



TALLINNA
TEHNIKAKÕRGKOO

Eero Pajuviidik

3D MASINJUHTIMISE SÜSTEEMIDEST SAADAVATE ANDMETE ANALÜÜS

LÕPUTÖÖ

Tallinn 2024



Eero Pajuviidik

3D MASINJUHTIMISE SÜSTEEMIDEST SAADAVATE ANDMETE ANALÜÜS

LÕPUTÖÖ

Ehitusinstituut

Teedeehitus

Juhendaja: Katrin Uueküla, MSc

Tallinn 2024

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Eero Pajuviidik

annan Tallinna Tehnikakõrgkoolile (edaspidi kõrgkool) tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose

3D masinjuhtimise süsteemidest saadavate andmete analüüs

- 1) reprodutseerimiseks eesmärgiga seda säilitada ja teha üldsusele kättesaadavaks Tallinna Tehnikakõrgkooli digiarhiivi DSpace kaudu;
- 2) reprodutseerimiseks pärast piirangu lõppu juhul, kui instituudi direktori korraldusega on kehtestatud lõputöö avaldamisele tähtajaline piirang.

Olen teadlik, et nimetatud õigused jäävad alles ka autorile ja kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid ega muid õigusi.

Autorideklaratsioon

Mina, Eero Pajuviidik
tõendan, et lõputöö on minu kirjutatud. Töö koostamisel kasutatud teiste autorite, sh juhendaja ja iseenda varasematele teostele on viidatud õiguspäraselt.
Kõik isiklikud ja varalised autoriõigused käesoleva lõputöö osas kuuluvad autorile ainuisikuliselt ning need on kaitstud autoriõiguse seadusega.

(allkirjastatud digitaalselt)

Juhendaja Katrin Uueküla
Töö vastab lõputööle esitatavatele nõuetele.

(allkirjastatud digitaalselt)

Lõputöö on kaitsmisele lubatud instituudi direktori korraldusega.

(allkirjastatud digitaalselt)

(kuupäevad digiallkirjades)

SISUKORD

SISSEJUHATUS	5
1 MASINJUHTIMISE SÜSTEEMIDE TUTVUSTUS	7
1.1 1D masinkontroll	7
1.2 2D masinkontroll	8
1.3 3D masinjuhtimise süsteem	8
2 3D MASINJUHTIMISE SÜSTEEMIDE TÄPSUS	12
2.1 Nõuded mehhanismile	12
2.2 3D masinjuhtimise mudel	12
2.3 3D masinjuhtimise süsteemi geodeetiline täpsus	13
2.3.1 Robot-elektrontahhümeeter	13
2.3.2 GNSS süsteem	15
2.3.3 Millimeeter-GPS	17
3 3D MASINJUHTIMISE SÜSTEEMIDEST SAADAVATE ANDMETE ANALÜÜS	19
3.1 Asukohaandmed	20
3.1.1 Üksikpunkti mõõtmise täpsus	22
3.1.2 Üksikpunktide kõrguslik võrdlus ehitusjärgse teostusmöödistusega	23
3.1.3 Logi failidest saadava punktipilve võrdlus teostusmöödistusega	26
3.2 Täiendavad andmed	30
3.2.1 Teerull	30
3.2.2 3D mudelite tegemine	31
4 SAADUD ANDMETE KASUTAMISE VÕIMALUSED	32
KOKKUVÕTE	35
SUMMARY	36
VIIDATUD ALLIKAD	38
Lisa 1. Kalendergraafik	40

SISSEJUHATUS

Tänapäeva kiiresti arenevas maailmas minnakse aina rohkem seda teed, et automatiseerida erinevaid protsesse. Põhjuseid selleks on mitmeid – vähenevad tööjõukulud ja kvalifitseeritud töötajate vähesuse tõttu vajadus uue personali pidevaks väljaõppeks; paraneb töö kvaliteet, sest mingi protsessi automatiseerimisega elimineeritakse tulemusest inimlikust eksimisest tekkinud viga; vähenevad kulud töö tegemisele, sest väheneb vajadus midagi parandada või ümber teha, paraneb ka töö kiirus.

Alates 1960-ndatest aastatest, kui tehti esimesed masinkontrolli süsteemid pöördlaseritega, on ka selles valdkonnas olnud tohutu edasimineku. Suur arenguhüpe oli 1990-ndatel, kui GNSS-süsteem tehti avalikkusele kättesaadavaks ja seda hakati rakendama ka masinjuhtimise süsteemides. Tänapäevaks on tehnika areng jõudnud nii kaugele, et inimese ülesandeks on jäänud tee ehitus masina (greider, ekskavaator) juhtimine ja töömehhanismi (näiteks buldooseri või greideri terad) juhtimine on automatiseeritud. [1]

3D masinjuhtimise süsteem on ühtselt toimiv kooslus erinevatest seadmetest. Sinna kuulub kas robot-elektrontahhümeeter koos prismadega või GNSS baasjaam ja GNSS antenn(id) ehitusmasinal; juhtarvuti kabiinis ja andurid ning seadmed hüdraulika juhtimiseks. Robot-tahhümeetriga või GNSS seadmetega saab seadme juhtarvuti infot oma asukoha kohta, juhtseadmesse laetud 3D projekti ja mudeli abil saab masin ja selle juht infot, kus ta peaks olema ehitusprojekti järgi ja andurite ning seadmete abil saab kas masin või operaator juhtida töömehhanismi projektijärgsele asukohale/kõrgusele.

Ruumiline info liigub robot-tahhümeetri või GNSS-seadme abil juhtarvutisse ning selle info põhjal suunatakse töömehhanismi. Kuid tänapäevaste 3D masinjuhtimise süsteemidega opereerides saab infot koguda tööseadmelt/ehitusmasinalt ka tehtud tööde kohta. Näiteks kui ekskavaatoriga, mis on varustatud 3D masinjuhtimise süsteemiga, teha väljakaevet, on teoreetiliselt võimalik peale kaevetööde lõppu saada piisavalt infot ekskavaatori kulbi liikumise kohta, et peale andmete töötlemist oleks võimalik saada selle väljakaevet ruumiline mudel. Samamoodi võiks peale teekonstruktsiooni tihendamist rulliga saada kohe ka infot selle kihi ruumilise asukoha kohta ning operatiivselt teostada aluseks oleva mudeli suhtes asukoha ning kõrgusliku kontrolli, selle asemel et oodata geodeedilt teostusjoonist. Kasutades ära 3D masinjuhtimise süsteemi võimalusi maksimaalselt, võib saavutada teedehituses peale kiirema ja kvaliteetsema tulemuse ka märkimisväärse rahalise ja ajalise võidu geodeedi poolt teostatud konstruktsioonikihtide märkimise ja kontrollimöödistamise arvelt.

Käesoleva lõputöö eesmärk on uurida, millisel kujul on võimalik 3D masinjuhtimise süsteemidest kätte saada andmeid tehtud tööde kohta, milline on nende andmete täpsus ning kuidas on võimalik neid andmeid kasutada kvaliteedi kontrolliks.

1 MASINJUHTIMISE SÜSTEEMIDE TUTVUSTUS

1.1 1D masinkontroll

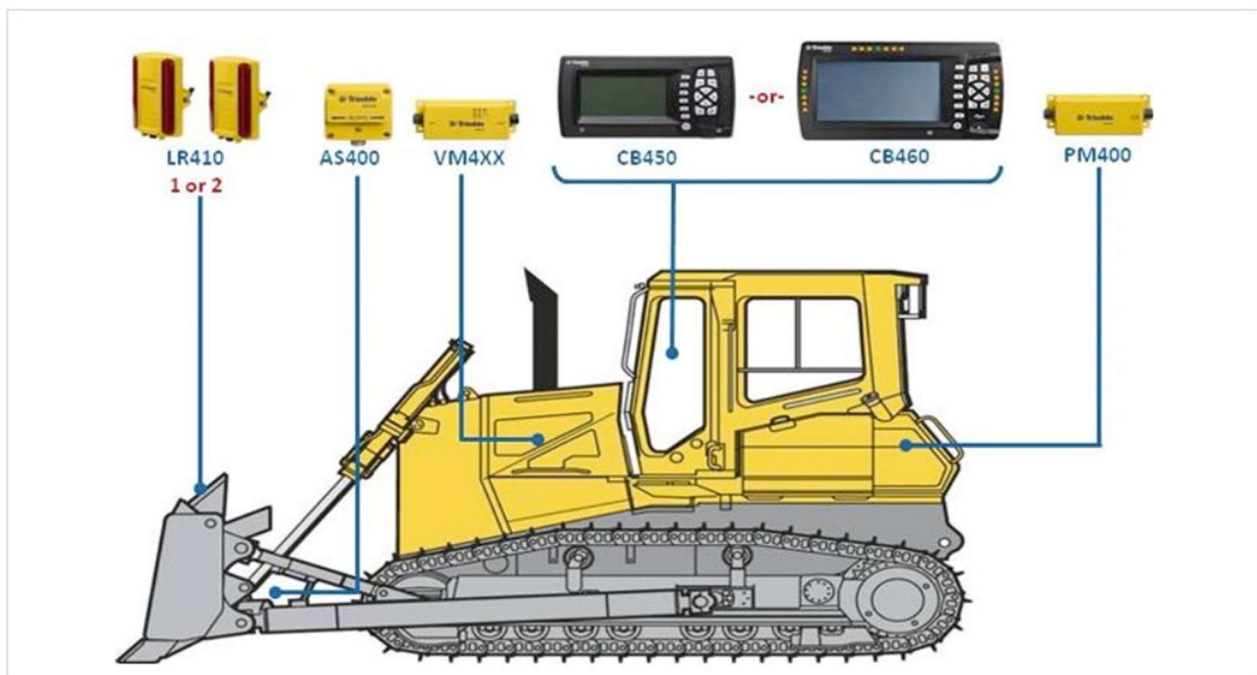
1D masinkontrolli süsteem koosneb pöördlaserist, signaali vastuvõtjast tööseadme (näiteks buldooseri tera) küljes ja kabiinis asuvast juhtseadmest (Foto 1). Pöördlaseri ja signaali vastuvõtja abil seatakse objektile asuva reeperi või muu kõrgusmärgi järgi paika vajalik kõrgus, näiteks väljakaeve põhi, ja kabiinis asuva juhtseadme abil on näha, kas tööseade on etteantud kõrgusest kõrgemal või madalamal. Selle abil saab masina juht iseseisvalt opereerida seadmega. Puudub vajadus teise inimese järgi, kelle ülesandeks on väljakaeve põhja või sisseveetava materjali kõrguslik kontroll. 1D masinkontrolli süsteem on kõige lihtsam lahendus, mis sobib eelkõige nendele töödele, kus ei ole vaja jälgida kaldeid – näiteks hoonete vundamentide alune väljakaeve, vundamentide killustikalusalused. Tähelepanu tuleb pöörata sellele, et laseri signaali vastuvõtja oleks kogu aeg pöördlaseri tööulatuses. [2, lk 14]



Foto 1. 1D masinkontrolli süsteem [3]

1.2 2D masinkontroll

2D masinkontrolli süsteem on oma ülesehituselt sarnane 1D süsteemiga (Joonis 1). Ainukene erinevus on selles, et 2D süsteemiga saab jälgida ka kaldeid. Selleks on vaja pöördlaserit, millel saab vajaminevad kalded fikseerida, sõltuvalt seadmest kas ühes või kahes, teineteisega risti olevas suunas. Kui tööseade on laiem ja sellel on võimalik muuta vertikaalset nurka (greideri tera) siis tuleks tööseadmele paigaldada kaks signaali vastuvõtjat tera otstes. Töö põhimõte sarnaneb 1D süsteemile, tuleb jälgida tööseadme kõrguslikku paiknemist. Uuematel süsteemidel on lisatud ka kaldeandurid, mille abil saab jälgida tera kallet masina suhtes ja selle info abil korrigeerida signaali vastuvõtja kõrgust. Ettevaatlik tuleb olla keerulisematel objektidel, kus on kalde muutused (kahepoolse põikkaldega teed). Sellisel juhul tuleb tee telg ehk kalde muutuse joon geodeedi või objektijuhi poolt tähistada visuaalselt, mehhanismi juhile arusaadavalt. [2, lk 15]



Joonis 1. 2D masinkontrolli süsteem buldooseri näitel. Sisaldab (üleväl vasakult paremale) laserkiire vastuvõtjaid, kaldeandurit, hüdraulika juhtplokki, juhtarvutit ekraaniga, toiteplokki [4]

1.3 3D masinjuhtimise süsteem

3D masinjuhtimise süsteem on 1D ja 2D masinkontrolli süsteemidest laiema kasutuspinnaga. Sinna kuuluvad asukoha määramise süsteem (kas GNSS baasjaam ja üks või kaks GNSS

antenni mehhanismi peal või robottahhümeeter ja üks või kaks prismat mehhanismi peal), kaldeandurid mehhanismi oluliste osade peal, hüdraulika juhtimise süsteem, juhtarvuti. [2, lk 16]

Tänapäeval paigaldatakse 3D süsteemi sisuliselt kõikidele teedehituse masinatele (ekskavaator, buldooser, teerull, asfaldifrees jne), mille kasutamisel on vajalik teada täpset asukohta. Süsteemi keerukus sõltub mehhanismi keerukusest. Näiteks buldooseri puhul paigaldatakse GNSS antenn või prisma otse hõlma peale. Hõlmale kinnitatakse ka kaldeandur, et fikseerida hõlma nurka buldooseri suhtes. Juhtarvutisse sisestatakse GNSS antenni või prisma täpsed mõõdud hõlma alumise serva ehk tera suhtes. Nende parameetrite järgi saab juhtsüsteem välja arvutada tera täpse asukoha ja näidata ekraanil, kus tera asub projekti suhtes. Uuematel süsteemidel on buldooseri ja greideri tera juhtimine automatiseeritud – juht sõidab masinaga töömaal ja 3D masinjuhtimise süsteem juhib ise tera kõrgust ning kaldenurka. Sarnane loogika käib ka ekskavaatori kui kõige keerulisema süsteemi kohta, kus mõõdetavaid detaile ning erinevaid andureid on rohkem. [2, lk 16]

Süsteemi seadistamiseks tuleb spetsiaalse programmi abil mõõta elektrontahhümeetriga liigendite ja GNSS antennide asukohad. Lisaks sisestatakse käsitsi kulbi mõõdud (Foto 2).

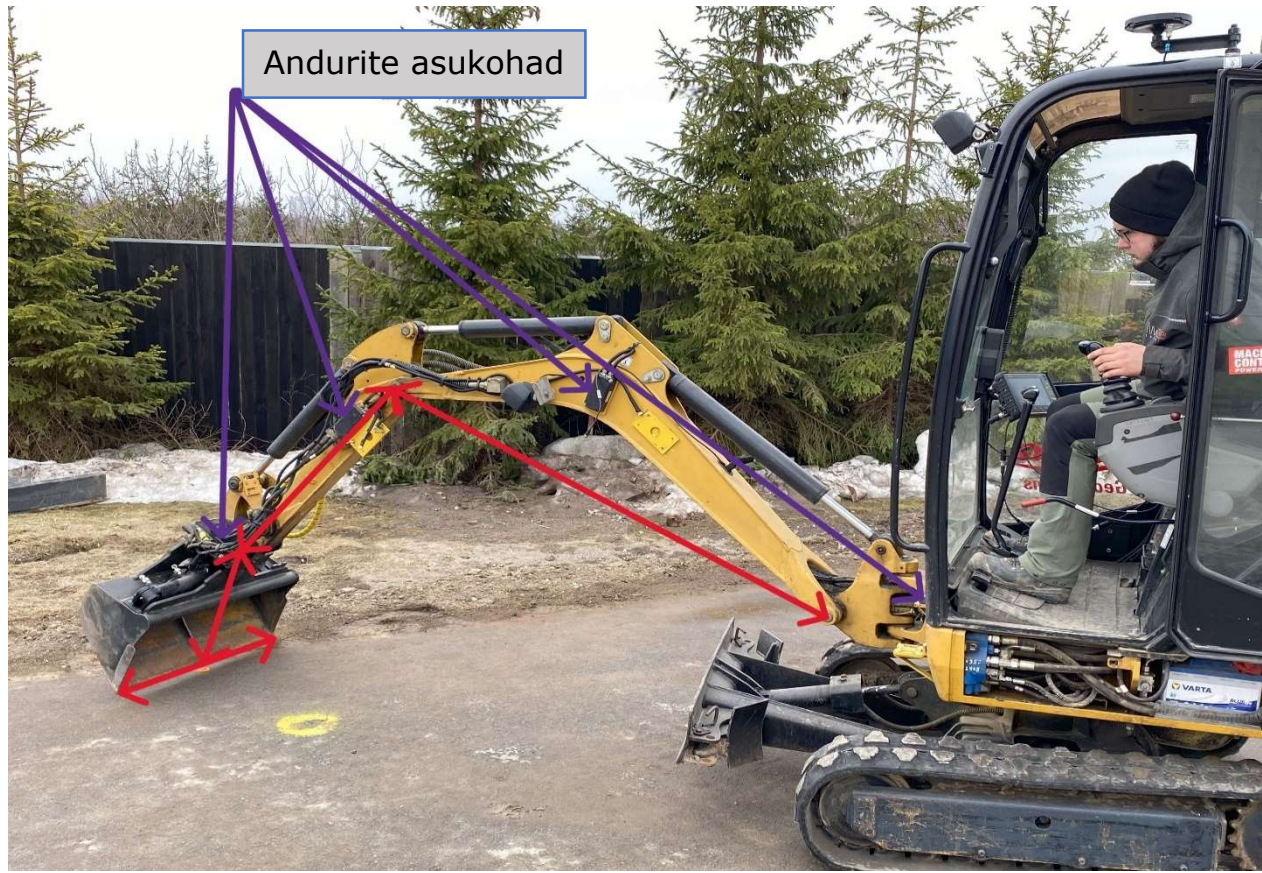


Foto 2. 3D masinjuhtimise süsteemiga ekskavaator

Fotol 2 on punaste nooltega näidatud põhilised parameetrid, mida tuleb sisestada 3D masinjuhtimise programmi süsteemi seadistamiseks

Enamlevinud ekskavaatorite andmed ja parameetrid on juba eelnevalt sisestatud. Saadud mõõtmistulemuste ja andurite abil on juhtarvutil võimalik jälgida kulbi tera asukohta kolmemõõtmelises ruumis igal ajahetkel (Foto 3).



Foto 3. Ekskavaatori juharvuti ekraani vaade [14]

Uuematel 3D süsteemidel, mis on paigaldatud ekskavaatoritele, on kulbi juhtimine osaliselt automatiseeritud. Ekskavaatori juhi ülesanne on viia kulp n.ö. kaevamise asendisse ja kulpi tagasi tõmmates jälgib süsteem ise kulpi tera kõrgust. Tänu sellele saab kaevamise lõpetada täpselt projektsel kõrgusel ja ei pea aega raiskama inimlikust faktorist tekkinud vea parandamisele. [5]

2 3D MASINJUHTIMISE SÜSTEEMIDE TÄPSUS

3D masinjuhtimise süsteemi täpsus ja teostatava töö kvaliteet sõltub erinevate osade ladusast koostööst (töökorras tee-ehitusmasin, vigadeta projektimudel, täpsed asukohaandmed). Häire süsteemi ühe osa töös (vigane projektimudel, nõrk GNSS signaal) võib viia ebakvaliteetse tulemuseni, mille ümbertegemine võib olla aja- ja ressursimahukas.

2.1 Nõuded mehhanismile

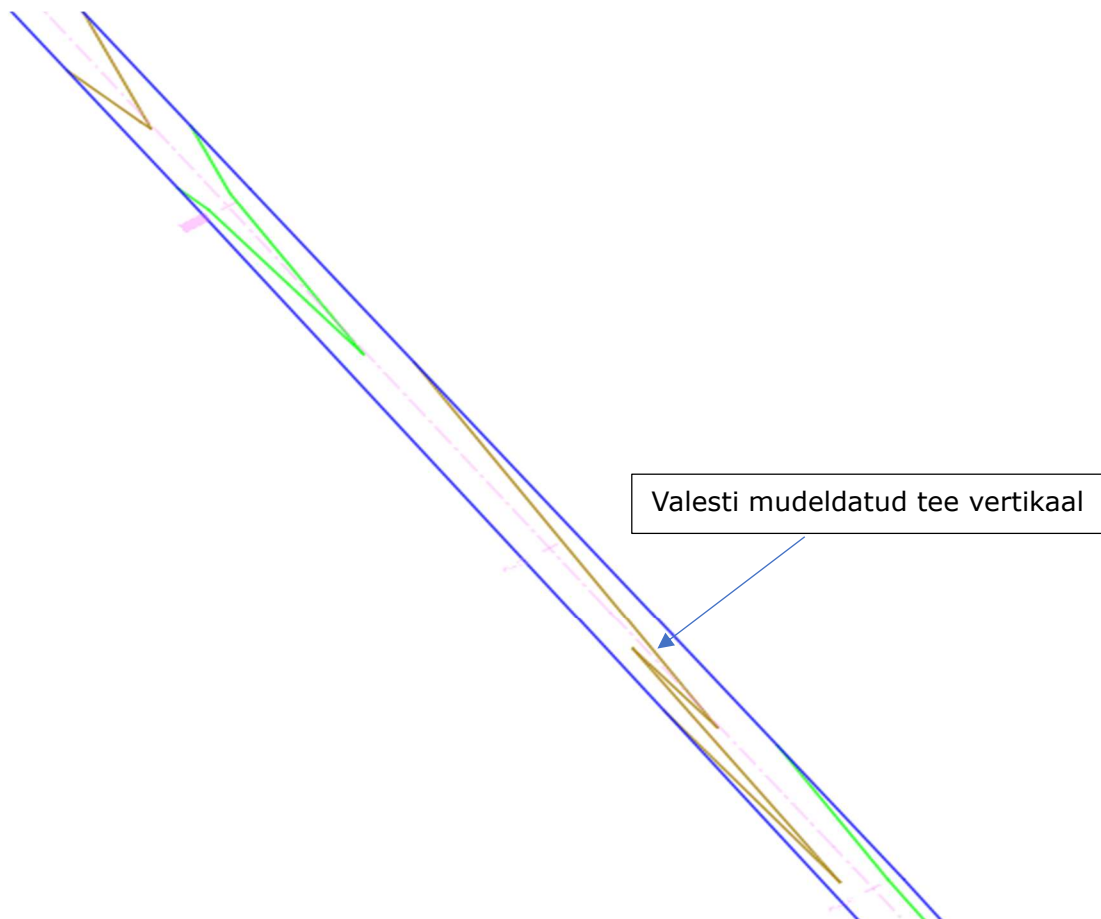
3D masinjuhtimise süsteeme saab paigaldada sisuliselt kõikidele ehitusmasinatele. Osad masinatootjad pakuvad 3D valmidust tehase poolt, teistel tuleb kogu installeerimise töö spetsiaalse teenuse pakkuja poolt ära teha. Seega erinõudmises masinatele ei ole, tuleb ainult jälgida tehnilist korrasolekut – hüdraulika veatut toimimist ja et liigendites ei oleks lõtku sees. Pigem sõltub süsteemi paigaldamine majanduslikust otstarbekusest.

2.2 3D masinjuhtimise mudel

3D masinjuhtimise mudel on projekti põhjal koostatav ruumiline mudel ehitatavast objektist, mis koosneb kas 3D murdjoontest, kolmnurkadest või mõlemast. Sõltuvalt tööde teostaja oskustest ja teadmistest koostatakse kas ainult pealmise pinna (asfaldi) töömudel ja töö käigus arvestatakse alumiste kihtide paksuseid ning laiuseid, või tehakse igale konstruktsioonikihile oma mudel. Põhilised probleemid mudelite kasutamisel on mudeli ajakohasus ja mudeli täpsus.

Mudeli ajakohasus - tööde teostamisel peab kasutuses olema kõige värskem versioon projektist mudeli kujul. Kui tööprojekti raames tehakse tööde käigus mingi ehitustööd puudutav muudatus, siis tuleb selle põhjal koostatud uus töömudel võimalikult kiiresti anda edasi töid tegevate masinate juhtarvutitesse. Seda saab teha üldjuhul kas füüsiliselt mälupulgaga või kui tehnikal on olemas võrguühendus serveriga, siis läbi interneti.

3D masinjuhtimise mudeli täpsus - töömudeli koostamisel tuleb teha alati ka visuaalne mudeli kontroll. Viga projektis või projekti koostamiseks tehtud ehitusgeodeetilises uurimistöös võib moonutada töömudelit piisavalt, et tekiks suured erinevused võrreldes reaalsusega. Lisaks koostatakse töömudel projektist automaatselt vastavat tarkvara kasutades, mis võib ka omakorda moonutada lõpptulemust (Joonis 2). Seetõttu tuleb alati enne töömudeli masinatele edastamist kontrollida mudelit visuaalselt.



Joonis 2. Vigane projektmodel

2.3 3D masinjuhtimise süsteemi geodeetiline täpsus

3D masinjuhtimise süsteemid kasutavad oma asukoha määramiseks samu instrumente, mida geodeedid oma igapäevatöös – robot-elektrontahhümeetrit, RTK GNSS süsteemi. Erinev on saadud asukohaandmete rakendamine – geodeet kasutab mehhanismi operaatori jaoks iseloomulike kohtade tähistamiseks naelu, puutikke ja värvi, 3D masinjuhtimise süsteemi abil saab koheselt opereerida tööseadmega.

Vähem levinud on millimeeter-GPS, kus on kombineeritud GNSS süsteem plaanilise asukoha määramiseks ja pöördlaser kõrgusliku täpsuse saavutamiseks.

2.3.1 Robot-elektrontahhümeeter

Robot-elektrontahhümeetri kasutamise eelduseks on geodeedi poolt loodud geodeetiline mõõdistusvõrk objektil. Mõõdistusvõrgu punktide tihedus ja asukohad sõltuvad objektist.

Mõõdistusvõrgu punkte tuleks objektile paigaldada piisavalt, et oleks võimalik teostada mõõdistusi terve objekti ulatuses. Jälgida tuleks seda, et lähimate mõõdistusvõrgu punktide vahel oleks otsene nähtavus ja nende vaheline kaugus maksimaalselt 200 meetrit. Täpsusnõuded mõõdistusvõrgule on välja toodud majandus- ja taristuministri määruses nr 34, "Topo-geodeetilisele uuringule ja teostusmõõdistusele esitatavad nõuded", vastu võetud 14.04.2016. [6]

Robot-elektrontahhümeeter orienteeritakse mõõdistusvõrgu punktide abil kas asetades instrument mõõdistusvõrgu punktile, mille koordinaadid on teada, või tehes kahe või kolme mõõdistusvõrgu punkti vahele vaba jaama meetodil ja selle tulemusel saadakse instrumendi asukoha koordinaadid. Seda tuleb teha iga kord, kui instrument seatakse tööasendisse või kui tuleb parandada selle horisontaalsust (pehme pinnase või vibratsiooni tõttu on elektrontahhümeeter horisontaaltasapinnas nii palju vajunud, et selle sees olevad kompensatorid ei suuda enam instrumendi kaldest tulenevat viga korrigeerida). Robot-elektrontahhümeeter hakkab omakorda mõõtma pideva mõõtmise režiimis tee-ehitusmasina küljes oleva prisma/prismade asukohta (Foto 4). Selle tulemusel arvutab 3D masinjuhtimise süsteemi juhtarvuti masina töömehhanismi täpse asukoha ja võrdleb seda projektijärgse mudeli asukohaga. Selle süsteemi plussiks on suurem täpsus – läbi prisma ja robot-elektrontahhümeetri on 3D masinjuhtimise süsteem pidevalt seotud objektile rajatud geodeetilise mõõdistusvõrguga. Kõige suuremaks miinuseks on piiratud tööulatus – tee-ehitusmasina küljes olev prisma peab olema tahhümeetrile nähtav ja kaugusmõõtja töötsoonis. Nende tingimuste säilitamiseks tuleb kas robot-elektrontahhümeeter edasi tõsta uude asukohta ning sooritada elektrontahhümeetri orienteerimine, mis on ajamahukas töö, võtab aega ca 30 minutit. Või kasutada samaaegselt ühel objektil mitut tahhümeetrit, mis on aga rahaliselt kulukas.

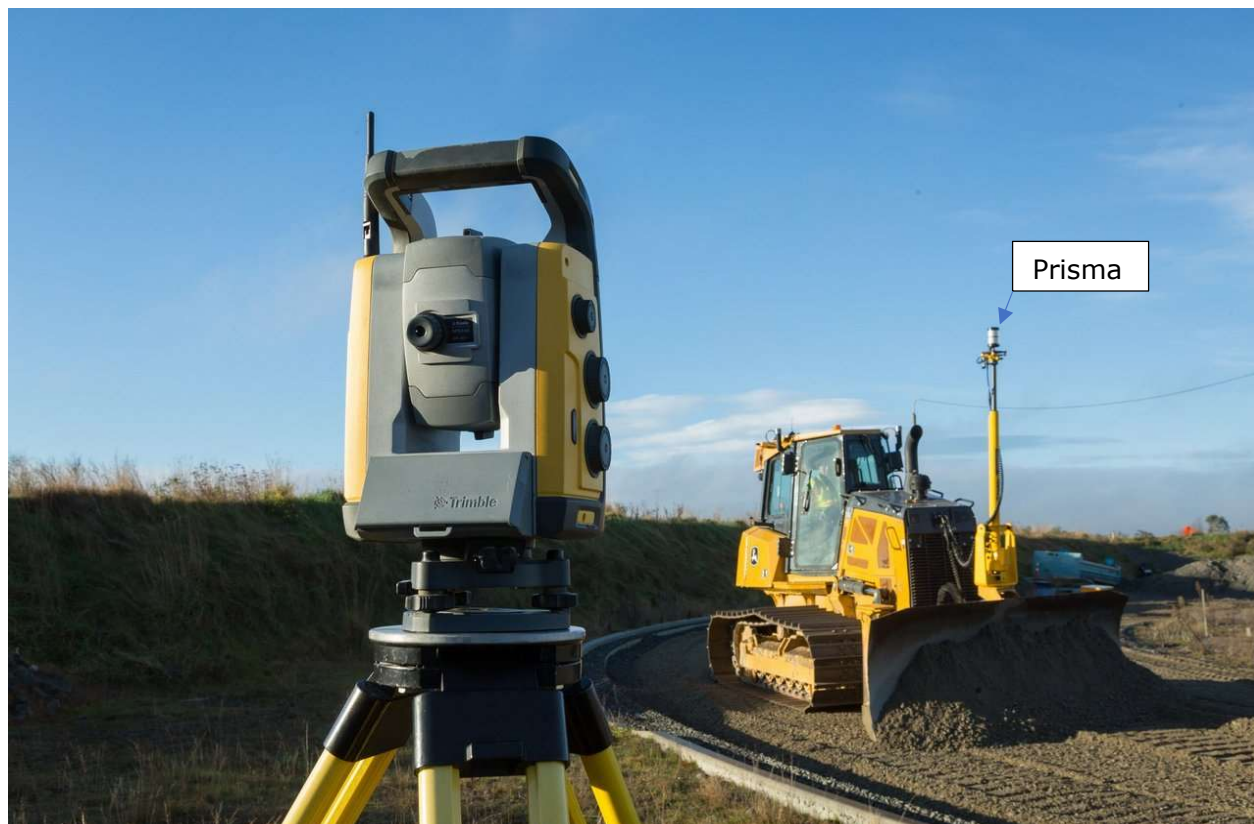


Foto 4. Buldooser koos robot-elektrontahhümeetriga tee-ehitusobjektil [7]

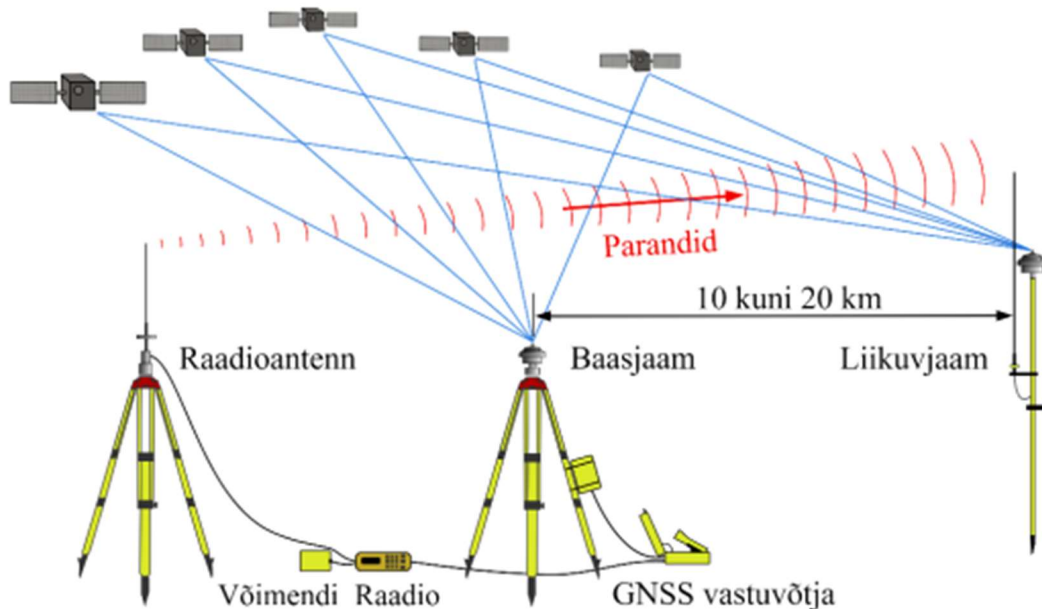
2.3.2 GNSS süsteem

GNSS ehk globaalne asukoha määramise süsteem on üle maailma asukohamääramist ja navigatsiooni võimaldav sidesatelliitide süsteem. Enamkasutatavad satelliitnavigatsioonisüsteemid on GPS (USA), Glonass (Venemaa), Galileo (Euroopa Liit), BeiDou (Hiina). [8, lk 78]

GNSS-mõõtmine põhineb raadiosignaalide (oma olemuselt elektromagnetilised lained) edastamisel satelliitidelt läbi antenni vastuvõtjasse. Teades satelliitide täpset asukohta ja aega, millal signaal väljub satelliidist ning jõuab vastuvõtjasse, saab välja arvutada vastuvõtja antenni täpse asukoha. Minimaalselt on selleks vaja 4 satelliidi andmeid ja signaali. Korruga võib asukoha määramisel kasutusel olla paralleelselt mitu süsteemi, mida saab vajadusel ükshaaval ka välja lülitada. [8, lk 106]

Koos satelliitidega kasutatakse ka baasjaama või baasjaamade võrku, kus jaamade koordinaadid on täpselt määratud, ja nendelt jaamadelt saadud mõõtmistulemusi kasutatakse satelliitidelt saadud asukohaandmete korrigeerimiseks (Joonis 3).

GNSS-mõõtmise üheks eelduseks on avatud horisont – looduslike ja tehislake objektide (puud, majad) lähedus takistab signaalide liikumist satelliitidelt vastuvõtjasse ning sellega suureneb mõõtmiste viga.



Joonis 3. RTK GNSS mõõdistusviisi tööpõhimõte. [8, lk 357]

Joonisel 3 näidatud liikuvjaamaks võib olla ka 3D masinjuhtimise süsteemi GNSS antenn

3D masinjuhtimise süsteemides on üldjuhul kasutusel RTK mõõdistusviis – reaajas kinemaatiline mõõtmine ühe baasjaama suhtes. RTK GNSS-mõõtmise ajal on üks GNSS-antenn, nn baasjaam, tsentreeritud eelnevalt koordineeritud punktile, milleks võib kasutada riikliku geodeetilise võrgu punkti või mõõdistusvõrgu punkti. Baasjaama saab tsentreerida ka selle jaoks eraldi rajatud punktile, milleks võib olla konstruktsioon maapinnal või hoone katusel, kuhu saab paigaldada GNSS-antenni. Enda rajatud punkt on vaja eelnevalt tahhümeetrilisel või GNSS-meetodil koordineerida. Teine (teised) RTK-vastuvõtja(d), nn liikuvjaam(ad), liigub(vad) punktilt punktile ning sellega määratakse punkti koordinaadid. Baas- ja liikuvjaam peavad mõõtmise ajal jälgima samu satelliite ning nende vahel peab mõõtmise ajal toimima andmeside, milleks kasutatakse raadio-, mobiilsidet või internetiühendust. Saavutamaks RTK-mõõtmistega 1–2 sentimeetrist täpsust, peab olema tagatud baas- ja liikuvjaama vaheline kaugus mitte üle 20 kilomeetri. [8, lk 356]

2.3.3 Millimeeter-GPS

Millimeeter-GPS, mille tootjaks on Topcon, on kombinatsioon satelliitnavigatsioonist ja selle lahenduse jaoks välja töötatud laia ulatusega pöördlaserist (Foto 5). Pöördlaseris kasutatakse arenenud viisi laserkiire geomeetria muutmiseks. Laserkiirte tsoon koosneb kolmes tasapinnas asuvast kiirtevihest, mis paiknevad otsevaates N-kujulises formatsioonis – kaks paralleelset vertikaalset tasandit ja nende vahel asuv üks diagonaalne. 360 kraadi ulatuses pöörlev rotaator edastab laservihu seadmest väljapoole, tekitades koonusekujulise kiirte tsooni. Antud lahendusega võimaldatakse vertikaalsuunas kuni 5m kõrgune töötsoon laseri tsentri suhtes. Sellist lahendust nimetatakse LaserZone tehnoloogiaks. Teades laserkiire vastuvõtja kaugust ja horisontaalnurka pöördlaseri suhtes saab välja arvutada kõrguse parandi. Süsteemi toimimiseks on vaja avatud horisonti ja GNSS baasjaama millele on määratud ristkoordinaadid ning objektile geodeedi poolt paigaldatud lähtereeperit pöördlaseri jaoks, et saavutada suurem kõrguslik täpsus. Geodeedi reeperi võib vajadusel asendada mõne muu üheselt arusaadava ja ehitustööde ajal säilitatava/kontrollitava kõrgusliku lähtepunktiga (suurem kivi, kaevu luuk). [9]

Tee-ehitusmasina külge paigaldatakse GNSS antenn koos pöördlaseri kiire vastuvõtjaga. Juhtarvuti saab asukohaandmed GNSS-mõõtmise teel ja kõrguse pöördlaserist. Sellise kombinatsiooniga tagatakse suurem kõrguslik täpsus 3D masinjuhtimise süsteemi töös. [9]



Foto 5. Millimeeter-GPS komplekt: GNSS antenn koos pöördlaseri kiire vastuvõtjaga, juhtarvuti, pöördlaser [10]

3 3D MASINJUHTIMISE SÜSTEEMIDEST SAADAVATE ANDMETE ANALÜÜS

Selles peatükis on kasutatud Leica MC1 tarkvarast ja Leica ConX keskkonnast saadud informatsiooni. Teiste tootjate (Trimble, Topcon) poolt saadavad andmed ja nende kogumise viis võivad erineda siin väljatoodust.

Leica MC1 on 3D erinevate funktsioonidega masinjuhtimise tarkvara – masina tööseadme asukoha määramine GNSS vastuvõtjast või robot-elekrontahhümeetrist saadud andmete alusel, tööseadme asukoha võrdlus projektudeliga, tööseadme asukoha salvestamine üksikpunktina või mõõtmiste seeriana, lihtsamate mudelite koostamine, logi failide salvestamine. Leica MC1 tarkvara töötab koos Leica MCP80 juhtarvuti paneeliga ja MDS10/20/30 dokkimisjaamaga (Foto 6). [11]



MCP80 (control panel)



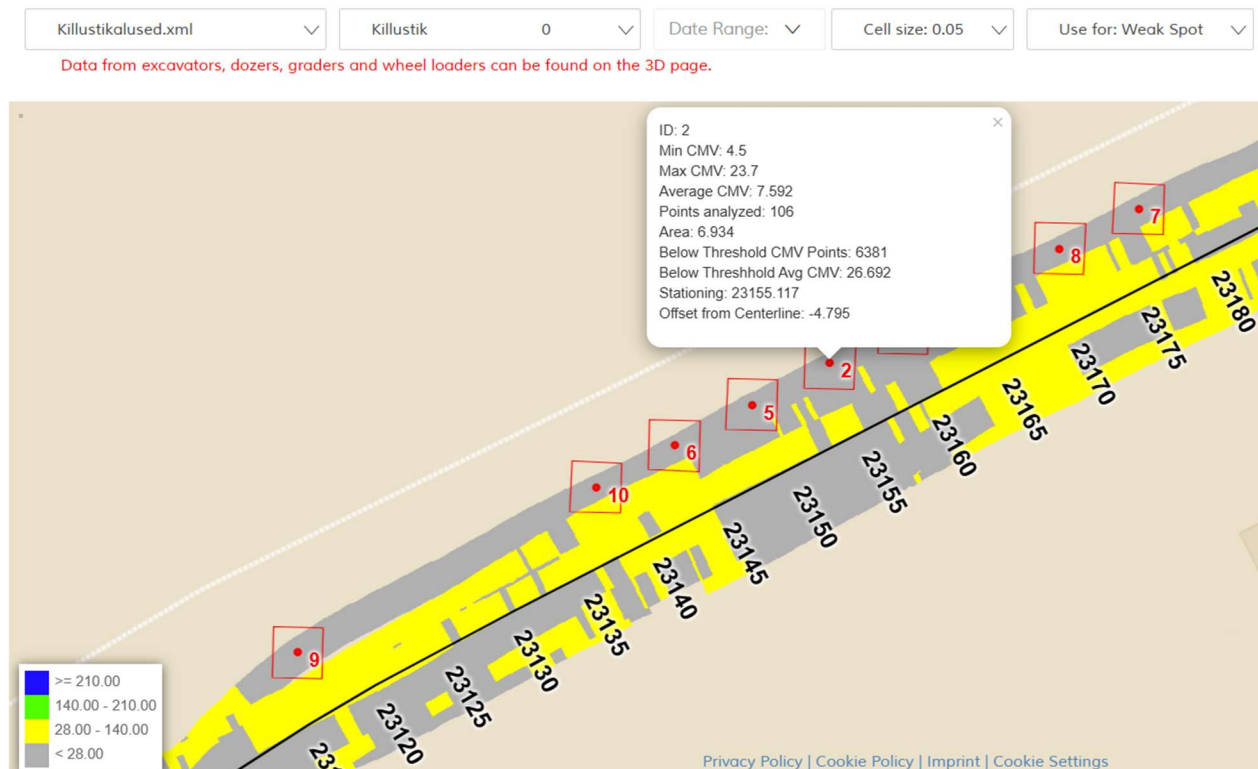
MDS10/20/30 (docking station)

Foto 6. Leica MC1 programm koos MCP80 juhtarvuti paneeliga (vasakul), MDS10/20/30 dokkimisjaam (paremal) [11, lk 6]

Leica ConX on pilvepõhine keskkond 3D masinjuhtimise süsteemide andmete haldamiseks. Leica ConX ja Leica MC1 vaheliseks andmeedastuseks on kaks variant – kas internet teel andmete üles/alla laadimine või mälupulgaga. ConX-st saab MC1-te edastada projektumodeleid ja masina jaoks vajalikke parameetreid, MC1-st ConX-I tehtud tööde kohta logi faile ja muid andmeid. Kui MC1 ja ConX vahel on internetiühendus, siis on võimalik reaalajas edastada projekti muudatusi mudeli kujul ja jälgida masina töö kvaliteeti. [11]

MC1 ja ConX poolt kogutav info on järgmine: tööseadme kõrgus, tööseadme kõrguse vahe võrreldes projektiga, läbikute arv, kiirus, vibratsiooni sagedus (teerull), vibratsiooni amplituut (teerull), mõõdetud suhteline tihedus (teerull), mõõdetud suhtelise tiheduse erinevus etteantud normist (teerull), nõrgad kohad (Joonis 4). [11]

Joonisel 4 päises olevatest rippmenüüdest saab valida (vasakult paremale) vajaliku mudeli, planeeritud erinevuse mudelist (offset), andmete esitamise ajaline aken 5 minuti täpsusega, esitatava kaardi andmete ruudustiku suurus (5cm – 10m), esitatavad andmed.



Joonis 4. Leica ConX tiheduse mõõtmise kaart koos süsteemi poolt leitud nõrkade punktidega (punased nummerdatud kastid)

Kõiki neid andmeid saab kuvada analoogselt üleval näidatud tiheduse kaardile. 3D masinjuhtimise süsteemi saab sisestada mingite andmete eeldatavad parameetrid, mille suhtes hakkab süsteem oma tööd võrdlema (suhteline tihedus, läbikute arv, kiirus).

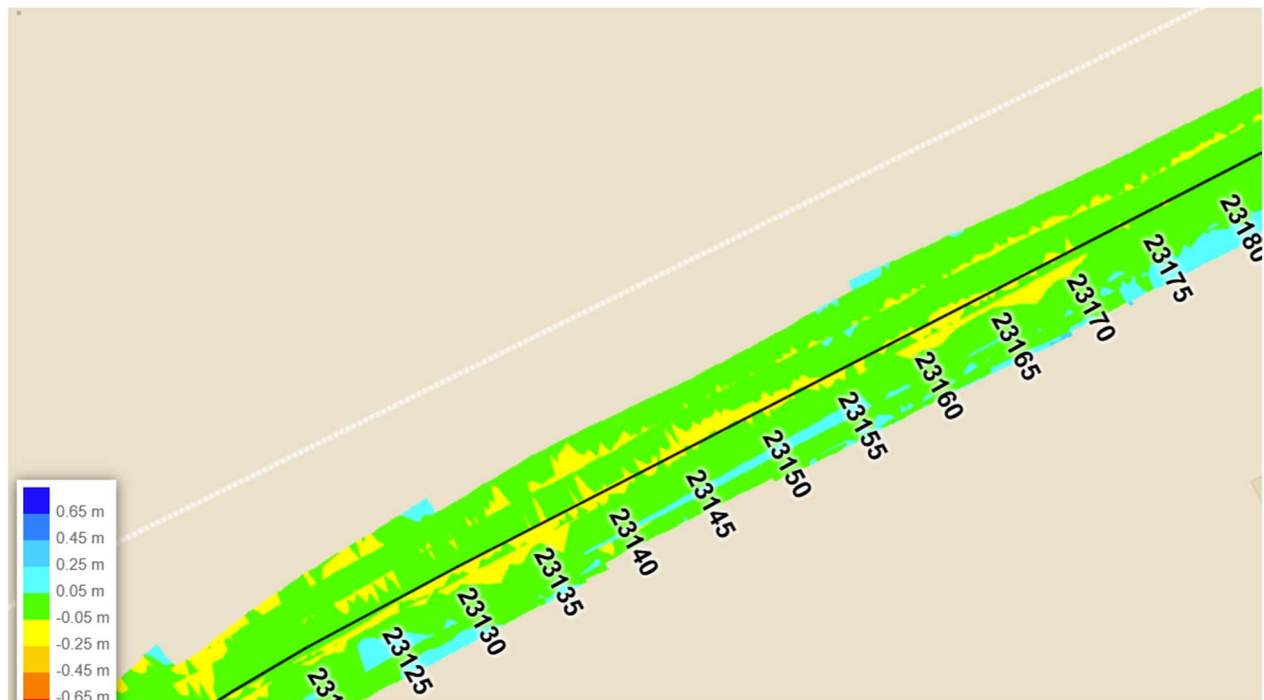
3.1 Asukohaandmed

3D masinjuhtimise süsteemidest saab asukoha andmeid koguda kahel viisil – mõõtmiste tulemusel ja logi failidest. [11]

Punkti mõõtmisel on kaks erinevat lahendust – üksikpunkti mõõtmine ja punktide automaatne mõõtmine. Punkte mõõdetakse tööseadme asukoha järgi. Üksikpunkti mõõtmine toimub manuaalselt, nupule vajutamisega mingil ajahetkel. Punktide automaatne mõõtmine toimub mingi kindla intervalliga – ajaline või ruumiline. [11]

Mõõtmisrežiimis saab määrata, kas punkte mõõdetakse tööseadme vasakult küljelt, paremalt küljelt, keskelt või kõigist kolmest kohast korraga. Salvestatav info on punkti number, x ja y koordinaat, kõrgus, punkti iseloomustav kood. Seda mõõtmisrežiimi saab rakendada ka ilma projektse mudelita. [11]

Logi failidest on võimalik kätte saada n.ö. tööseadme liikumise ruum. Selle loomiseks on vaja projektset mudelit, mille järgi tööd tehakse. MC1 programmis saab määrata parameetrid, kui palju mudelist väljapool veel tööseadet jälgitakse. MC1 salvestab tööseadme liikumise andmed. Saadud info põhjal saab Leica ConX keskkonnas luua 3D punktipilve, ruudustikuga min 5cm, max 10m (Joonis 5). Infona kuvatakse tööseadme kõrgus, tööseadme kõrguse vahe võrreldes projektiga, läbikute arv, kiirus. Neid parameetreid on võimalik jälgida 5 minuti täpsusega kogu mehhanismi tööaja jooksul. [11]



Joonis 5. Leica ConX ruumiliste andmete vaade

Joonis 5 puhul kuvatakse skaalal välja toodud värvidega konstruktsioonikihi kõrguste erinevused projektsest modelist.

3.1.1 Üksikpunkti mõõtmise täpsus

3D masinjuhtimise süsteemidest saadavate üksikpunkti andmete kontroll tehti antud lõputöö raames koostöös THEK Tehnika OÜ-ga. Selle eesmärgiks on tee-ehitusmasina, milleks antud lõputöös valiti miniekskavaator, töömehhanismi geodeetilise täpsuse hindamine. Kasutamiseks oli miniekskavaatori külge paigaldatud Leica masinjuhtimise süsteem koos MC1 tarkvaraga. Süsteem kasutas kahte GNSS antenni asukoha määramiseks. GNSS baasjaamaks oli THEK Tehnika referentsjaamade võrgu jaam HUURU, asukohaga Harju maakonnas Hüüru külas Angerja tee 42 hoone katusel.

Üksikpunkti mõõtmise täpsuse kontroll toimus 14.03.2024 THEK Tehnika kontorihoone territooriumil. Esmalt paigaldati asfaldisse betooninael, mille tsentrile määras THEK Tehnika esindaja Leica Roveriga kahekordse initsialiseerimisega 1-minutilise sessiooniga L-EST97 süsteemis koordinaadid ja EH2000 süsteemis kõrguse. Seejärel teostati selle punkti kontrolli 3D masinjuhtimise süsteemiga. Juhtarvuti ekraan näitas, et asukoha määramiseks saab kasutada 19 satelliiti 19-st, 3D täpsushinnang oli 0,009. Sama punkti peale asetati miniekskavaatori kulbi keskkoh (Foto 7), mis oli eelnevalt mõõdulindi abil kulbil tähistatud markeriga. Saadud koordinaadid koos vahedega on näha Tabelis 1.

Tabel 1. Leica Roveri ja 3D masinjuhtimise süsteemi koordinaatide erinevused

Mehhanism	x	y	H
Leica Rover	6583982,125	532184,569	33,964
Kulbi tsenter	6583982,150	532184,550	33,960
Vahe	-0,025	0,019	0,004

Peale keskkoha kontrollimist asetati punkti peale kulbi nurk (Foto 7) ja saadi kulbi nurga koordinaadid, mis on koos saadud vahedega on näha Tabelis 2.

Tabel 2. Leica Roveri ja 3D masinjuhtimise süsteemi koordinaatide erinevused

Mehhanism	x	y	H
Leica Rover	6583982,125	532184,569	33,964
Kulbi nurk	6583982,150	532184,550	33,960

Vahe	-0,025	0,019	0,004
------	--------	-------	-------

Kuna ekskavaator annab andmed sentimeetrites, siis sisaldavad koordinaatide vahed ka ümardamisvigu. Kulbi keskkohaga ja kulbi nurgaga mõõdetud koordinaatide kokkulangevust saab seletada sellega, et masina tööseadme parameetrid on mõõdetud ja sisestatud juhtarvutisse täpselt.



Foto 7. Punkti kontroll ekskavaatori kulbi keskkohaga (vasakul) ja nurgaga (paremal)

Nõuded geodeetilistele mõõdistustöödele, sealhulgas täpsusnõuded, on välja toodud Majandus- ja taristuministri määrusega nr 34, vastu võetud 14.04.2016. Selle määruse järgi (§ 8 Lg1 P1) on tasapinnaliste koordinaatide lubatud suurim viga hoone ja üheselt määratava kontuuriga rajatise asendi puhul viis sentimeetrit lähimate mõõdistamisvõrgu punktide suhtes. § 8 Lg4 P1 järgi maapealse situatsioonielemendi suurim lubatav kõrguslik viga lähimate mõõdistamisvõrgu punktide suhtes on püskatendi, kaevukaane, vundamendi sokli või sarnase rajatise puhul mõõtkavades 1:500 ja 1:1000 3 sentimeetrit. Ülal toodud tabelites välja toodud vahede järgi võib öelda, et 3D masinjuhtimise süsteemiga mõõdetud punktid vastavad määruses nr 34 välja toodud täpsusnõuetele. [6]

3.1.2 Üksikpunktide kõrguslik võrdlus ehitusjärgse teostusmõõdistusega

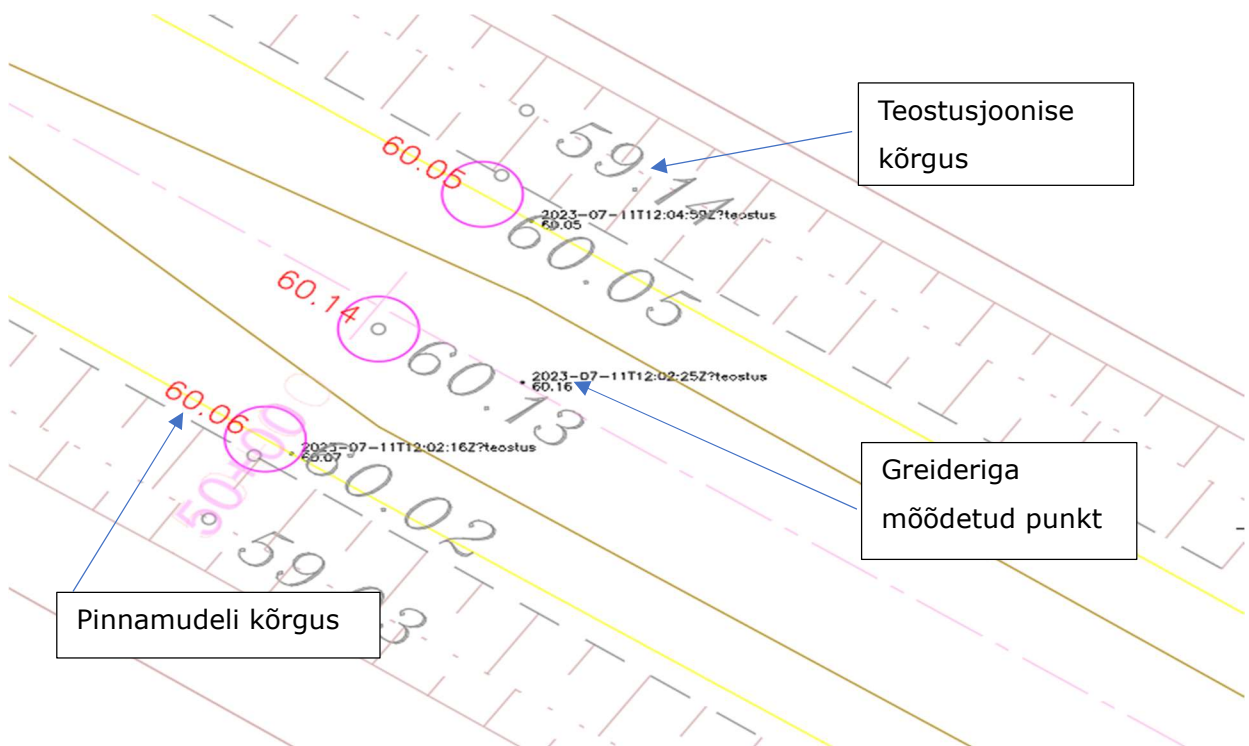
Võrdlemiseks olev objekt on Järva maakonnas Türi vallas Kärevere külas kõrvalmaantee 15173 Oisu-Kärevere-Taikse km 4,920—7,706. Suvel 2023 toimus selle tee rekonstrueerimine AS Taristoni poolt. Antud teelõik asub lagedal, põldude vahel, seega horisondi avatuse kohapealt on objekt sobilik GNSS mõõdistusteks. Võrreldavateks andmeteks on 3D

masinjuhtimise tehnikaga varustatud greideri poolt teostatud üksikpunktide mõõtmine ning OÜ R Geo poolt teostatud ehitusjärgne teostusjoonis.

3D masinjuhtimise süsteemiga teostati GNSS mõõdistus, baasjaamaks oli THEK Tehnika baasjaamade võrgu jaam SAREVERE. Mõõtmine toimus 11.07.2023. Greideriga mõõdistati stabikihi kõrgused sammuga 100m. Peale stabikihi paigaldamist tehti objektil pindamine, Taristoni esindaja kinnitusel oli kihi paksus ca kaks cm.

Teostusmõõdistuseks kasutati Trimble R12 GNSS vastuvõtjat. RTK GNSS mõõdistuse baasjaamaks oli Geosoft OÜ'le kuuluv VERE Trimble® VRS Now Eesti GNSS püsijaam Olustveres. Kontrollpunktiks oli Kärevere99 (lähemal GNSS mõõtmiseks sobivat punkti ei olnud). Mõõtmine toimus 27.07.2023.

Võrdluse läbiviimiseks kasutati greideriga mõõdetud punkte ja tõsteti need 2cm kõrgemale, et tuletada pinnatud kihi kõrgus. Tõstetud kõrgustega punktidest tehti 3D pinnamudel, kasutades Autodesk Civil 3D 2025 programmi. Peale pinnamudeli korrigeerimist lisati võrdluseks ehitusjärgne teostusjoonis ja võrreldi tee teljel olevate punktide omavahelisi kõrguseid (Joonis 6). Võrdluste tulemus on välja toodud Tabelis 3.

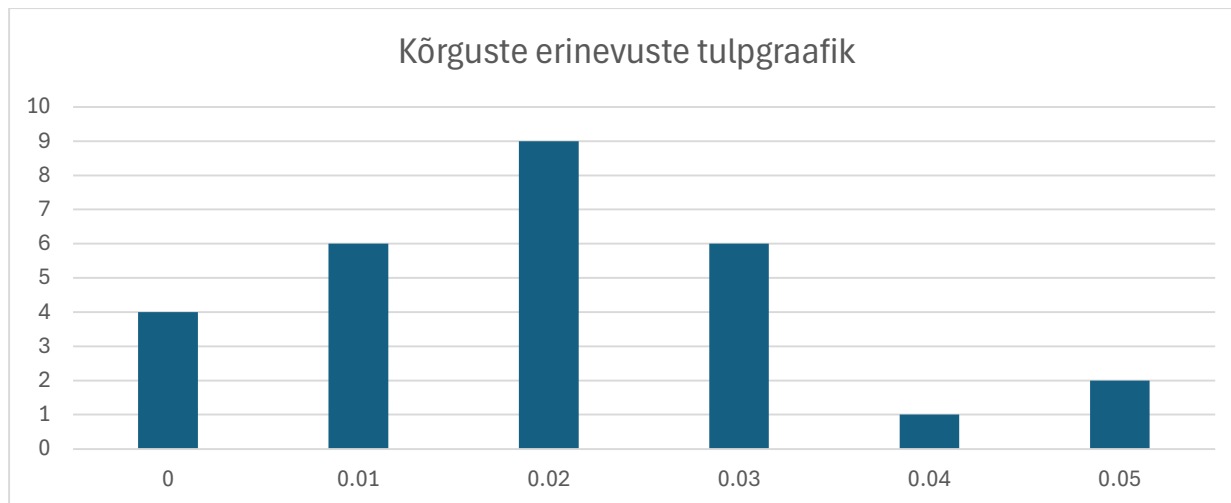


Joonis 6. Greideriga mõõdetud punktid ja nende abil koostatud mudel, taustaks teostusjoonis

Tabel 3. Greideriga mõõdetud kõrguste ja teostusjooniselt saadud kõrgused ja nende erinevused

Pikett	Teostusjoonise kõrgus	Greideriga mõõdetud kõrgus	Kõrguste vahe (m)
49+34	60.09	60.11	-0.02
50+00	60.13	60.14	-0.01
51+00	59.76	59.77	-0.01
52+00	59.53	59.56	-0.03
53+00	59.71	59.76	-0.05
54+00	60.23	60.26	-0.03
55+00	61.12	61.09	0.03
56+00	60.37	60.35	0.02
57+00	59.53	59.54	-0.01
58+00	59.57	59.55	0.02
59+00	59.57	59.55	0.02
60+00	59.37	59.35	0.02
61+00	59.36	59.35	0.01
62+00	59.13	59.13	0.00
63+00	59.61	59.63	-0.02
64+00	60.17	60.12	0.05
65+00	59.92	59.92	0.00
66+00	58.32	58.33	-0.01
67+00	57.83	57.84	-0.01
68+00	57.82	57.82	0.00
69+00	57.87	57.84	0.03
70+00	57.68	57.72	-0.04
71+00	57.66	57.63	0.03
72+00	57.65	57.62	0.03
73+00	57.68	57.66	0.02
74+00	57.84	57.82	0.02
75+00	58.43	58.41	0.02
76+00	58.50	58.50	0.00

Tabeli 3 kõrguste vahed ja nende esinemise arv on välja toodud eraldi tulpgraafikus (Joonis 7)



Joonis 7. Greideri mõõdetud kõrguste ja teostusjooniselt saadud kõrguste erinevused

Joonisel 7 on horisontaalsuunalisel teljel näidatud vea suurus ja vertikaaltelje peal selle vea esinemise arv.

Majandus- ja taristuministri määruses nr 34, vastu võetud 14.04.2016, ei ole eraldi välja toodud kahe erineva mõõdistuspunkti omavaheline lubatud suurim kõrguslik viga. § 8 Lg4 P1 järgi on maapealse situatsioonelemendi suurim lubatav kõrguslik viga lähimate mõõdistamisvõrgu punktide suhtes on püsiakatendi, kaevukaane, vundamendi sokli või sarnase rajatise puhul mõõtkavades 1:500 ja 1:1000 kolm sentimeetrit. Sellest punktist võib tuletada, et kui kummagi tabelis välja toodud kõrguse lubatud suurim viga lähima mõõdistamisvõrgu suhtes on kolm sentimeetrit, siis kahe mõõdistuspunkti omavaheline suurim lubatud kõrguslik viga on kuus sentimeetrit. Sellele tuginedes võib öelda, et greideriga teostatud kõrguslik mõõdistus vastab nõuetele. [6]

3.1.3 Logi failidest saadava punktipilve võrdlus teostusmõõdistusega

Tee-ehitusobjektide, kus oleks saanud samaaegselt võrrelda logifailide mudeleid ja teostusjooniseid, puudumise tõttu tuli vajalike andmete saamiseks läbi viia proovikaevamine. Kaevetööd ja mõõtmised vajalike andmete saamiseks toimusid 04.04.2024 Harjumaal Saue vallas Hüüru külas Angerja tee 59 kinnistul. Kaevetööd teostati THEK Tehnika OÜ miniekskavaatoriga, mis oli varustatud 3D masinjuhtimise süsteemiga. Asukoha määramiseks kasutati kahte GNSS antenni, GNSS baasjaamaks oli THEK Tehnika referentsjaamade võrgu jaam HUURU, asukohaga Harju maakonnas Hüüru külas Angerja tee 42 hoone katusel.

Esmalt mõõtis THEK Tehnika esindaja ekskavaatori kulbiga 4 maapinna punkti, mille vahele moodustati Leica MC1 programmis kraavi mudel pikkusega 10 m. Kraavi laius nõlvade ülemiste servade vahel oli kaks meetrit, nõlvad kaldega 45° ja 90°. Seejärel teostati mudeli järgi kaevetööd, väljakaevatud muld tõsteti kraavi kõrvale (Foto 8).



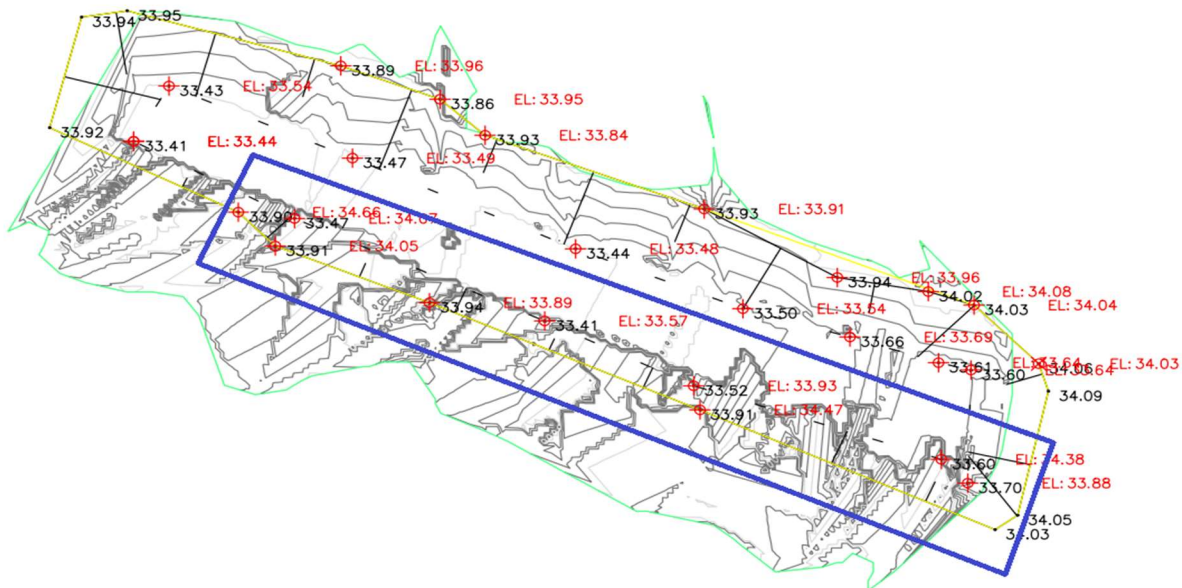
Foto 8. Proovikaevamine Angerja tee 59 kinnistul

Teostusmöödistamise läbiviimiseks mõõdeti THEK Tehnikale kuuluva Leica Roveriga kaks mõõdistusvõrgu punkti, mille vahe oli 218 m. Kumbki punkt mõõdeti kahekordse initsialiseerimisega 1-minutilise sessiooniga L-EST97 süsteemis koordinaadid ja EH2000 süsteemis kõrguse. Teostusmöödistus toimus Leica TS12 robot-elektrontahhümeetriga. Kahe

möödistusvõrgu punkti vahele orienteeriti instrument vaba jaama meetodil, mille sulgemisvead olid: $x=2\text{mm}$, $y=2\text{mm}$, $H=1\text{mm}$. Peale instrumendi orienteerimist tehti sellele kraavile teostusmöödistus, kraavi parameetrid määrati 30 möödistuspunktiga.

Kraavile tehtud teostusmöödistuse põhjal tehti AutoCAD Civil 3D 2025 programmiga pinnamudel. 3D masinjuhtimise süsteemi logifaili eksporditi Leica ConX keskkonnast LandXML formaadis, mille põhjal tehti AutoCAD Civil 3D 2025 programmiga väljakaeve mudel. Seejärel võrreldi neid mudeleid Civil 3D-s (Joonis 8). Kahe mudeli põhjade kõrgused ja nende vahed on kantud Tabelisse 4. Ainukene suurem anomaalia, erinevus kuni 68 cm, oli väljakaevatud mulla ladustamise poolses servas. Kõrguste erinevused on toodud Tabelis 4. Selle põhjuseks võib olla ekskavaatori kulbi liikumise salvestamine, kui toimus väljakaevatud mulla ladustamine kraavi kõrvale või peale ladustamist kulbi liikumine tagasi kaevikusse.

Kuna tekkisid eelnevalt mainitud anomaaliad 3D masinjuhtimise süsteemi väljakaeve mudelis, siis ei saanud planeeritud väljakaeve mahtude võrdlust läbi viia.



Joonis 8. Väljakaeve mudeli ja teostusjoonise võrdlus

Joonisel 8 on roelise joonega piiritletud 3D ekskavaatori logi failist saadud mudeli piirjoon pealtvaates, kollane joon on väljakaeva mudeli teostusmöödistuse piirjoon. Mustad numbrid on väljakaeve teostusjoonise kõrgused, punased numbrid on logifaili mudeli kõrgused

teostusjoonise mõõdistuspunkti kohal. Hallid jooned on mudeli samakõrgusjooned. Sinise kastiga on tähistatud suuremate kõrguste erinevuste esinemise ala.

Tabel 4. Teostusmõdistuse kõrgused ning samas kohas võetud logifaili mudeli kõrgused ning nende kõrguste vahed

Teostusmõdistuse teel saadud kõrgused	Ekskavaatori logi failidest saadud kõrgused	Vahe
Väljakaeve ülemise serva kõrgused		
33.89	33.96	0.07
33.86	33.95	0.09
33.93	33.84	-0.09
33.93	33.91	-0.02
33.94	33.96	0.02
34.02	34.08	0.06
34.03	34.04	0.01
34.03	34.06	0.03
33.91	34.47	0.56
33.94	33.89	-0.05
33.91	34.05	0.14
33.90	34.66	0.76
Väljakaeve alumise serva kõrgused		
33.43	33.54	0.11
33.47	33.49	0.02
33.44	33.48	0.04
33.50	33.54	0.04
33.66	33.69	0.03
33.61	33.64	0.03
33.60	33.64	0.04
33.60	34.38	0.78
33.70	33.88	0.18
33.52	33.93	0.41
33.41	33.57	0.16
33.47	34.07	0.60
33.41	33.44	0.03

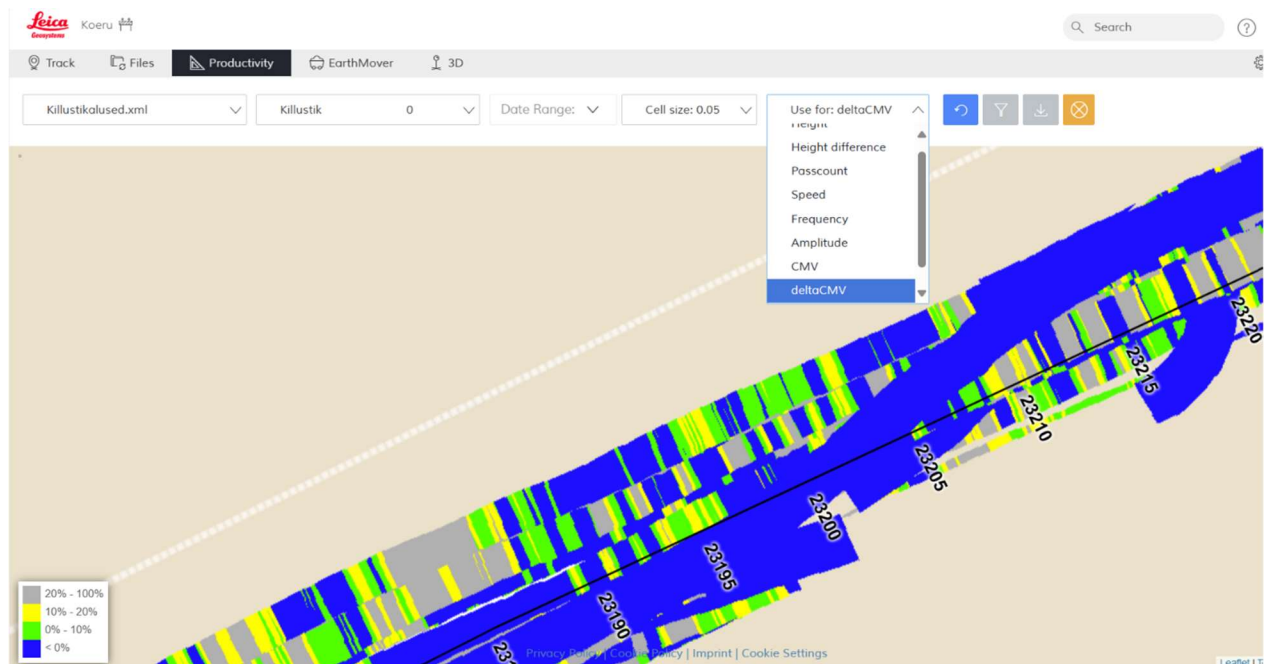
Tabelis 4 on erinevused üle 10 cm tähistatud värviga.

3.2 Täiendavad andmed

3.2.1 Teerull

Lisaks asukohaandmetele on võimalik teerulli puhul näha vibreerimise sagedust ja amplituuti, tiheduse mõõtjaga varustatud rulli puhul ka suhtelist tihedust ja suhtelise tiheduse erinevust võrreldes etteantuga (Joonis 9). ConX keskkonnas saab välja tuua ka teerulli tiheduse mõõtja poolt tuvastatud nõrgad kohad. Need andmed väljastatakse ka mudeli kujul. Andmete saamiseks tuleb eelnevalt masinale ette anda vajaliku läbikute arvu, vajaliku kiiruse, tiheduse mõõtja puhul vajaliku suhtelise tiheduse. [11]

Suhtelise tiheduse saab ümber arvutada ka tiheduseks (mPa), kuid selleks on vaja objekti põhist katselõiku karjääri materjalist. Tiheduse (mPa) saamiseks tuleb liiva või killustiku teerulliga tihendada ja seda tegevust tuleb jooksvalt jälgida pinnase elastsusmooduli testriga (Inspector, Loadman). Kui vajalik tihendus (mPa) on saavutatud, siis mõõdetud punkti tiheduse (mPa) ja suhtelise tiheduse erinevusest saab kätte vajaliku koefitsendi edasisteks tiheduse arvutusteks antud objektile.



Joonis 9. Mõõdetud tiheduse erinevus etteantud tihedusest

Kui killustiku tihendamisel teerulliga värvub kogu mudel ekraanil sinseks, on saavutatud sellel lõigul etteantud tihendus (Joonis 9).

3.2.2 3D mudelite tegemine

Lisaks eelnevale on Leica masinjuhtimistarkvaras MC1 võimalik teha ka lihtsamaid mudeleid ilma masinast lahkumata, mille alusel teostada kaevetöid. Selle jaoks on eelnevalt vaja looduses mõõdistada mõned punktid, mis jäävad tehtava mudeli aluseks. Nende punktide baasil saab tekitada n.ö. projektse mudeli. [11]

MC1 tarkvaraga saab luua järgmisi mudeleid: tasapinnaline mudel, kaldega mudel, tee mudel, pinnamudel, baasjoone mudel. [11]

Tasapinnaline mudel – programmis saab kas manuaalselt või tööseadmega mõõdistades paika panna mingi kindla kõrguse ja teha kaevetöid selle kõrguse järgi. [11]

Kaldega mudel – etteantud kalde järgi kaevamine. Kallet saab määrata kas manuaalselt protsentidega või mõõdistades kaks punkti tööseadmega. Kallet saab määrata kas piki masina telge, rist masina teljega või mingi nurga all masina suhtes. [11]

Tee mudeli moodustamiseks on vaja kas etteantud tee telgjoont või tee telje punktide mõõdistamist tööseadmega looduses. Tee käänupunktide vahele tuleb määrata tee telgjoone pikikalle. Seejärel saab moodustama hakata tulevase tee ristprofiili – paika panna tee elementide põikikalde ja kaugused tee telje suhtes. [11]

Pinnamudeli moodustamiseks on vaja minimaalselt kolme punkti. Nendeks sobivad kas salvestatud punktid või tööseadmega mõõdetud punktid. Pinnamudel moodustatakse valitud punktide vahele. [11]

Baasjoone mudel on kolmemõõtmeline joon punktide vahel. Punkte saab kas mõõdistada tööseadmega looduses või valida varem salvestatud punktidest. Nende punktide vahele moodustatakse jooned, millele saab määrata pikikallet ja lisada käänupunkte. [11]

4 SAADUD ANDMETE KASUTAMISE VÕIMALUSED

Selles peatükis kirjeldatakse lühidalt majandus- ja taristuministri määrust nr 101, "Tee ehitamise kvaliteedi nõuded" ja Transpordiameti poolt kehtestatud tööde vastuvõtmise korda. Kohalikel omavalitsustel on õigus omalt poolt kehtestada täiendavaid nõudeid ja eeskirju, mida selle lõputöö raames ei uurita.

3D masinjuhtimise süsteemidest saadavaid andmeid saaks kasutada kahel viisil – kvaliteedi kontroll ehitustööde ajal ning konstruktsioonikihtide üleandmisel tellijale.

Majandus- ja taristuministri määrusega nr 101, "Tee ehitamise kvaliteedi nõuded", kehtestatakse kvaliteedinõuded teeliikide järgi. Kruuskattega tee puhul kontrollitakse erinevusi projekti suhtes iga 100m tagant järgmistel parameetritel: põikkalle, tee telje kõrguse erinevus, piki- ja põikitasasus, elastsusmoodul. Asfaltbetoon- ja mustkattega tee puhul kontrollitakse erinevusi projekti suhtes iga 25m tagant järgmistel parameetritel: põikkalle, tee telje kõrgus, katte serva kaugus teljest. 3D masinjuhtimise süsteemidest saadavatest andmetest on võimalik kontrollida eelpool kirjeldatud parameetreid terve tee ulatuses, mitte etteantud intervalliga. [12]

Majandus- ja taristuministri määrus nr 101, "Tee ehitamise kvaliteedi nõuded", määrab kvaliteedinõuded ka töö liikide järgi. Ettevalmistustöödel tuleb jälgida mulde aluspinnase tihendustegurit ja pealispinna kõrgusarvude lubatud hälvet. Tee muldkeha pinnase tihedust kontrollitakse tihendatavate kihtide kaupa ristlõike kolmes punktis, muldkehal kõrgusega kuni 3 meetrit iga 100 meetri järel ja muldkehal kõrgusega üle 3 meetri iga 50 meetri järel. Muldkeha ristprofiilis kontrollitakse iga 25 meetri järel telje kõrguse vastavust projektile, laiust ja paiknemist tee telje suhtes, põikkaldeid, nõlvsust. Dreenihi tihedust kontrollitakse tihendatavate kihtide kaupa ristlõike kolmes punktis iga 50 meetri järel. Dreenihi ristprofiilis kontrollitakse iga 25 meetri järel telje kõrguse vastavust projektile, laiust ja paiknemist tee telje suhtes, põikkaldeid, nõlvsust. Killustikaluse tihedust kontrollitakse tihendatavate kihtide kaupa ristlõike kolmes punktis vähemalt iga 100 meetri järel. Killustikaluse ristprofiilis kontrollitakse iga 25 meetri järel telje kõrguse vastavust projektile, aluse serva kaugust tee teljest, põikkallet, kihi paksust. Stabiliseeritud kihtide elastsusmoodulit kontrollitakse ristlõike kolmes punktis iga 250 meetri järel. Stabiliseeritud kihi ristprofiilis kontrollitakse iga 25 meetri järel kihi kõrguse vastavust projektile, laiust, tasasust, põikkallet. Kihi paksust mõõdetakse iga 50-100 meetri tagant. 3D masinjuhtimise süsteemidest saadavatest andmetest on

võimalik kontrollida eelpool kirjeldatud parameetreid terve tee ulatuses, mitte etteantud intervalliga. [12]

Transpordiameti poolt koostatud tabelis "Enimlevinud kontrolli ja vastuvõtutoimingute loetelu" leiab 47 üksikut toimingut, mille puhul geodeedi mõõdistuse, 3m kaldelatiga mõõtmise või pinnase elastsusmooduli testeriga mõõtmise saaks asendada 3D masinjuhtimise süsteemidest saadavate andmetega.

Transpordiameti poolt koostatud "Riigiteede ehitustööde vastuvõtu eeskiri" punkt 2.1 ütleb, et kõigi kaetud ja teostatud tööde kohta tuleb koostada akt. Punkt 2.2 järgi tuleb aktide juurde lisada muuhulgas ka teostusjoonis 2D vaates iga üleantava konstruktsioonikihi kohta ning elastsusmooduli mõõtmise protokollid. Punkt 2.3 järgi ei tohi enne teostusjooniste ja aktide esitamist töödega jätkata. Punkt 2.17 lubab 2D teostusjoonise asemel laadida teostusmõõdistuse teel saadud 3D info BIM keskkonda. Kaetud ja teostatud tööde aktide esitamise protsessi saaks kiirendada, kui konstruktsioonikihtide teostusjooniste ja elastsusmooduli mõõtmiste aktide asemel saaks kasutada 3D masinjuhtimise süsteemidest saadavat infot. [13]

Rene Reile lõputöös "Põhimaantee ehituse töökorralduse projekt" on ühe lisana välja toodud tehtavate tööde kalendergraafik (Lisa 1). Tema töös kirjeldatud objekti pikkuseks on planeeritud 172 tööpäeva. Selles graafikus on eraldi reana välja toodud, et 6,4 km pikkuse 1+1 maantee ümberehitamisel 2+1 maanteeks on geodeedi vajadus objektil 36 päeva koos ettevalmistusega (mõõdistusvõrgu punktid, piketaaži märkimine, GNSS baasjaam). Kui lahendada kogu ehitus 3D masinjuhtimise süsteemiga varustatud tehnikaga ja sellest saadavate andmetega, kaoks vajadus ehitusaegse märkimise ja kontrollmõõdistuse järgi. Geodeedi vajadus objektil kahaneks 36-st päevast ca kaheksa päevani. Need päevad jaotuvad objekti ettevalmistamiseks (mõõdistusvõrgu punktid, piketaaž, GNSS baasjaam) ja ehitusjärgseks teostusmõõdistuseks. Võit oleks 28 geodeedi tööpäeva. Kui arvestada geodeedi tööpäeva hinnaks 400 EUR+KM, oleks rahaline võit selle pealt 11`200 EUR+KM. Lisaks vähemalt 1 päev ooteaega konstruktsioonikihi kohta teostusjooniste kättesaamiseks geodeedilt ja üleandmiseks järelevalve insenerile kaetud tööde vastuvõtmiseks. [15]

3D masinjuhtimise süsteemidest saadavate ruumiliste andmete kasutamisel tuleb silmas pidada asjaolu, et need andmed tekitatakse tööseadme asukoha järgi, mitte ei ole tehtud töö tulemust iseloomustavad andmed. Teetööde üldine geomeetria tuleb välja, kuid üksikud ebatasasused ei pruugi avalduda. Näiteks kui greideriga parandada kruusateed, siis tee üldine geomeetria on võimalik andmetest kätte saada, kuid näiteks üksik läbivajunud truubikoht ei

pruugi avalduda. Teerulliga konstruktsioonikihi tihendamisel ei ole 3D masinjuhtimise süsteemi andmetes näha valtsi kõrvale tekkivaid vaalusid, mis mõjutavad konstruktsioonikihi ebatasasust.

KOKKUVÕTE

Töö esimeses osas kirjeldati erinevate masinkontrolli ja masinjuhtimise süsteemide tööpõhimõtet ning toodi välja nende kasutuse võimalusi.

Töö teine osa keskendus 3D masinjuhtimise süsteemi erinevatele komponentidele ja pööras tähelepanu töö kvaliteeti mõjutavatele nüanssidele.

Kolmandas osas kirjeldati, milliseid andmeid on võimalik 3D masinjuhtimise süsteemist saada. Selles osas toimus ka erinevate ruumiliste andmete võrdlus geodeetiliste mõõdistustega. 3D masinjuhtimise süsteemidest saadavate üksikpunkti täpsus mõõdistusvõrgu punkti suhtes vastas Majandus- ja taristuministri määruses nr 34, vastu võetud 14.04.2016, kehtestatud täpsusnõuetele. 3D masinjuhtimise süsteemi abil mõõdetud üksikpunktide võrdlus teostusmõõdistusega andis lõputöö autori hinnangul positiivse tulemuse – enamus kõrguste erinevusi oli 2-3 cm sees. Logifailidest saadava punktipilve võrdluses teostusmõõdistusega tekkis punktipilves anomaalia, mida saab seletada väljakaevatava pinnase tõstmisega kraavi kõrvale. Seda probleemi saaks edaspidi vältida kas logifaili salvestatava ruumi vähendamisega või tuleks jälgida ekskavaatori tööd.

Neljandas osas kirjeldati lühidalt Majandus- ja taristuministri poolt vastu võetud määrust nr 101, "Tee ehitamise kvaliteedi nõuded" ja Transpordiameti poolt kehtestatud tööde vastuvõtmise korda ja milliseid protsesse saaks kiirendada, kui kasutada 3D masinjuhtimise süsteemidest saadavaid andmeid. Ühe kalendergraafiku näitel toodi välja ka ajaline ja rahaline võit geodeedi töömahu vähendamise arvelt. Toodi välja ka mõned puudused nende andmete kasutamise juures.

3D masinjuhtimise süsteemidest saadavad andmed on piisavalt kvaliteetsed, et neid saaks kasutada ehitusaegses ja ehitusjärgses kvaliteedikontrollis ilma täiendavate tegevusteta, näiteks geodeedi väljakutsumine kontrollmõõdistuste tegemiseks või pinnasetiheduse ja elastsusmooduli mõõtmine testeriga. Lisaks on võimalik mehhanismi tehtud tööd jälgida ajaliselt 5 minuti täpsusega. 3D masinjuhtimise süsteemist saadavaid andmeid saaks kasutada ka tee konstruktsiooni kihtide üleandmisel, kuid hetkel takistab seda juriidika.

SUMMARY

The title of this thesis is "Analysis of Data From 3D Machine Control Systems".

Progressive automation of processes is a key trend in today's fast-moving world. The benefits are numerous - reduced labour expense and less reliance on a diminishing pool of qualified personnel who still need induction; improved quality of work due to elimination of human error in automated processes; improved efficiency; and more consistent output.

Since the emergence of rotary laser machine control systems in the 1960s, huge strides have been made in the field. Most importantly, the GNSS system was made publicly available in the 1990s and began to be used in machine control systems. The earthmoving machines of today have fully automated implement control, with the operator left in charge of driving the machine. [1]

A 3D machine control system is an integrated set of equipment. It includes either a robotic total station with prisms, or a GNSS base station and GNSS receiver(s) on the earthmoving machine; a control computer in the cab; and sensors and actuators for controlling hydraulics. A robotic total station or GNSS receiver provides the control computer with location information; this and the 3D design and model provide the machine and the driver with information for making passes, and the sensors and actuators enable the machine or operator to guide the implement to the correct location/height to execute the design.

Spatial information is passed from the total station or GNSS receiver to the control computer and used to guide the implement. However, the latest 3D machine control systems used in earthmoving equipment also enable recording of work. For example, if a 3D machine control system-equipped excavator is used, a 3D model of the actual excavation may be reconstructed after completion of work, using just the bucket movement information recorded. Similarly, immediately after roller-compacting a road base, information can be collected about the spatial location of the layer, and its location and elevation can be verified against the underlying design, without waiting for a surveyor to complete an as-built drawing.

When verified against the geodesic grid, the accuracy of individual data points received from 3D machine control systems was compliant with the accuracy requirements set forth in the 14.04.2016 Regulation No. 34 of the Minister of Economics and Infrastructure. In the opinion of the author of this thesis, individual points measured by the 3D machine control system were in good agreement with the as-built drawing, with most elevation differences between

2-3 cm. Comparison of the logged point cloud with the as-built drawing did exhibit an anomaly due to the placing of removed soil next to the excavation. In the future, this issue may be avoided either by limiting the spatial volume subject to logging, or by monitoring of excavator operations.

The quality of data provided by 3D machine control systems is sufficient for use in intra- and post-work quality control without any need for additional activities, such as engaging a surveyor for verification measurements, or measuring the soil modulus of elasticity using testing equipment. Furthermore, work performed by the machine can be reproduced with an accuracy of 5 minutes. While the data provided by 3D machine control systems could be used for final handover of road construction layers, current legislation does not allow this.

VIIDATUD ALLIKAD

- [1] A. Brown, "A History of Machine Control". 2023. [Võrgumaterjal]. Available: www.constructionbriefing.com. [Kasutatud 02. märts 2024]
- [2] K. Nõmm, "3D tehnoloogial põhinev automaatne masinkontroll teedehituses ja selle rakendamine". Tallinn 2015. [Võrgumaterjal]. [Kasutatud 09. veebruar 2024]
- [3] Tiger Supplies, <https://tigersupplies.com/collections/construction-lasers-machine-control-receivers>. [Võrgumaterjal]. [Kasutatud 12. märts 2024]
- [4] SITECH Gulf, <https://www.sitechgulf.com/products/2d-machine-control/2d-machine-control/>. [Võrgumaterjal]. [Kasutatud 24. märts 2024]
- [5] Leica Geosystems machine control. [Võrgumaterjal] Available: www.youtube.com. [Kasutatud 24. märts 2024]
- [6] "Topo-geodeetilisele uuringule ja teostusmöödistusele esitatavad nõuded", Riigi Teataja, vastu võetud 14.04.2016 nr 34. Available: <https://www.riigiteataja.ee/akt/119042016003>. [Kasutatud 18. märts 2024]
- [7] SITECH Gulf, <https://www.sitech.fi/solutions/machine-control-systems-2/grade-control-for-dozers>. [Võrgumaterjal]. [Kasutatud 01. aprill 2024]
- [8] Artu Ellmann, Tarmo Kall, Karin Kollo, Aive Liibusk, GNSS – GLOBAALNE SATELLIITNAVIGATSIOONISÜSTEEM GEODEETILISE TÄPSUSEGA ASUKOHAMÄÄRANGUKS, Tartu 2022. [Võrguväljaanne]. [Kasutatud 05. aprill 2024]
- [9] Toomas Orason, KÕRGUSLIKU TÄPSUSE SUURENDAMINE RTK RAKENDUSTES MILLIMEETER GPS ABIL, Tartu 2016. [Võrguväljaanne]. [Kasutatud 07. aprill 2024]
- [10] Baltem OÜ, <https://www.baltem.ee/millimeter-gps-grader>. [Võrguväljaanne]. [Kasutatud 10. aprill 2024]
- [11] Leica MC1 machine control software kasutusjuhend. [Võrguväljaanne]. [Kasutatud 14. aprill 2024]

[12] "Tee ehitamise kvaliteedi nõuded", Riigi Teataja, vastu võetud 03.08.2015 nr 101, Available: <https://www.riigiteataja.ee/akt/120112020003?leiaKehtiv> [Kasutatud 28. aprill 2024]

[13] "Riigiteede ehitustööde vastuvõtueeskiri", Transpordiamet 2021.a. Available: https://transpordiamet.ee/sites/default/files/documents/2022-11/Riigiteede%20ehitustööde_vastuvõtueeskiri_2021_0.pdf [Kasutatud 29. aprill 2024.a.]

[14] The Construction Index, <https://www.theconstructionindex.co.uk/the-digger-blog/view/liebherr-expands-machine-control-offering-for-crawler-excavators>. [Võrgumaterjal]. [Kasutatud 25. märts 2024]

[15] Rene Reile, "Põhimaantee ehituse töökorralduse projekt", Tallinn 2023.a. [Võrgumaterjal]. [Kasutatud 01. mai 2024.a.]

Lisa 1. Kalendergraafik

