lähtuvalt analüüsist (vt joonist 3.34) saab koostada sõidutee erinevatele lõikudele nende ohutuse kaardi (joonis 3.35).



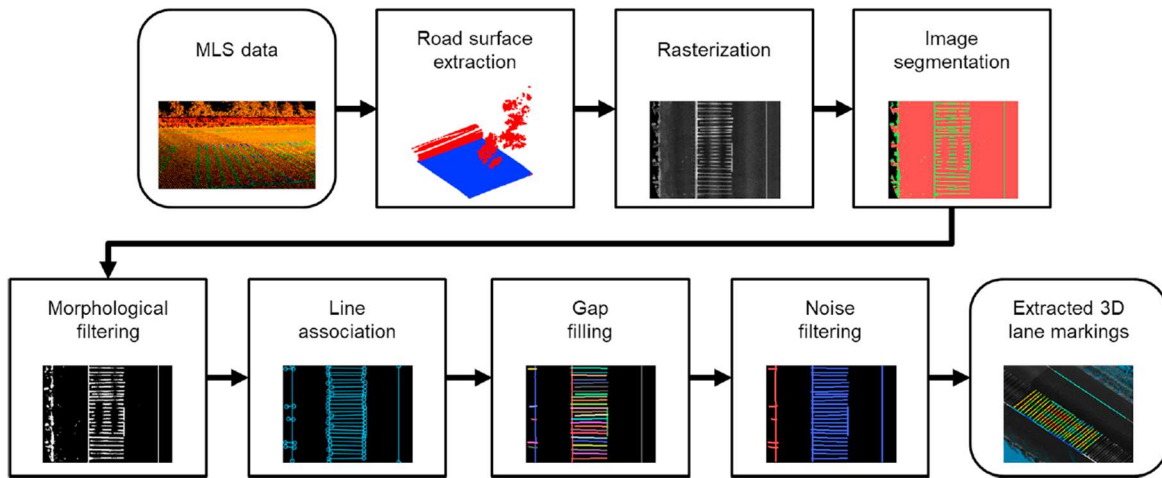
Joonis 3.35. Ohutuse kaardistamine läbi sõidutee telgjoone jagamise üksikuteks lõikudeks. Punane joon: kõrge riskimäär. Oranž joon: keskmine riskimäär. Roheline joon: madal riskimäär. (allikas: Martin-Jiménez et al., 2018)

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 inertsiaalranduriga) kasutada ka kurvilisuse määramiseks ja piki- ning ristkallede mõõdistusteks (Luo and Li, 2018).

3.4.3 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 analüüsides 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 3.36). Kasutatakse spetsiaalset mõõdikut, mis kombineerib omavahel

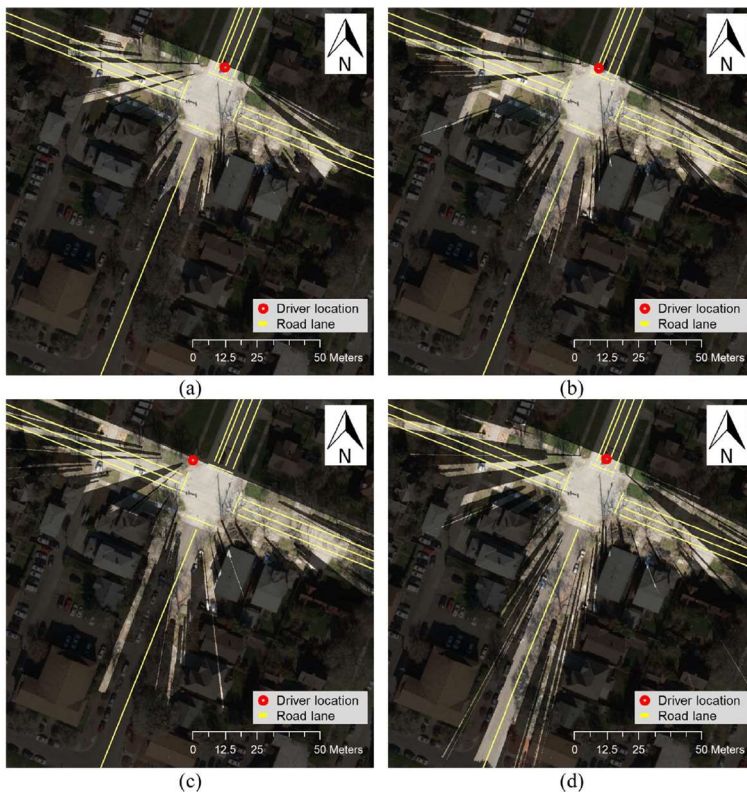
saagise (tõeselt positiivsete ning valenegatiivsete eristus) ning täpsuse (tõeselt positiivsete ja valepositiivsete suhe) ja leiti, et see jääb vahemikku 89-97 %.



Joonis 3.36. Ülevaade teekattemärgistuse eraldamise töövoost (allikas: Jung et al., 2019)

3.4.4 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 3.37).



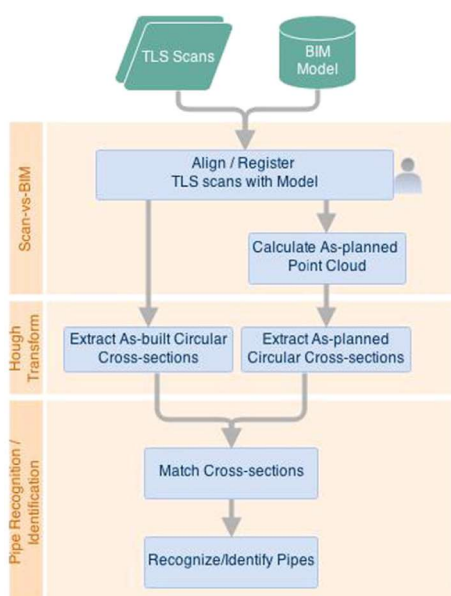
Joonis 3.37. Nähtavus läbi juhi silmade lähtuvalt erinevatest liikumisvormidest. Heledamad alad tähistavad nähtavat osa: (a) sõiduauto (vaate kõrgus: 1.067 m) (kattumine 51.7 %); (b) jalgratas (vaate kõrgus: 1.372 m) (kattumine 55.3 %); (c) jalakäija (vaate kõrgus: 1.70 m) (kattumine 52.3 %); ning (d) raskeveok (vaate kõrgus: 2.316 m) (kattumus 59.1%). (allikas: Jung et al., 2018)

3.5 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).

3.5.1 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) andmeanalüüsiks. 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 3.38).



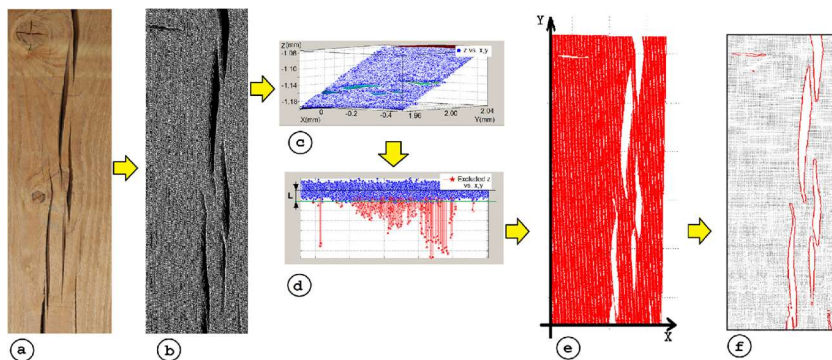
Joonis 3.38. Meetod, mis võimaldab TLS andmestikust ära tunda ümara ristlõikega (nt torud) objekte, mida on kasutatud projekt lahenduses ehk BIM mudelis (allikas: Bosché *et al.*, 2015)

3.5.2 Automaatne tellingu platvormide kontroll

Wang (2019) uuris LiDAR-andmete kasutusvõimalust tellingu tööplatvormide konfiguratsioonide kontrollis. Peamine fookus oli veenduda, kas tellingute konfiguratsioonis 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 dronitehnoloogia täpsuse suurenedes saab neid kasutada just keerukamatel puhkudel ning seeläbi kiirendada andmehõivet ja ohutusega seotud küsimuste kontrolli.

3.5.3 Pragude määramine konstruktsiooni komponentidel

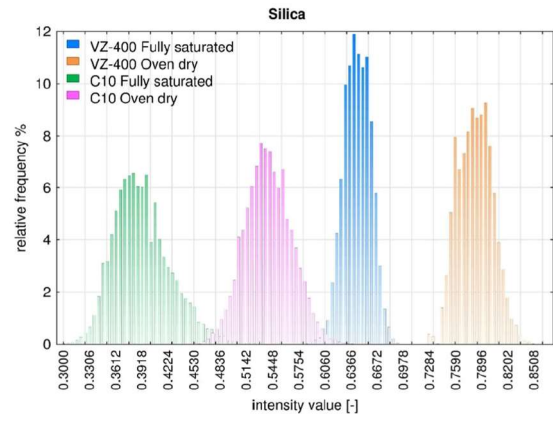
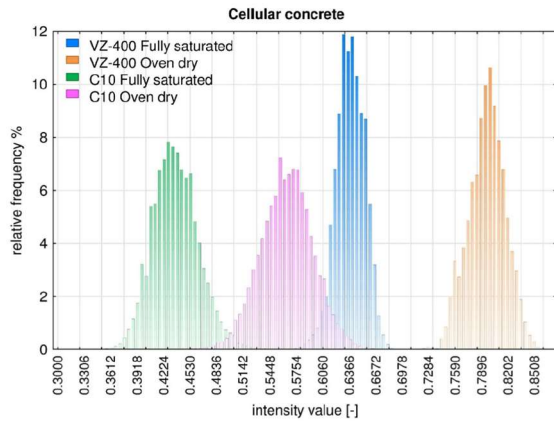
LiDAR-andmestikku on kasutatud pragude hindamiseks puitkonstruktsiooni elementidel (Cabaleiro *et al.*, 2017). Praod konstruktsiooni elementidel võivad viidata konstruktsioonilistele probleemidele ning nende mittepurustav monitoorimine võimaldaks õigeaegselt sekkuda. Uuringus toodi välja, et punktipilvest (lahutusega 1 mm) on võimalik eristada pragusid, mis on laiemad kui 3 mm (eeldades uuringuala 7.5 x 7.5 m² ning skaneerimise kaugust 7.5 m)(joonis 3.39). Tänane tehnoloogiline lõhe seisneb ennekõike selles, et prao laiust võidakse ülehinnata, mis on tingitud punktipilve lahutusest ning algoritmilistest keskendamistest.



Joonis 3.39. (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)

3.5.4 Niiskustaseme määramine ehitusmaterjalides

Lisaks objektide geomeetrilise 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, värvi tooni 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 ajalast võrdlust (joonis 3.40).



Joonis 3.40. Valitud materjalide intensiivsused, mõõdetuna kahes erinevas küllastuse olekus ja kahe erineva seadmega (Riegel VZ-400, Leica C10) (allikas: Suchocki and Katzer, 2018)

4. 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). 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.

Lisa 1. Tänapäevased rakendused (kokkuvõte)

Antud lisa annab ülevaate tänapäevastest kommertslahendustest, millele saab analüüsida pildilist ja/või punktandmestikku ning millele on lisatud mõni spetsiifiline ning eristuv analüüsivõimekus. Siinkohal ei ole vaadeldud kõikkõimalikke andmete konverteerimise võimalusi, vaid keskendutakse 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	https://3dr.com/products/site-scan-platform/	x / x	x	3D mudel, mahtude analüüs, punktipilv, termopildi analüüs
3point Ltd	Pointscene	https://pointscene.com/	x / x		3D mudel, punktipilv
Aeryon	AeryonLive	https://www.aeryon.com/aeryonlive/	x / x	x	Reaalajas ülekande teenus
Agisoft	Metashape	http://www.agisoft.com/	x / -		3D mudel, 4D modelleerimine, python skripti tugi
Airdata	Airdata	https://airdata.com/	x / x		Lennuandmete platvorm
Airobotics	Airobotics	https://www.airoboticsdrones.com/	x / x		Mahtude analüüs
Autodesk	ReCap	https://www.autodesk.com/products/recap/overview	x / x		Fotogrammeetria, punktipilve redigeerimine ja mõõdistus
Bentley	ContextCapture, Bentley Map	https://www.bentley.com/en/products/brands/contextcapture	x / x		3D mudel (fotodest, punktipilvest)
Cyberhawk	iHawk	https://www.thecyberhawk.com/ihawk-visual-asset-management-software/	x / x		Ehitusplatsi visualiseerimine
Delair	Delair Services	https://delair.aero/service/s/	x / x	x	Ehitustööde monitoorimine, mahtude analüüs, projektimudel vs teostusmudel
Dji	Terra	https://www.dji.com/ee/dji-terra	x / -	x	3D mudel, missiooni planeerimine 3D-s, reaalajas 2D kaardistamine
DroneDeploy	Enterprise, LiveMap	https://www.dronedeploy.com/enterprise.html	x / x		Projekti monitoorimine, reaalajas kokkuvõtted
DroneMapper	DroneMapper	https://dronemapper.com/	- / x		Mõõdistusega seotud analüüsid
Dronifi	Dronifi	https://www.dronifi.com/	x / x		Algoritmilised analüüsid probleemide tuvastamiseks ning tegevustega sidumiseks
Esri	Drone2Map for ArcGIS	https://www.esri.com/en-us/arcgis/products/drone2map/overview	x / x		3D mudel, piltide analüüs, topograafi analüüs
Event 38	Drone Data Management System	https://event38.com/drone-data-management-system/	x / x	x	3D mudel, mahtude analüüs
EWATT	EWATT	https://www.ewattuav.com/	n/a	x	Drooniteenus
FlyAbility	Inspector	https://www.flyability.com/	x / -	x	Hoone sisene droon, lennuplaani ajalooline vaade
HANGAR	Hangar, Mapsight, Jobsight	https://www.hangar.com/hangar-platform/	x / x		4D mudel, automaatsed monitooringud, panoraamvõtted (360 kraadi)
Harris Geospatial	ENVI	https://www.harrisgeospatial.com/Software-Technology	x / x		Anomaaliate kindlaks määramine, muutuste jälgimine, hüperspektraal- ning multispektraalandmete tugi
Hexagon	3DReshaper	https://www.3dreshaper.com/en/	x / -		3D mudel, tüüpiliste CAD objektide regeneerimine, skriptimise tugi
Identified Technologies	Identified Technologies	https://www.identifiedtech.com/solution/drone-mapping-software/	x / x		3D mudel, mahtude jälgimine/analüüs, muutuste analüüs, projektimudel vs teostusmudel

Tabel L.1. Olemasolevate rakenduste kokkuvõte (jätkub eelmiselt lehelt)

Tootja	Toote nimetus	Veebileht	Tarkvara / teenus	Riistvara	Olulisemad omadused, kasutusjuhtumid
Industrial Skyworks	BlueVu	https://industrialskyworks.com/software/	x / x		Monitoorimine
Intel	Intel® Insight Platform	https://www.intel.com/content/www/us/en/drones/solutions/intel-insight-platform.html	x / x		Drooniandmete üleviimine konkreetseteks tegevusteks, mahtude analüüs
Kespry	Kespry	https://www.kespry.com/	x / x	x	Mahtude ajalooline väljavõte, projekti planeerimine (mahud, muudatuste nõuded, jooksvad mõõdistused)
Leica Geosystems	Infinity, MultiWorx, Aibot SX / CX	https://leica-geosystems.com/en-us/products/total-stations/software	x / x	x	Mahtude analüüs, monitoorimine, punktipilve analüüs (teostusandmete hõive – sõidutee, raudtee)
Lockheed Martin	Hydra Fusion Tools	https://www.lockheedmartin.com/en-us/products/cdl-systems/hydra-fusion-tools.html	x / -	x	3D mudel reaajajas, ajalooline monitooring, infrastruktuuri monitooring, projektimudel vs teostusmudel
Maps Made Easy	Maps Made Easy	https://www.mapsmadeeasy.com/	x / x		3D mudel, mahtude analüüs
Measure	Ground Control	https://www.measure.com/	x / x		Droonidel baseeruvate monitooringute planeerimine
Microdrones	mdCockpit	https://www.microdrones.com/en/	x / -	x	Drooni missioonide planeerimine
OpenDroneMap	OpenDroneMap	https://www.opendronemap.org/	x / -		Aeroskanneerimisest saadud andmete analüüs
Optelos	Optelos	https://optelos.com/platform/	x / x		Piksli analüüsil põhinev võrdlev analüüs (ajalooline)
Pix4D	Pix4Dmapper, Pix4Dbim, jt	https://pix4d.com/	x / -		3D mudel, mahtude analüüs, ehitustegevuste jälgimine
PrecisionHawk	PrecisionMapper, PrecisionViewer, PrecisionAnalytics	https://www.precisionhawk.com/software	x / x		Tehisintellektil baseeruv monitoorimise platvorm
Propellar	Propeller Platform	https://www.propelleraero.com/propeller-platform/	x / x		3D mudel, andmete kvaliteedi kontroll, interaktiivne ehitusplatsi ajajoon
SenseFly	Survey 360	https://www.sensefly.com/solution/survey-360/	x / x	x	3D mudel
SILLE	Datel AS	https://sille.space/en/	- / x		Satelliitseirel baseeruv infrastruktuuri monitoorimine
Simactive	Correlator3D	https://www.simactive.com/index.html	x / x		3D mudel
SiteAware Systems Ltd.	SiteAware	https://www.siteaware.com	x / x		Tehisintellektil baseeruv monitoorimise platvorm
Skycatch	Skycatch	https://www.skycatch.com/	x / x	x	3D mudel, monitoorimine, videoülevaated, BIM koordineerimine
Sky-Futures	Expanse	https://www.sky-futures.com/expanses/	x / x		Tehisintellektil baseeruv monitoorimise platvorm
Smartvid.io	Smartvid.io	https://www.smartvid.io/	x / x		Tehisintellektil baseeruv monitoorimine lähtuvalt tööohutusest
Stockpile Reports	Stockpile Reports	https://www.stockpilereports.com/	x / x		Mõõdistused, raportite genereerimine
Topcon	Context Capture, Collage, Collage Web, ClearEdge3D, EdgeWise/Verity, MAGNET Inspect	https://www.topconpositioning.com/software-solutions/mass-data-mapping/contextcapture	x / x	x	3D mudel, objekti tuvastus, projektimudel vs teostusmudel
Trimble	inPho UASMaster, Stratus	https://www.trimble.com/geospatial/inpho-uasmaster	x / -	x	3D mudel, objekti tuvastus ning selle genereerimine
Yuneec	DataPilot	https://us.yuneec.com/	x / -	x	Missiooni planeerimise platvorm

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.

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.

- 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.
- 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., Rodríguez-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) Terrestriiline 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.

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.
- 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.
- 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
- 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, kasutatud 07.06.2019.
- Varik (2017) Sildade mõõtmise satelliitandmete valideerimiseks, lõputöö, Tallinna Tehnikakõrgkool, Eesti.

Voormansik (2013) Maapinna ja majade vertikaallikumise mõõtmise 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.