



TALLINNA TEHNIKAKÕRGKOO

Vello Kima

**TALLINNA LAULULAVA
KÕLAEKRAANI
DEFORMATSIOONIDE UURIMINE
MAAPEALSE
LASERSKANEERIMISE
TEHNOLOOGIA ABIL**

LÕPUTÖÖ

Ehitusteaduskond
Rakendusgeodeesia eriala

Tallinn 2013

Tõendan, et lõputöö on minu, Vello Kima kirjutatud. Töö koostamisel kasutatud teiste autorite, sh juhendaja loome- ja teadustööde seisukohad on viidatud.

Lõputöö koostamine, kaitsmine ja selles sisalduv informatsioon on *prima facie* õppeotstarbeline ja töö on kaitstud autoriõiguse seadusega, mille kohaselt on autoril töö suhtes mittevaralised õigused. Juhul, kui seda lõputööd kasutatakse muudel põhjustel kui reprodutseerimine õppe- ja teaduslikel eesmärkidel, mis ei ole ajendatud ärilistest huvidest, siis laienevad lõputöö autorile lisaks mittevaralistele õigustele ka varalised õigused.

Lõputöö autor: Vello Kima
(allkiri ja kuupäev)

Üliõpilase kood

Õpperühm

Lõputöö vastab ülesandele ja kehtivatele nõuetele.

Juhendaja: Tarvo Mill
(allkiri ja kuupäev)

Kaitmisele lubatud “.....” 20....a

Ehitusteaduskonna dekaan

Jüri Tamm
(allkiri)

SISUKORD

Sissejuhatus	5
1. Kaabelkonstruktsioonid.....	7
1.1. Kasutatavad trossid ja ühendused.....	7
1.2. Tallinna Laululava üldkirjeldus.....	8
1.3. Kõlaekraani detailne kirjeldus	9
2. Terrestriline laserskaneerimine	10
2.1. Terrestrilise laserskaneerimise rakendusala	10
2.2. Laserskannerite tüübid.....	11
2.3. Laserskaneerimise vead ja täpsus	12
3. Mõõdistuskäikude tasandamise meetodid.....	14
3.1. Transiti reegel	14
3.2. Bowditchi meetod.....	14
3.3. Crandalli meetod.....	15
3.4. Vähimruutude meetod	15
3.5. Täpsusnõuded plaanilisele ja kõrguslikule võrgule.....	16
4. Kasutatud instrumendid.....	17
4.1. Elektrontahhümeeter Trimble M3	17
4.2. Digitaalnivelliir Leica Sprinter 100 Series	18
4.3. Leica ScanStation C10.....	18
5. Mõõdistuspõhine käikude projekteerimine	19
5.1. Objektil olukorraga tutvumine.....	19
5.2. Tahhümeetrilise käigu rajamine	20
5.3. Nivelleerimiskäigu rajamine.....	23

6.	Laululava kõlaekraani laserskaneerimine	25
6.1.	Esimene skaneerimise etapp.....	25
6.2.	Teine skaneerimise etapp.....	27
6.3.	Kolmas skaneerimise etapp	28
6.4.	Lume koguse mõõdistus	29
7.	Skaneeritud andmete töötlus	30
7.1.	Sügisese skaneerimise andmete töötlemine.....	30
7.2.	Talvise skaneerimise andmete töötlemine	32
7.3.	Kevadise skaneerimise andmete töötlemine.....	32
7.3.1.	Lume kogusest ekraanil.....	33
7.4.	Konstruksiooni deformatsioonide võrdlus	34
7.5.	Pinnamudelite lõike 1 analüüs	36
7.6.	Pinnamudelite lõike 2 analüüs	37
7.7.	Pinnamudelite lõike 3 analüüs	38
7.8.	Lõigete võrdlus	39
	Kokkuvõte	40
	Summary	41
	Viidatud allikate loetelu	42
	Lisa 1. Kindelpunktide asukoha skeemid [26]	45
	Lisa 2. Reeperi asukohaskeem [26].....	46
	Lisa 3. Nivelleerimiskäigu tabel.....	47
	Lisa 4. Sügisese skaneerimise jaamade asukohad vastavalt kõlaekraani all ja –peal [27].....	48
	Lisa 5. Lumega skaneerimise jaamade asukohad vastavalt kõlaekraani all ja –peal [27]	49
	Lisa 6. Kevadise skaneerimise jaamade asukohad kõlaekraani all [27]	50

SISSEJUHATUS

Käesolevas uurimustöös on uuritavaks objektiks Tallinna Lauluväljaku kõlaekraan. Tegemist on unikaalse kaabel-tross konstruktsiooniga, mis andis töö tegijale võimaluse lähemalt uurida rahvuslikus ja ka ehituslikus mõistes sedavõrd tähtsat objekti ning tutvuda selle ajaloo ning tähtsusega. Uurimise alla võeti staatilise lumekoormise mõju kõlaekraani konstruktsioonile. See tähendas lumest tingitud deformatsioonide mõõdistamist kõlaekraani alumisel ja ülemisel konstruktsioonilisel osal. Selleks hinnati järeltöötuse käigus kõlaekraani kandva konstruktsiooni ehk trosside ning katuse toekaare vajumist kõlaekraanile kogunenud lume koormise tõttu. Lisaks uuriti võimalike jääkdeformatsioonide olemasolu pärast lume sulamist kevadel.

Lumekoguse võimalikult täpseks hindamiseks ja deformatsioonide uurimiseks kasutati peaaesjalikult laserskaneerimise tehnoloogiat. Hinnatakse selle tehnoloogia abil saadud tulemusi, otstarbekust. Selleks teostati kaks mõõdistust võimalikult tuulevaikse ja sademeteta lauspilvise ilmaga, esimene neist sügisel enne lumekatet ning teine talvisel perioodil rohke lumekattega olukorras pärast nädalast sulaperioodi, mille tõttu oleks lumekate tihedam ja märjast sadanud lumest tingituna raskem, mistõttu eeldatatakse tulemuste ilmekamat väljapaistmist.

Mõõdistused laserskanneriga tuginesid eelnevalt rajatud tahhümeetriakäigule, mis toetus kolmele polügonomeetriapunktile. Õiges koordinaatsüsteemis teostatud uurimustöö võimaldab vajadusel saadud punktipilvi kasutada lauluväljaku laululava ja kõlaekraani ning nende konstruktsiooni elementide modelleerimiseks ning annab võimaluse võrrelda andmeid teiste sarnase suunitlusega töödega. Projekteeritud käigu punktid olid kindlustatud asfaltisse betooni naeltega ja markeeritud. Käigu osa, mis kulges ümber laululava kõlaekraani oli täiendatud kõrguslikult tehnilise nivelleerimise käiguga lähedalasuvalt kõrgusreeperilt. Ühtse kõrgusvõrgu loomine oli vajalik erineval ajal teostatud skaneerimise tulemuste võrdlemiseks ja õigete deformatsiooni andmete analüüsiks.

Töö sisuline osa koosneb teoreetilisest taustast, mis puudutab otseselt tross-kaabel konstruktsioonide põhimõtteid ning valitud objekti kirjeldusest. Teoreetilise osa teine peatükk tutvustab maapealset laserskaneerimist ning tutvustab selle rakendusi ja avab ka teoreetilist tausta. Kolmas osa tutvustab tahhümeetriliste mõõdistamisvõrkude tasandamist ning tutvustab mõningaid töös kasutatud meetodeid. Lisaks antakse lühiülevaade töös kasutatud instrumentidest ja nende tehnilistest andmetest.

Praktilises osas kirjeldatakse mõõdistuskäigu projekteerimise protsessi ja kirjeldatakse olukorda enne mõõdistusprotsessi. Antakse detailne kirjeldus tahhümeetrilise käigu rajamise protsessi kohta ning tuuakse välja käigu tulemused ja tutvustatakse plaani alusel käiku. Samaselt tahhümeetriakäigule, kirjeldatakse nivelleerimiskäigu rajamise tööprotsessi ja tutvustatakse tulemusi. Antakse detailne kirjeldus laserskaneerimise protsessist ja erinevatest mõõdistamise etappidest, tekkinud probleemidest ja orienteerimise täpsusest. Täiendavalt kirjeldatakse ka lume koguse mõõdistust ja lume kaalu proovi võtmist. Järgnevas osas kirjeldatakse skaneerimisprotsessist saadud andmete töötlus, sellega seonduvaid probleeme ja leitud lahendusi ning kirjeldatakse lume kaalu saamise protsessi. Järgneva alapeatüki raames võrreldakse saadud tulemusi graafikute ja jooniste abil ja antakse ülevaade lume raskusest ja paiknemisest tingitud deformatsioonidest kõlaekraanil.

Töö lõpuosas võetakse kokku eesmärgid ja tulemused ning antakse hinnang tehtud tööle.

Töö teostamise käigus ilmnes, et eestikeelseid materjale laserskaneerimise kohta leidub väga vähe ning praktiliselt kõigis laserskaneerimise teooriat käsitlevates punktides tuli tugineda võõrkeelsetele allikatele. See omakorda vajab sügavuti tutvumist ingliskeelsete spetsiifiliste erialaste terminitega, mida kohati oli keerukas eesti kirjakeelde tõlkida.

Tunnustatakse uurimustöö juhendajat Tarvo Milli, kelle abi ja nõuga antud töö valmis ning tänuavaldused ka Tallinna Lauluväljaku haldusjuhile Taivo Saule, tänu kellele oli võimalik lauluväljaku territooriumil teostada mõõtmisi ning kellelt sai loa kasutada lauluväljaku territooriumi kohta tehtud geoalust alusfailina antud uurimustöös. Lisaks tunnustaks Dan Alperteni ingliskeelse ülevaate grammatilise kontrolli eest.

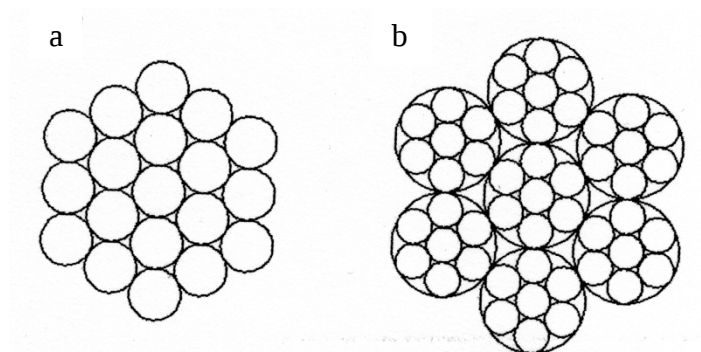
1. KAABELKONSTRUKTSIOONID

Kuigi kaabel-tross konstruktsiooniga sildade esimesed katsetused ulatuvad juba 17. sajandi algusesse[1], siis katuse kandva konstruktsioonina on trosse hakatud kasutama alles 1950-datest aastatest. Mõned esimesed katsetused seda teha on viia sildadelt tuntud põhikonstruktsioonid üle hoonetele katuste toetamiseks. Ühe variandina on katuse kuju, äärtest toetavate trossidega, silindrilise põhiplaaniga katuse puhul kas kumer või nõgus, viimasel juhul on eraldi vaja luua vihmavee äravoolu süsteemid. Paljudel trosskonstruktsiooniga ehitiste puhul kasutatakse kahte omavahel ühendatud kaldus kaart, millel on tavaliselt vastukaaluks massiivsed kannad.

Efektiivsemaks loetakse hüpari kujulisi tross-võrgustikke, mida hoiab üleval soovitud vertikaalsusega paraboolne torukujuline tugistruktuur. Üheks seda tüüpi ehitiseks on Tallinna Lauluväljaku kõlaekraan. [2; 12-14]

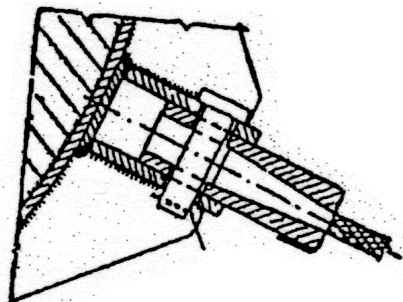
1.1. Kasutatavad trossid ja ühendid

Tavaliselt kasutatakse terastraadist põimitud trosse, kuigi rippsildade puhul on levinud ka paralleelsete trossikimpude kasutamine. Spiraalsed trossid punutakse 1,6-6 mm diameetriga terastraatidest ning vältimaks iseeneslikku trossi lahtitulemist, punutakse traadid vaheldumisi vasakule ja paremale. Konstruktsioonides kasutatakse ühekimbulisi spiraaltrosse (vt joonis 1, a), kuid suurema tugevuse saavutamiseks kasutatakse ka mitmest traadikimbust põimitud trosse, mis omakorda omavahel kokku põimitakse (vt joonis 1, b).



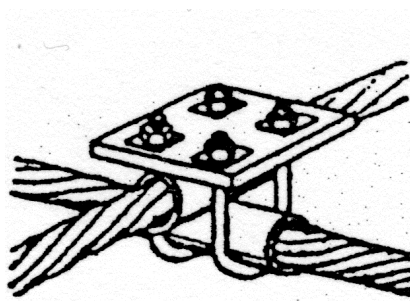
Joonis 1. Spiraalselt põimitud trosside ristlõiked [2; 14]

Trosside koostamisel võidakse kasutada kaitseta terastraate, kuid ilmastikukindluse tagamiseks kaetakse põimitud trossid mõne korrodeerumist takistava elemendiga, levinud on näiteks vase kasutamine.



Joonis 2. Trossi ankurdamine [2; 18]

Põimitud trosside otste kinnitamiseks kasutatakse ühe võimalusena näiteks trossi traatide kiilumist koonilisse või silindrikujulisse metallpea pessa. Trossi otsa ankurdamiseks tugistruktuuri külge, kasutatakse ühe lahendusena metallpea keevitamist ankrupea sisse. Mõningaid näiteid ankurdamisest (vt joonis 2) ja trosside omavahelisest ühendusest (vt joonis 3).



Joonis 3. Trosside ristühendus [2; 18]

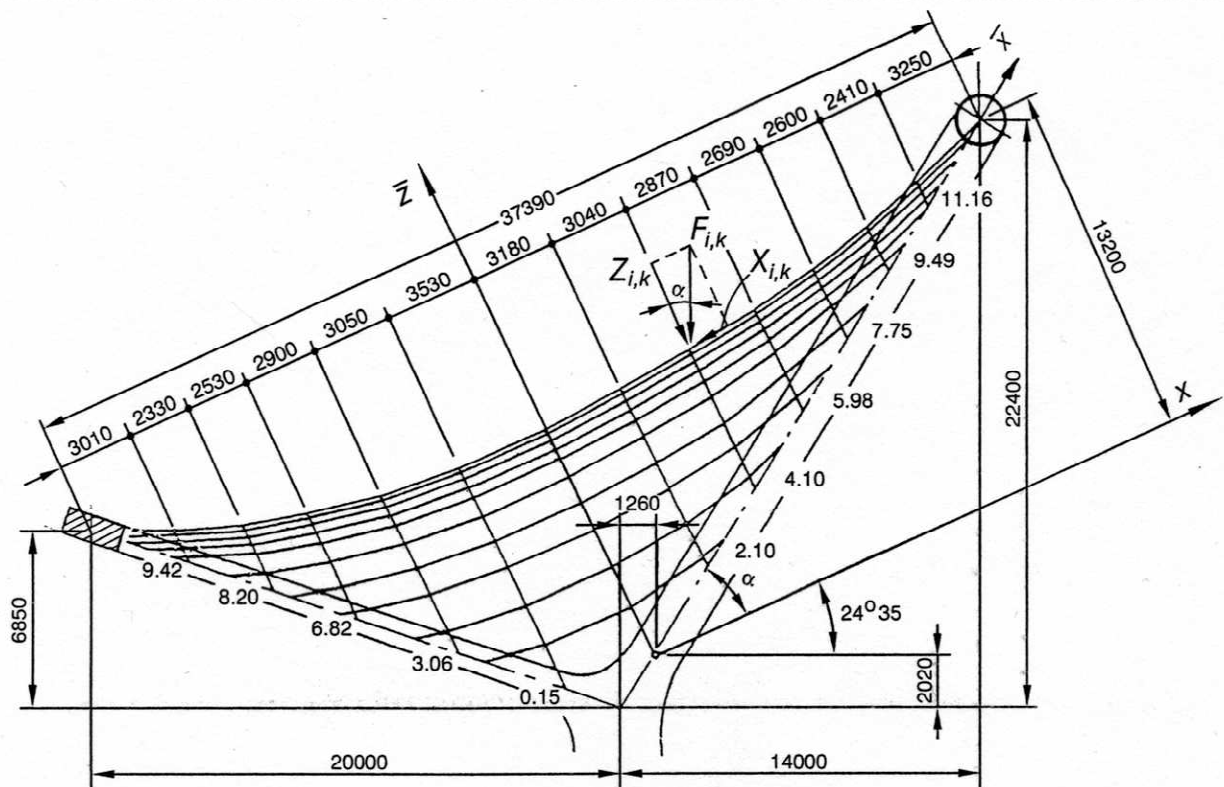
1.2. Tallinna Laululava üldkirjeldus

„Laululava arhitektuuri peaelemendiks on kahe kaare vahele tõmmatud hüpari kujuline varikatus. Tagumine betoonist kaar toetub postidele ja moodustab lava tagaseina. Lava kohale kaldu ulatuv terastorust esikaar on 73 m avaga ja keskelt 32 m kõrge ning toetub võimsatele kandadele. Kahe kaare vahelist nõgusapinnalist mitmes suunas kaarduvat katust kannab rippuv trossidest võrk, mille silmad on suurusega 3×3 m. Varikatuse sisepind toimibki akustilise ekraanina, tegelikult küll vaid kolme neljandiku ulatuses, sest ülemine osa ei mängi enam kaasa“ [3].

Suuremahuliste mullatöödega alustati projekteerimisetaipiga samaaegselt 1958. aastal, 1959. aastal rajati laululava vundamendid ja tribüüni osad ning kõlaekraan ehitati 1960. aasta esimeses pooles vahetult enne XV Üldlaulupidu. Ettenägematute ehituslik vigade tõttu polnud vastvalminud kõlaekraan siiski vihmakindel. [3]

1.3. Kõlaekraani detailne kirjeldus

Ekraan on negatiivse gaussi kõvera kujuline rippuv katus, mis on akustilistel eesmärkidel publiku poole kaldu. Ekraani pind koosneb laudisest, mis toetub eelpingutatud trosside võrgustikule. Trosside võrgustik omakorda on loodud kahe tasapinnalise kaare vahele. Tagumine kaar on tehtud tugevdatud raudbetoonist ning on horisondi suhtes 19 kraadise kalde all. Esimene kaar koosneb omavahel kokku keevitatud terastorudest, mis on osaliselt betooniga täidetud ja on horisondi suhtes 58 kraadise kalde all. Esimene kaar peab vastu pidama trossidele mõjuvat lume raskusele ja tuule jõududele. Tagumist kaart toetavad laululava tagaosas olevad vertikaalsed sambad ning mõlemat kaart toetavad külgedelt massiivsed kannad. Esimesel kaarel täiendavaid tugesid ei ole. Kasutatud trosside läbimõõt oli 38,5 mm ning jaotus vastavalt projektile (vt joonis 4). [2; 101-102, 106]



Joonis 4. Kõlaekraani projekteeritud kuju [2; 107]

2. TERRESTRILINE LASERSKANEERIMINE

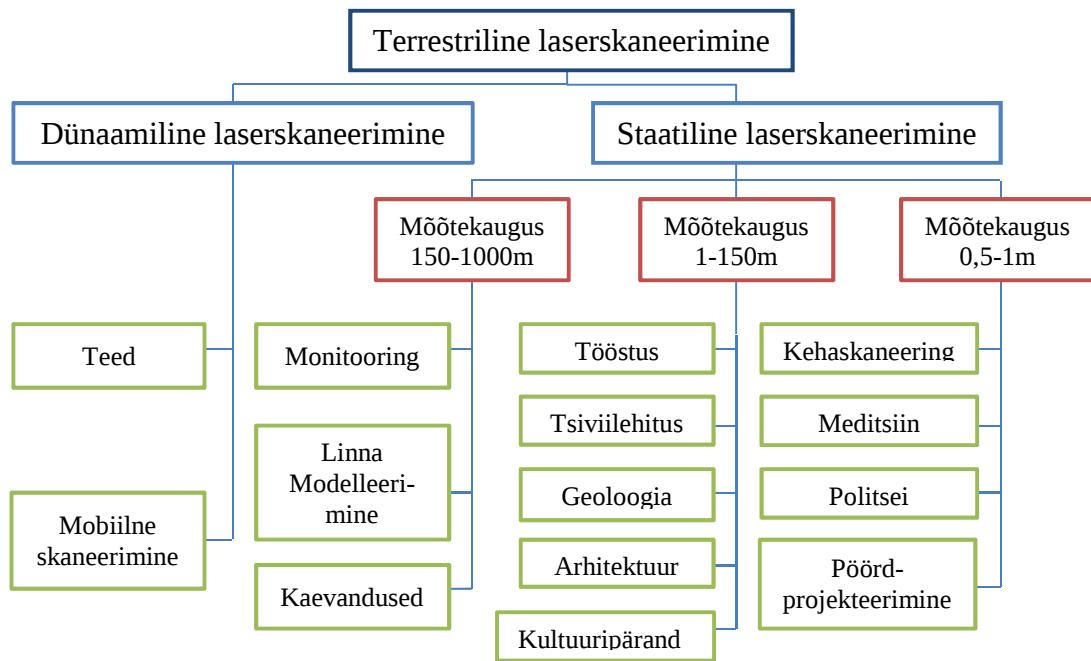
Laserskaneerimine on meetod, kus mõõdistatav pind skaneeritakse kasutades lasertehnoloogiaid. Seda tehes analüüsitakse reaalselt situatsiooni või objekti ning kogutakse informatsiooni selle füüsilise kuju ja võimalusel ka väljanägemise kohta, näiteks värv. Eeliseks on võime salvestada suurt hulka punkte (kümneid tuhandeid või rohkem) kõrge täpsuse (mõni mm kuni mõnikümmend cm) ning väikese ajakuluga (mõned minutid). [4; 12]

Praegused laserskaneerimise tehnoloogiad võib jagada kaheks: staatilised ja dünaamilised. Staatilised laserskannerid on mõõtmise ajaks fikseeritud ühele kohale, samas kui dünaamilise laserskaneerimise korral on instrument seatud mõnele liikuvale platvormile, näiteks autole või lennukile. [4; 12-13]

2.1. Terrestrilise laserskaneerimise rakendusala

Terrestrilised laserskannerid (TLS) on populaarne skanneritüüp, mis pakub kombineerituna laia ruumilist mõõteulatust kuni 360 kraadi horisontaalis ja samas kõrget mõõtetäpsust (mm kuni mõni cm). Aerolaserskaneerimise LIDAR süsteemid (näiteks skaneerimine lennukilt) annavad väga suure ulatuse, kuid madala täpsuse võrreldes TLS süsteemidega. Reaalne situatsioon visualiseeritakse 3D kujul mõõtes kaugusi objektini ruumiliste ristkoordinaatide süsteemis. [5; 389]

Terrestriline laserskaneerimine koos tehnoloogia arenguga võimaldas varasemate 2D plaanide asemel hakata tootma detailsemaid 3D mudeleid. Kasutusala hõlmavad suuremahuliste objektide nagu kaevanduste mõõdistamist, kui ka ülitäpsete skannerite kasutamist meditsiinis või kriminalistikas (vt joonis 5). [4; 13]



Joonis 5. Laserskaneerimise rakendusvaldkonnad [4; 13]

2.2. Laserskanerite tüübid

Laserskanerid jagunevad mõõtmismeetodi ja -tehnoloogia alusel passiiv- ja aktiivskanneriteks. Passiivskannerid mõõdavad vaid välise taustavalguse mõjul ümbritsevat keskkonda, enamasti kasutatakse ära olemasolevat nähtavat valgust, kuid vahel ka infravalgust. Sellised seadmed on võrdlemisi odavad ja ei vaja tihti palju rohkem kui vastavalt seadistatud või teatavate omadustega digitaalkaamerat. [4: 17]

Aktiivskannerid saadavad välja teatud tüüpi signaale, olgu see siis nähtav valgus, ultraheli või röntgenkiirgus ning kasutavad vastuvõtjat, et tagasipeegelduvaid signaale registreerida. Seetõttu on nad mehhaaniliselt keerukamad ja kallimad, kui passiivskannerid, kuid neil on ka suuri eeliseid passiivskannerite ees. [4: 18]

Aktiivskannerite eelisteks on, et nad [4; 18]:

- a) ei vaja taustakiirguse olemasolu, kiirgavad ise;
- b) on kasutatavad selgete kontuurideta pindadel;
- c) pakuvad kõrget mõõtetihedust ja täpsust võrreldes passiivskanneritega;
- d) suudavad salvestada punkte kiirelt (1000 - 500 000 punkti/s).

Aktiivskannerid on mõjutatavad välise tegurite poolt nagu peegelduvus, värv, ebatasasus. [4; 18]

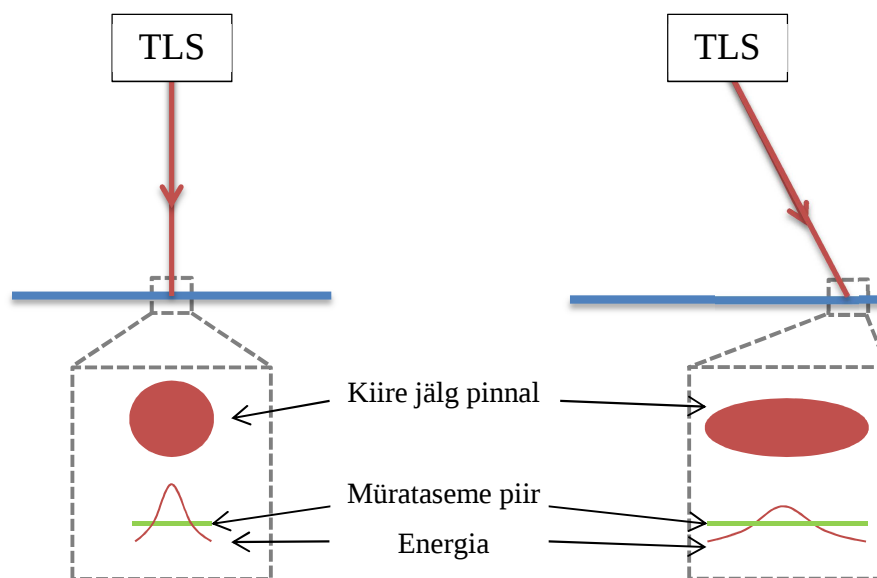
2.3. Laserskaneerimise vead ja täpsus

Nagu ka tahhümeeterilise mõõtmise korral tuleb arvestada ka laserskanneri puhul erinevate vigade allikatega. [5: 389]

1. Esimene faktor, mis mõjutab punktipilve täpsust on skanneri omadused. Sinna kuuluvad nii skanneri riistvaralised omadused kui ka tarkvaralised seaded. [5: 389]
2. Teine tulemusi mõjutav faktor on atmosfääri ja keskkonna olud. Sinna kuuluvad näiteks valgustatus, õhu niiskus, temperatuur ja õhurõhk. Tehakse vahet ka välis- ja sisekeskkonnal. [5: 389]
3. Kolmanda faktorina võetakse arvesse mõõdetava objekti enda omadusi nagu näiteks peegelduvus ja pinna struktuur. [5: 389]
4. Neljanda olulise faktorina võetakse arvesse TLS jaama asukoht ja mõõdistusnurk mõõdetava objekti suhtes. Viimast arvesse võttes ja arukalt jaamade asukohti projekteerides saab mõõdistaja oluliselt mõjutada mõõdistuse kvaliteeti. [5: 389]

Väga oluline faktor on laserkiire langemisnurk mõõdistatavale objektile. Kõige täpsema tulemuse saab, kui mõõdetav objekt on langeva laserkiirega risti, mistõttu jaotub energia laserkiire jäljes ühtlaselt ja tagasi instrumendi vastuvõtjasse peegeldub tugev signaal. Mida kaugemal on mõõdistatav objekt instrumendist, seda suurem on lasertäpi suurus objektil ja seda nõrgem signaal peegeldub vastuvõtjasse. Kiire langemisnurga kasvades laieneb laserkiir ja venib tema jälg objektile ellipsi kujuliseks ning mida suurem on nurk, seda väljavenitatum see jälg on ning seda hajutatam on laseri energiahulk pinnaühiku kohta. Seetõttu jõuab vastuvõtjasse tagasi vähem infot ning kasvab ka vea suurus. [5: 390-391]

Salvestatav punkt asub kas lähemal või kaugemal reaalsest objekti pinnast. Kauguse- ja langemisnurga suurenedes suureneb- ja venib ellipsikujuline laserijalg veelgi ning vastuvõtja ei pruugi liiga nõrka signaali salvestada, kuna see jääb nõrgemaks vastuvõtja müratasemest (vt joonis 6). [5: 390-391]



Joonis 6. Kiire peegeldumise geomeetria [4: 391]

Võttes aluseks Soudarissanane'i 2011 aasta katse [5], kus mõõdistati valget vineertahvlit erineva nurga alt ja distantsilt, leiti et 50m kaugusel peegeldusid tagasi 60 kraadise nurga all olevalt tahvlist vaid ääred ning tahvli tasapinnalt tagasipeegeldusi ei registreeritud ning punkte ei salvestatud. Mida suurem oli tahvli nurk, seda lühem pidi olema distants, millelt registreeriti tagasipeegeldusi ja salvestati punkte. Instrumendiks kasutati Leica HDS6000 faasinihke laserskanneri. [5: 394-395]

Antud eksperimendi alusel tuleks projekteerida laserskanneri jaamade asukohad mõõdistatava objekti ümber laserkiire kaldenurka arvestades. Kitsamates siseruumides, kus kaugused on väikesed, võib lubada ka suuremat nurka, sest energiahulk, mis vastuvõtjasse jõuab, on lühikestel kaugustel suurem. Siiski tuleks eeskätt siseruumide skaneerimisel seada instrument võimalikult ruumi keskele, et saavutada võimalikult ühtlane punktipilv, kus on miinimumi viidud suurest kaldenurgast tingitud vead. Lisaks mõjutab tulemusi ka mõõdistamise resolutsioon, mistõttu kaugemal ja suurema nurga all olevad objektid jäävad väikesema punktihedusega ning liialt lähedal asuvad objektid koormatakse tarbetult liigsete salvestatud punktidega üle.

3. MÕÕDISTUSKÄIKUDE TASANDAMISE MEETODID

Mõõdistuskäikude tasandamise eesmärgiks on mõõtmistulemustele parandite leidmine võimaldades kõrvaldada rajatud käigu sulgemisvead. Tasandamise meetod valitakse vastavalt geodeetilisele võrgule seatud täpsusklassist ja tüübist, kindelpunktide hulgast, tundmatute punktide hulgast ning mõõtmise meetodist.

Enne käigu tasandamist, võib olla 3 põhilist olukorda [6]:

- a) nurgaline täpsus on suurem kui jooneline täpsus;
- b) nurgaline täpsus on võrdne joonelise täpsusega;
- c) nurgaline täpsus on väikesem, kui jooneline täpsus.

Vastavalt sellele, mis olukorraga on tegu, tuleks valida ka vastav tasandusmeetod. Väidetavalt on viis põhi meetodit käikude tasandamiseks: Transiti reegel, Kompassi või Bowditchi meetod, Crandalli meetod ja vähimruutude meetod. [6]

3.1. Transiti reegel

Selle reegli alusel on x-telje parand proportsionaalne x-teljelise juurdekasvuga ja y-telje parand proportsionaalne y-telje juurdekasvuga. Väidetakse, et teoreetiliselt peaks seda reeglit kasutama käigu tasandamiseks juhul, kui nurgalised mõõtmistulemused on täpsemad, kui joonelised, kuid erinevate tulemuste tõttu kasutatakse seda reeglit harva. [6]

3.2. Bowditchi meetod

Üheks enimkasutatavaks meetodiks vigade tasandamisel on Kompassi reegel, mida kutsutakse ka Bowditchi meetodiks.

Kompassi reegel eeldab, et [7]:

- a) nurkadel ja kaugustel on sama vigade täpsus;
- b) vead on juhuslikud.

Selle meetodi alusel eeldatakse, et käigu joone vead suhtuvad proportsionaalselt $\sqrt{l}$, kus l on käigu joone pikkus ning vastavad nurgad suhtuvad pöördvõrdeliselt proportsionaalselt $\sqrt{l}$, kuigi viimast peetakse kasutatud allika väitel küsitavaks. Andes joonelistele ja nurgalistele mõõdistatud väärtustele võrdsed kaalud, siis vead ning ka parandid on proportsionaalsed käigu joone pikkustega. Seda meetodit kasutades moonutatakse enim mõõdetud nurgalisi väärtusi, seetõttu sobib antud meetod kõige paremini käigu jaoks, kus nurgad on tundlikumad vigade suhtes, kui jooned.

Parandid tuletatakse kasutades järgnevat valemit (1) [8, 202-203]

$$p_x = \frac{f_x \times l_i}{\Sigma l_i}, \quad (1)$$

kus	p_x	- x-telje parand;
	f_x	- x-teljeline sidumatus;
	l_i	- vastava käigujoone pikkus;
	Σl_i	- käigu joonepikkuste summa.

3.3. Crandalli meetod

Selle meetodit kasutades, eeldatakse et joonte mõõdistustel on suuremad juhuslikud vead, kui nurkadel. Alustuseks jaotatakse nurgaline sulgemisviga võrdselt nurkade vahel ära ja nurkade väärtused enam ei muutu. Seejärel saadakse parandid joontele, kasutades kaalutud keskmise arvutuskäiku. [6]

3.4. Vähimruutude meetod

Tegu on kõige mahukama ja arvutuste rohkema meetodiga, seega kasutatakse tihti seda meetodit rakendades arvutit. Vastavate kaalude rakendamisel saab arvesse võtta erinevusi joonte ja nurkade mõõtmise täpsuses. Tasanduse põhimõtte seisneb jääkide ruutude summa viimises miinimumini. Peale joonte ja nurkade tasandatud väärtuste leidmisele, saab leida uue joone pikkuse ja suuna. Suuna veerandid saadakse x- ja y-telje juurdekasvude märkidest. [6]

3.5. Täpsusnõuded plaanilisele ja kõrguslikule võrgule

Tahhümeetriakäigu rajamisel tuleks lähtuda Majandus- ja Kommunikatsiooniameti (MKM) Ehitusgeodeetiliste uurimustööde tegemise korrast [9] ja käigu tasandamisel tugineda järgnevale valemile (2)

$$\frac{f_s}{\sum l} = \frac{\sqrt{f_x^2 + f_y^2}}{\sum l} < \frac{1}{10\,000}, \quad (2)$$

kus f_s – käigu absoluutne jooneline sidumatus (sulgemisviga);

f_x – x-teljeline sidumatus;

f_y – y-teljeline sidumatus;

$\sum l$ – käigu joonepikkuste summa.

Kõrgusliku võrgu Tehnilise nivelleerimiskäigu tasandamisel tuleks samuti lähtuda MKM Ehitusgeodeetiliste uurimustööde tegemise korrast [9]. Selle alusel arvutatakse lubatud sulgemisviga järgneva valemiga (3)

$$f_{h\,lub} = \pm 50\,mm\sqrt{L}, \quad (3)$$

kus

L - käigu pikkus kilomeetrites.

4. KASUTATUD INSTRUMENDID

Tallinna Laululava kõlaekraani uurimisel kasutatavad instrumendid valiti vastavalt töö iseloomu ja reaalseid võimalusi arvestades.

4.1. Elektrontahhümeeter Trimble M3

Omadustelt on Trimble M3 kompaktne ja kerge tahhümeeter, koos välitarkvara Trimble Access ja üle 20 tunnise aku kestvusega [10].

Tabel 1

Trimble M3 tehnilised andmed [10]

Kauguste mõõtmise täpsus	$\pm (2+2 \text{ ppm} \times D) \text{ mm}$, kus D on kaugus.
Nurga mõõtmise täpsus vastab standardile DIN 18723 ¹ (hor. ja vert.)	1“, 2“/0,5 mgon; 3“/ 1,0 mgon, 5“/1,5 mgon
Kaal (ilma akuta)	3,9 kg
Töötemperatuuride vahemik	–20 °C kuni +50 °C
Tolmu- ja veekindlus	IP66

¹ DIN 18723 on täpsusstandard, mis seab üheselt mõistetavad nõuded instrumentidele. Selle alusel on võimalik saavutada instrumendi nurgamõõdu täpsus, mis antud juhul on 5'', tehes kaks täisvõtet. Ühe täisvõtte korral oleks nurgamõõdu täpsuseks 7''. Poolvõtte korral on maksimaalne täpsus 10'', kuhu lisandub veel pool kollimatsiooniviga. [11]

4.2. Digitaalnivelliir Leica Sprinter 100 Series

Leica Sprinter on elektrooniline ehitusnivelliir, kus latilugem saadakse automaatselt triipkoodiga nivelleerimislati pealt ning see välistab lati lugemisest tingitud vead.

Tabel 2

Leica Sprinter 100M tehnilised andmed [12]	
Mõõtekaugus	2 m - 80 m (0.5 m - optiliselt)
Ühe mõõtmise aeg	<3 sec
Kompensaatori töötamise piirkond	±10'
Mälu suurus	500 mõõdistamist
Kaitse	IP55
Toide	AA (4xLR6/AA/AM3 1.5V)

4.3. Leica ScanStation C10

Leica Scanstation C10² puhul on tegemist terrestrilise laserkskanneriga ehk maapealse staatilise skanneriga.

Tabel 3

Leica Scanstation C10 tehnilised andmed [13]	
Laseri tüüp ja lainepikkus	Impulsslaser, roheline – 523 nm
Maksimaalne mõõtekaugus	300m
Mõõtmiskiirus	Kuni 50 000 punkti sekundis
Skaneerimise ulatus	Horisontaalsuunas 360 kraadi Vertikaalsuunas 270 kraadi (pealt)
Ühe mõõtmise täpsus: 1 m – 50 m on 1 ς (sigma)	6 mm asendiline täpsus 4mm kaugusmõõdu täpsus
Lisad	Kahe teljeline kompensaator tagab z-telje suuna täpsuse

Vastavalt Sigma reeglile jääb 1 ς (sigma) korral 68,27% mõõtmistest lubatud väärtuse piiresse.

² Laserskanner Leica ScanStation C-10 ja litsentseeritud tarkvara Leica Cyclone on soetatud Eesti teaduse infrastruktuuride teekaardi objekti „Eesti Keskkonnaobservatoorium“ (finantseerimisallikas 3.2.0304.11-0395, projekt AR12019) poolt eraldatud vahenditest. Tehnoloogia juurutamisega seondub ka Euroopa Liidu struktuurivahendite programmi "Keskkonnakaitse ja -tehnoloogia teadus- ja arendustegevus (KESTA)" projekt ERMAS (Elurikkuse, mulla ja maapõue andmesüsteemide geoinformaatiline arendus, projekt AR12052).

5. MÕÕDISTUSPÕHINE KÄIKUDE PROJEKTEERIMINE

Mõõdistuspõhine käikude projekteerimine sai alguse objektiga tutvumisest, mille käigus selgitati esmalt välja reeperite olemasolu ja seisund. Selleks kasutati Maa-ameti Geoportaali Geodeetiliste punktide andmekogu ja kaardirakendust [14]. Samuti pandi paika üldine tahhümeetriakäigu skeem ümber kõlaekraani ja laserskaneerimise (edasipidi skaneerimise) jaamade asukohad. Esialgse kava kohaselt arvestati kolme skaneerimise jaamaga kõlaekraani all ja kolme jaamaga kõlaekraani peal. Instrumentideks valiti elektrontahhümeeter Tribble M3, digitaalnivelliir Leica Sprinter 100M ja laserskanner Leica Scanstation C10. Tahhümeetriakäik planeeriti teostada ühekordse täisvõttega kasutades nelja polügonomeetriapunkti ja kahte baasjoont.

5.1. Objektil olukorraga tutvumine

Välitööde alguses kontrolliti tahhümeetria käigu jaoks lähedalasuvate polügonomeetria punktide seisund ja leitavus ning arvestati nähtavusega käigu moodustamisel, mille alusel pandi järgnevalt paika käigupunktide ligikaudsed asukohad ja üldine skeem. Käik sooviti rajada Narva maantee kõrval asuvate polügonomeetria punktidega, kuid halb nähtavus ja käigu sulgemiseks vajaliku käigu pikkus oleks olnud ligikaudu 1,2 kilomeetrit, seetõttu valiti hea nähtavusega polügonomeetria punktid Pirita tee ääres, kusjuures käigu pikkuseks oli arvestatud ligikaudu 800 meetrit. Sellest tulenevalt kasutati ühte baasjoont ja käik suleti ühte polügonomeetriapunkti. Maa-ameti geodeetiliste punktide andmekogu alusel olid käigus kasutatavad polügonomeetria punktid kontrollitud aastal 2009 AS K&H poolt ning tasandatud aastal 2011.

Kontrolliti ka nivelleerimiseks sobiva seinareeperi olemasolu ja seisundit ning pandi paika kindlustatud käigu punktidele nivelleerimise põhimõtted. Kõrgused sooviti nivelleerida ühe korra, moodustades kinnise käigu kasutades ühte seina reeperit.

5.2. Tahhümeetrilise käigu rajamine

Kindlustatud punktid rajati koos käigu mõõdistamisega, sest projekteerimise etapis olid ligikaudsed asukohad paika pandud ning ka looduses tulevased asukohad üle vaadatud. Esialgselt sooviti seada tahhümeeter Lauluväljaku mereväravate ette ning orienteerida vastulõike meetodil kasutades polügonomeetriapunkte Pirita 3 ja Pirita 4, kuid instrumendi iseärasuste tõttu polnud võimalik teostada vastulõiget täisvõttega. Käigu baasiks valiti kohaliku võrgu II järgu polügonomeetria punktid Pirita 3 [15] ning Pirita 4 [16], mis asusid Pirita tee ääres sõidutee ja kergliiklustee vahelisel haljasribal. Mõlema polügonomeetria punkti vahel oli hea nähtavus.

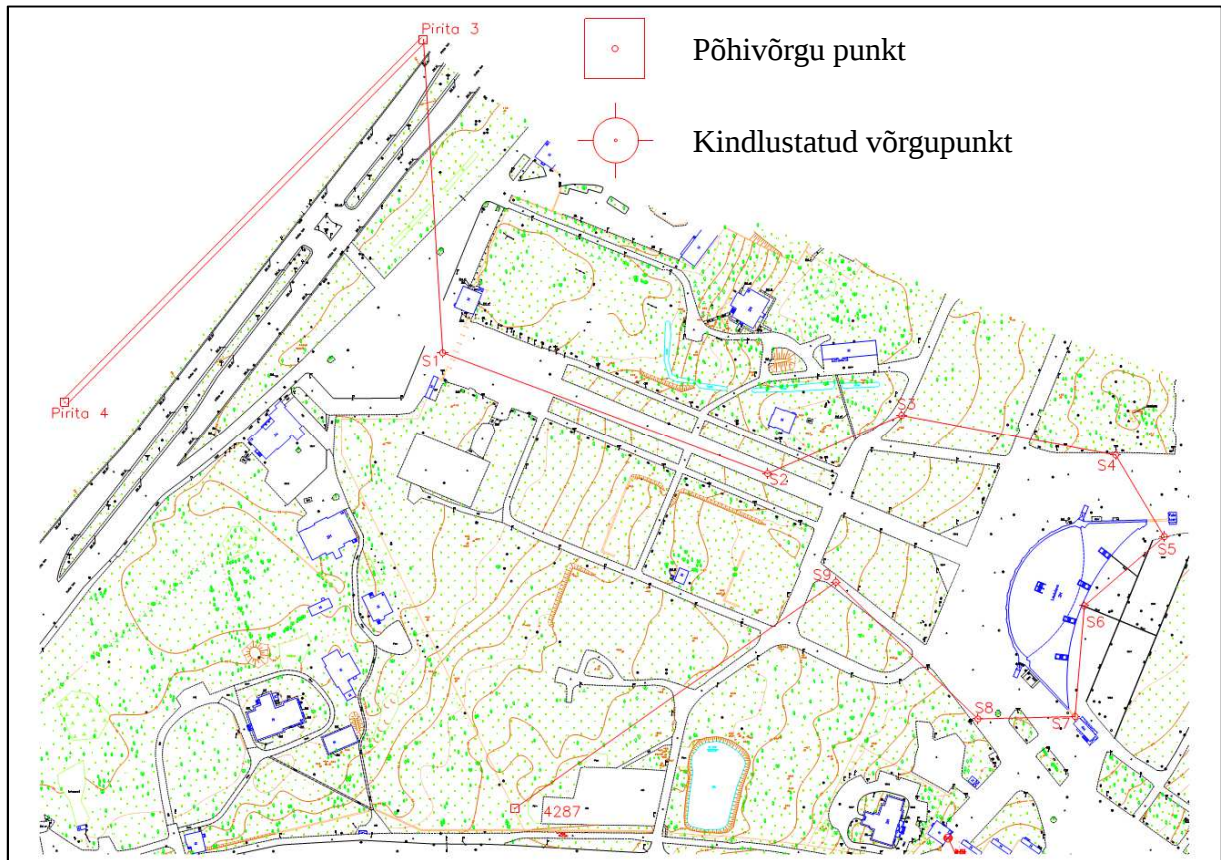
Elektrontahhümeeter seati polügonomeetria punkti Pirita 3 ning orienteeriti kasutades polügonomeetria punkti Pirita 4. Käik kulges Lauluväljaku Mereväravate eest kindelpunktilt S1 piki kergliiklusteed laululava suunas läbi kindelpunkti S2 ning päripäeva ümber laululava läbi kindelpunktide S3, S4, S5, S6, S7, S8 ja S9 uuesti selle mere poolsele küljele ning käik suleti polügonomeetria punkti 4287 [17]. Mõõtmised teostati kahel järjestikusel päeval, sest esimesel päeval katkestati tööd vigase treegeri tõttu, mis järgmiseks päevaks asendati. Mõõtmised tehti ühekordse täisvõttega. Käigu mõõdistamisel lähtuti suhtelise vea täpsusnõudest 1/10000 [9], mida sai kontrollida käigu sulgemisel pärast tasandusi ja käigu suhtelise vea arvutust. Jämedate vigade vältimiseks saab käigu rajamisel uues jaamas tagasivaate mõõtmisel hinnata joone pikkust eelmise mõõtmise edasivaate suhtes ehk võrrelda sama joone kauguse mõõtmise tulemusi.

Käik tasandati kasutades uurimustöös kasutatud Trimble M3 elektrontahhümeetris olevat käigu tasandamise programmi, mis rakendab arvutustes Bowditchi meetodit.

Tabel 4

Polügonomeetriapunktid		
Punkti nimi	X	Y
Pirita3	6590200.081	545441.657
Pirita 4	6590019.008	545262.508
4287	6589815.968	545487.197

AutoCAD'is joonestati käigu skeem, mille aluseks võeti GeoMetria poolt 2007. aastal tehtud geoalus (vt joonis 7). Käigupunktid kindlustati betooni naeltega ja markeeriti värviga ning joonistati nende kohta asukoha skeemid (lisa 1).



Joonis 7. Tahhümeetrilise käigu skeem

Mõõdistuskäik tasandati kasutades Tribble M3 instrumendis endas olevat tasandusprogrammi. Tasandusviisiks valiti programmiselt Kompassi meetod. Kompassi meetodiga tasandusviisi puhul jaotatakse teljelised sidumatused (f_x ja f_y) proportsionaalselt vastavalt joone pikkustele. Kõrgusi tahhümeetrilise käigu tulemustes ei arvestatud. Mõõdistuspunktile määrati eraldi geomeetrilise nivelleerimisega, kasutades I klassi seinareeperit. Tahhümeetrilise käigu tasandamise tulemusena saadi tasandatud koordinaadid rajatud mõõdistuspunktile (vt tabel 5).

Tabel 5

Käigupunktide koordinaadid		
Punkt	X	Y
PIRITA4	6590019,008	545262,508
PIRITA3	6590200,081	545441,657
S1	6590043,700	545451,245
S2	6589982,951	545613,505
S3	6590012,335	545680,507
S4	6589992,229	545787,352
S5	6589951,517	545811,660
S6	6589917,015	545771,758
S7	6589861,805	545767,105
S8	6589860,625	545718,540
S9	6589928,824	545647,653
4287	6589815,968	545487,197

Seoses Trimble programmi erisustega sai tehtud käsitsi suhtelise vea arvutus (1) [18: 59] võttes aluseks tahhümeeetri tasandusarvutuste raportist saadud käiguandmed (vt tabel 6). Teodoliitkäigu suhtelise vea arvutamisel lähtuti ehitusgeodeetiliste uurimistööde tegemise korrast [9].

Tabel 6

Käigu sulgemisvead	
Tasandatud	Tasandatud (Kompass)
Nurgaline sulgemine	0°00'00"
Kauguse sulgemine (m)	0.005
Käigu pikkus (m)	814.337
Täpsus	1 : 163419.4
ΔX (m)	-0.001
ΔY (m)	0.005

Kontrollarvutuse tulemusena leiti käigu sulgemisveaks 1: 159 705.

5.3. Nivelleerimiskäigu rajamine

Nivelleerimiskäigu rajamisel teostati geomeetrilist nivelleerimist digitaalnivelliiriga Leica Sprinter 100M. Nivelleerimiskäigu rajamisel lähtuti I klassi seinareeperist 0012, mille kõrgus on geoidist 13.269 meetrit. Seinareeper asus Lauluväljaku Oru värava kõrval asuva hoone seinas (lisa 2) [19]. Kuna teise reeperi kaasamine oleks tinginud täpsuse seisukohast põhjendamatult pika nivelleerimiskäigu, siis otsustati rajada kinnine käik kasutades ühte lähtereeperit.

Nivelleerimistööde alguses teostati nivelliiri peanõude kontroll, kus keskelt ja otsast nivelleerimise tulemusena saadi veaks 0,8 mm. Ölgade pikkus keskelt nivelleerimisel ei ületanud 50 m. Peanõude kontrolli tegemisel otsast nivelleerimise puhul oli lühema öla pikkus ligikaudu 1 meeter. Viimane kinnitas, et nivelliir on antud tööks sobivas töökorras, olgugi, et käigu rajamisel kasutati tehnilise nivelleerimise jaoks soovitatavat keskelt nivelleerimist, mille tulemusena elimineeritakse viseerimiskiire mitte horisontaalsusest tingitud latilugemi viga. Ühe öla pikkus ei tohiks tehnilise nivelleerimise puhul ületada 150 m.

Nivelleerimiskäik koosnes üheksast jaamast ja kulges Rp.0012-S7-S6-S5-S4-S3-S2-S9-S8-Rp.0012 (vt joonis 8). Nivelleerimisel tagati ölgade võrdsus sammudega ja visuaalselt, kusjuures ölgade pikkus oli igal juhul alla 50 meetri.

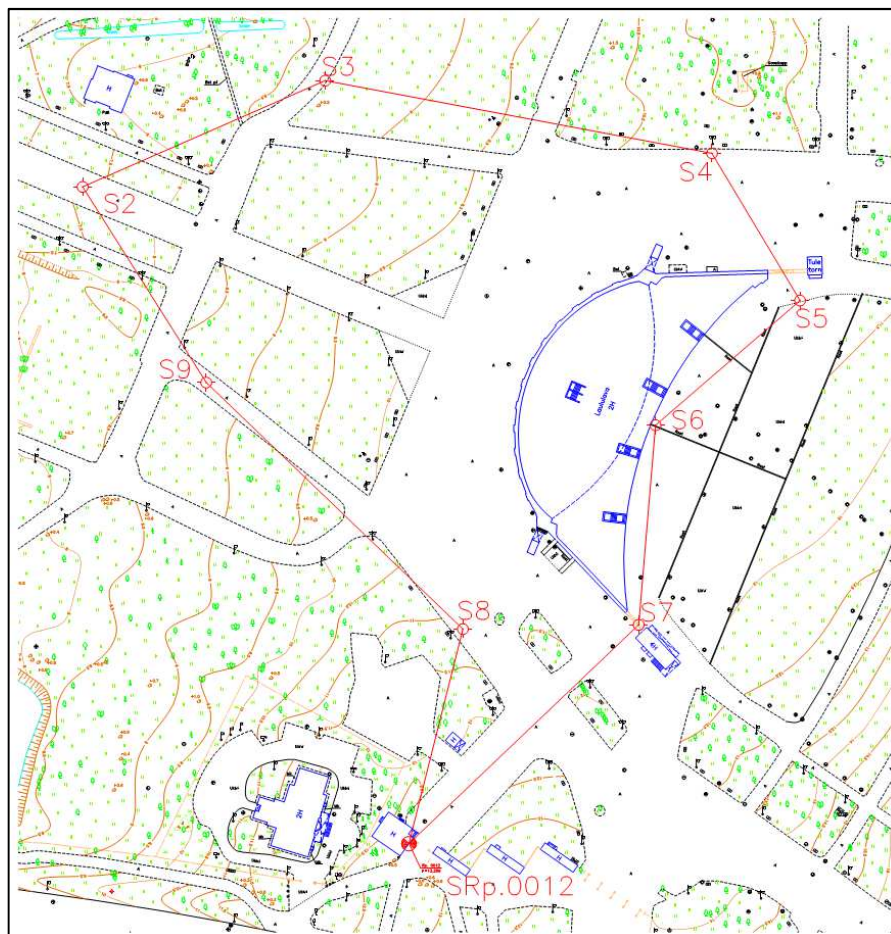
Nivelleerimiskäik tasandati lähtuvalt tehnilise nivelleerimise täpsusnõuetele järkeva arvutusega (4), kus leiti käigu lubatud sidumatus. Lubatud sidumatuse arvutamisel lähtuti ehitusgeodeetiliste uurimistööde tegemise korrast [9].

$$f_{h\ lub} = \pm 50\sqrt{0,65} = \pm 40,3\ mm, \quad (4)$$

kus

0,65 - käigu pikkus kilomeetrites.

Nivelleerimiskäigu arvutatud praktiliseks sidumatuseks saadi -4 mm, mahtudes sellega III klassi nivelleerimise täpsuse sisse, milleks antud käigu pikkuse juures oli $\pm 6,5$ mm. Detailsed andmed nivelleerimiskäigu kohta leiab lisast 3. Mõõtmised teostati pilvise ilmaga, edela- ja lõunatuule kiiruseks oli keskmiselt 3-6 meetrit sekundis ja temperatuur vahemikus 5-7 kraadi Celsiust [20].



Joonis 8. Nivelleerimiskäigu skeem

6. LAULULAVA KÕLAEKRAANI LASERSKANEERIMINE

Laserskanneriga teostati kolm mõõdistust. Esimene neist teostati novembri lõpus ilma lumeta, teine veebruari keskpaigas raske lumega peale kerget sulailma, kolmas mai alguses. Oluliseks peeti ka ilmastikuolude ülestähendamist. Eriti oluliseks mõjutavaks teguriks oli tuul ja seetõttu valiti mõõdistustöödeks võimalikult tuulevaiksed päevad. Kuna et kõlaekraan ei ole täiesti jäik konstruktsioon, siis avaldab tuule suund ja tugevus kõlaekraani uurimisele soovimatut mõju.

Eesmärk oli leida kolme erineva mõõdistuse kaudu saadavatest andmetest ülevaade kõlaekraani deformeerumisest lume raskuse mõjul, samuti saada ülevaade deformatsiooni mõjust kõlaekraani konstruktsioonile. Deformatsioonide uurimisel lähtuti kandetrosside ristumiskohtade andmetest ning trosside kinnituskohadest kõlaekraani ülemise kaare konstruktsiooni ja alumise osa tagaseina küljes. Kõlaekraani pealt skaneerimise eesmärgiks oli lume mahu hindamine, võttes aluseks ilma lumeta ja koos lumega tehtud skaneerimise. Oluline oli ka katuse pinna kõrguse määramine erinevates punktides ja lume paksuse määramine mõõdistuste alusel. Kevadise skaneerimise eesmärk oli uurida võimalikke jääkdeformatsioone pärast lume koormuse kadumist ekraanilt.

6.1. Esimene skaneerimise etapp

Laserksaneerimine teostati 23.11.2012. Temperatuur oli mõõdistamise ajal 5°-7° Celsiuse järgi ning tuule tugevuseks hinnanguliselt kolm kuni kuus meetrit sekundis [20]. Kõlaekraani skaneeriti eest neljast jaamast ja kolmest jaamast kõlaekraani pealt (lisa 4). Esimeseks jaamaks seati skanner kõlaekraani ette vasakule, vaadates suunaga mere poole, kindelpunktile S7.

Teine mõõdistus teostati kindelpunktilt S6, millest mõõdistati kogu kõlaekraani üldosa. Skaneerimise resolutsiooniks valiti kõrge resolutsioon ehk 100 meetri kaugusele punkt iga 5 cm järel. Siinjuures, kuna skaneeritava objekti maksimaalne kaugus antud jaamast oli ligikaudu 40 meetrit, on eeldatavaks punktitiheiduseks vähemalt 2 cm.

Seejärel seati instrument punktile S5, milledest täiendati kõlaekraani punktiple paremalt küljelt. Lisaks teostati üks mõõdistus kõlaekraani alt, ligikaudu 5 meetri kauguselt kõlaekraani alumisest tagaseinast.

Skaneerimise resolutsiooniks valiti keskmine resolutsioon ehk 100 meetri kaugusele mõõdistatakse punkt iga 10 cm järel. Kõlaekraani alt mõõdistati võimalikud varju jäävad kõleekraani detailid, mis jäid kõlaekraani eest mõõdistatud jaamadest nähtavuse tõttu väikese mõõdistamata. Nähtavust piirasid peamiselt valgustid kõlaekraani küljes, mistõttu polnud kõiki kandetrosside ristumiskohti igast seisust näha.

Instrumenti orienteerimisel kindelpunktil S6, kasutati vastulõike meetodit. Orienteerimiseks kasutati punkte S5 ja S7, kuid esimese jaama orienteerimisel vigase tähise tõttu saadi kõrguslikuks veaks z-telje suunas 4 mm. Vea piir, millega instrument orienteerimisel arvestas, oli vastulõike meetodi puhul x-ja y-telje suunas 4 mm ning z-telje suunal samuti 4 mm. Instrument tasandas orienteerimisel vead ning see pidi jääma eelpool nimetatud piirmäärade vahele, vastasel korral poleks orienteerimine õnnestunud. Piiratud ajaliste ressursside tõttu otsustati siiski skaneerida eelpool nimetatud veaga. Kõlaekraani alumise tagaseina lähedal asuva jaama ja kindelpunktile S5 seatud jaama orienteerimiseks kasutati tuntud seisupunkti ja tagasivaate punkti abil orienteerimise meetodit ja vigast tähist orienteerimiseks ei kasutatud.

Järgnevalt viidi skanner kõlaekraani peale, kust esimene jaam seati katuse keskele tagumisele tasasele osale ning orienteeriti kasutades punkte S3 ja S9. Samast jaamast mõõdeti sisse ka ajutised tähised, mis olid seatud katusepleki külge tähise jaluses oleva magnetiga. Järgmised mõõdistused teostati katuselt paremalt ja vasakult küljelt ning orienteeriti kasutades ajutisi tähiseid ning vähemalt ühte kindelpunkti. Kõlaekraani peal valiti mõõtmisresolutsiooniks madal resolutsioon ehk 100 meetri kaugusele punkt iga 20 cm järel, sest kõlaekraani peal katusel pole väikeseid detaile, vaid on ühtlane plekiga kaetud sadulpind. Oluline oli saada ühtlane pinnamudel katuselt, et oleks seda hiljem andmetöötluses võimalik kasutada lumekoguse hindamiseks.

Kogu kõlaekraani skaneerimise tööaeg oli orienteeruvalt 5 tundi.

6.2. Teine skaneerimise etapp

Laserkanneriga teostati teine mõõditsusetapp 15. veebruaril 2013. Aeg valiti sobivate lume- ja ilmastikuolude tõttu. Mõõdistamisele eelnenud nädala jooksul oli õhutemperatuur olnud 0° Celsiuse ümbruses ning lisaks muutis juurdesadanud märg lumi kõlaekraani peal oleva lumekoguse veel raskemaks. Mõõdistamise hetkel oli temperatuur keskmiselt -1° kuni -2° Celsiuse järgi. Kirde- ja idatuule kiiruseks oli ligikaudu kaks meetrit sekundis ning oli lauspilvisus [21].

Kõlaekraani skaneeriti kolmest jaamast kõlaekraani alt ja pealt (lisa 5). Kõlaekraani skaneerimiseks asetati skanner kindelpunktile S6, kus nagu ka esimese mõõdistusetapi ajal, mõõdistati kõlaekraani esine maksimaalses ulatuses kõrge resolutsiooniga ehk 100 meetri kaugusele punkt iga 5 cm järel.

Seejärel planeeriti teostada kaks skaneerimise jaamaseisu kõlaekraani vasaku ja parema ääre täpsemaks mõõdistamiseks, kuid suurte kõrguslike vigade tõttu polnud võimalik instrumenti orienteerida ning instrument seati uuesti kindelpunktile S6, et sealt täiendavalt mõõdistada kõlaekraani ääri. Skanner orienteeriti tuntud seisupunkti meetodil kasutades tagasivaate punkti S5. Tuntud seisupunkti meetodil oli instrumendil lubatud vea piirmääradeks x- ja y-teljelises suunas 6 mm ja kõrguslikus z-teljelises suunas 4 mm. Kõrguslikuks ehk z-teljeliseks orienteerimise täpsuseks saadi 4 mm.

Kindelpunktil S6, kasutati väga kõrget resolutsiooni ehk 100 meetri kaugusele punkt iga 2 cm järel, kus mõõdistati täiendavalt kõlaekraani vasakut ja paremat serva. Sealt mõõdistati ka ajutised tähised kõlaekraani vasakus ja paremas servas. Neid ajutisi tähiseid kasutades orienteeriti instrument kõlaekraani all tagaservas vastulõike meetodil. Jaama seisupunkti viga x-telje suunal oli 1 mm ja z-telje suunal 2 mm, y-telje suunal viga oli 0 mm. Sealt täiendati mõõdistust ekraani aladega, mida polnud võimalik kõlaekraani eest nähtavuse tõttu skaneerida. Lisaks saadi sealt seisupunktist kõrge täpsusega mõõdistatud kõlaekraani alune tagumine osa, mida mõjutab lumekoormis kõige enam.

Järgnevalt viidi skanner kõlaekraani peale ning paremast servast, suunaga mere poole, orienteeriti instrument vastulõike meetodil kasutades kindelpunkte S4 ja S3 ning mõõdeti sisse kaks ajutist tähist, mis seati katusele. Kõigi kolme jaama orienteerimisel ei ületanud vead plaanilises ega kõrguslikus suunas 2 mm. Ajutisi tähiseid kasutades orienteeriti instrument katuse keskel ja vasakus ääres. Mõõdistustiheduseks valiti madal resolutsioon ehk 100 meetri kaugusele punkt iga 20 cm järel. Kogu skaneerimisprotsess võttis aega ligikaudu 4 tundi.

6.3. Kolmas skaneerimise etapp

Kolmas mõõdistus laserskanneriga teostati 9. mail 2013. Ilm oli mõõdistuspäeval soe, kuni 27° Celsiuse järgi ja päikeseline, koos mõõduka tuulega puhanguti kuni 9 m/s Viimsis asuva mõõtejaama andmete järgi. [22]

Skaneerimised tehti kahest jaamast kõlaekraani alt (lisa 6). Skaneerimised teostati kõlaekraani eest kindelpunktil S6, kus instrument orienteeriti tuntud seisupunkti meetodil, kasutades kindelpunkti S5. Orienteerimise vead olid x-, y-ja z-telje suunas 1 mm. Sellest jaamast skaneeriti kõlaekraan kogu ulatuses kõrge resolutsiooniga ehk 100 meetri kaugusele punkt iga 5 cm järel. Seejärel tihendati mõõdistust äärtest väga kõrge resolutsiooniga ehk 100 meetri kaugusele punkt iga 2 cm järel. Seejärel mõõdeti ajutised tähised lava peal ning neid kasutades orienteeriti instrument kõlaekraani tagaserva lähedal vastulõike meetodil, kus orienteerimise vigadeks oli x-ja y-telje suunal 0 mm ning z-teje suunal 1 mm. Sealt täiendati mõõdistust aladega, mis eest mõõtes teiste objektide varju jäid.

6.4. Lume koguse mõõdistus

Kõlaekraani pealmine pind oli kaetud lumega ligikaudu pooles ulatuses katuse pindalast ning põhilised kõlaekraani deformeerumised jäid kõlaekraani alumisse osasse. Lume kihi orienteeruv paksus oli hinnanguliselt 30-50 cm ning proovi võtmise käigus hinnanguliselt ka ühtlase tihedusega, välja arvatud seina ja tugikaare suhtes keskjoonel olevate ülevalt poolt vajunud lumekuhjatiste piirkonnas (vt foto 1).

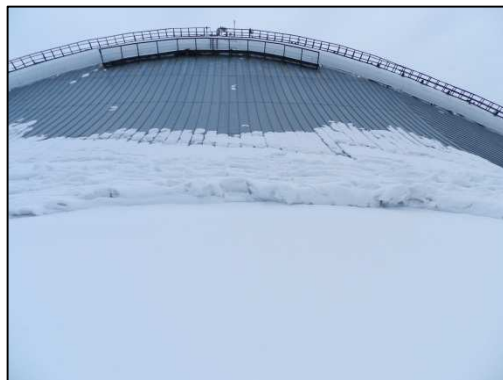


Foto 1. Lume kõlaekraani peal [erakogu]

Vastu katuseplekki olnud lume kiht ei olnud ka jäine. Kõlaekraani katva lume koguse raskuse määramiseks lõigati ekraani peal olevast lumest välja ristkülik mõõtmetega 13x13x14 cm. Antud proov kaaluti ± 5 grammi täpsuse majapidamiskaaluga (vt foto 2) ning võetud proovi raskuseks saadi 609 grammi. Kontrolliks võeti kaalukauss mitu korda pealt ära ja pandi tagasi ning saadi sama tulemus. Kaalukausi kaal nulliti kaalu vastavalt funktsiooni kasutades.



Foto 2. Majapidamiskaal ja kaalukauss [erakogu]

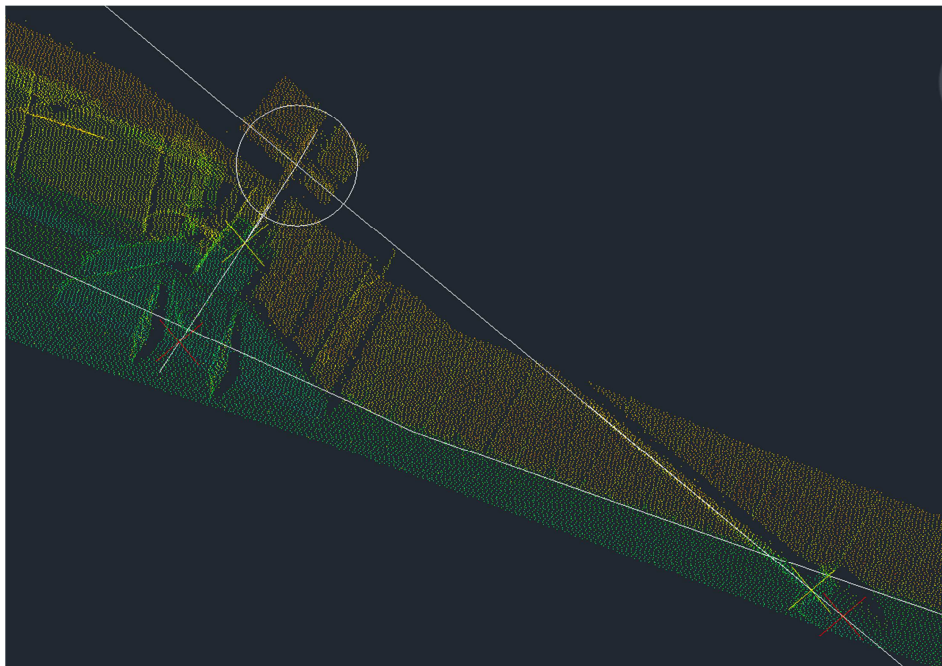
7. SKANEERITUD ANDMETE TÖÖTLUS

Mõõdistuskäigu rajamise järel viidi kindelpunktide tasandatud koordinaadid AutoCADi ja kasutades GeoMetria poolt 2007. aastal tehtud geoalust, joonestati käigu plaan ning hiljem kasutati sama plaani nivelleerimiskäigu kirjeldamiseks. Skeemide alusel loodi kindelpunktide asukoha plaanid. Antud joonise abiga kirjeldati ka skaneerimisjaamade asukohad.

Punktipilved puhastati üleliigsest kasutades programmi Leica Cyclone ning loodi .pcg fail, mis eksporditi AutoCADi, kus saadi automaatse töötamise käigus .pts fail. Eelpool nimetatud formaadis punktipilv oli edasise töötamise aluseks. AutoCADis oli selline punktipilv ühtse objektina ning selle omadusi eraldi pilve siseselt muuta ei saanud. Seadistada sai kogu punktipilve värvi ja tihedust.

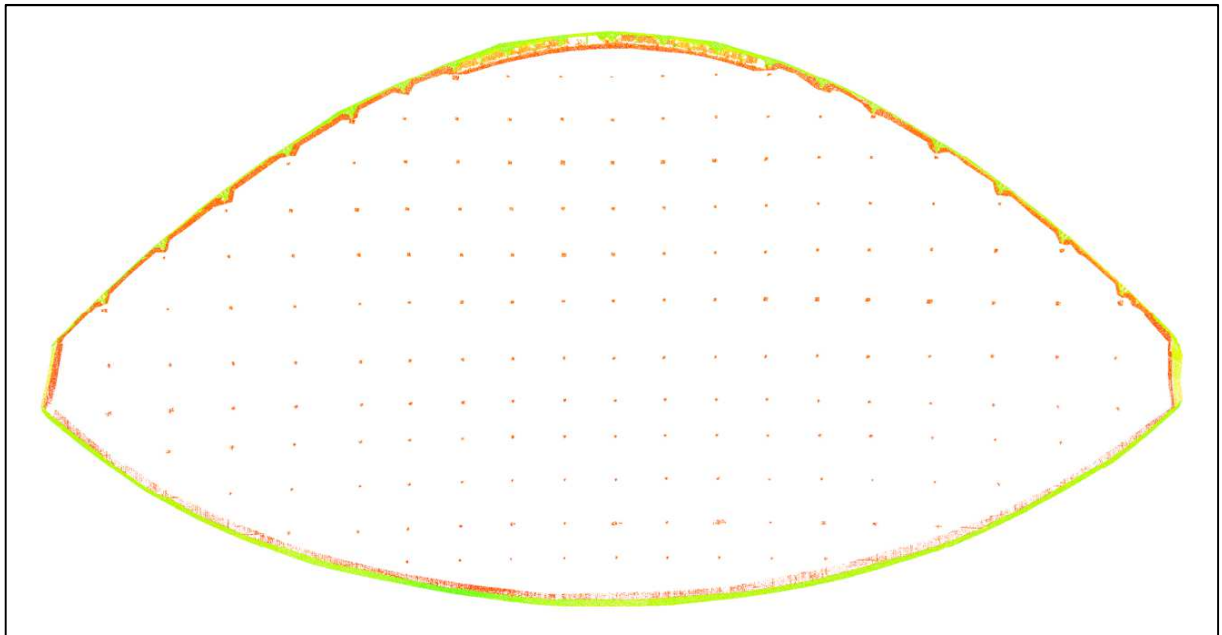
7.1. Sügisese skaneerimise andmete töötlemine

Algselt sooviti modelleerida trossid ja selle taga olev laudis, kuid tarkvaraliste vahendite puudumise tõttu sellest kavatsusest loobuti ning leiti ristumiskohad kasutades piki trosse kulgevaid abijooni ja nende näilisi lõikumiskohti (vt joonis 9).



Joonis 9. Trosside ristumine [AutoCAD]

Sügisese skaneerimise punktipilves eraldati trosside ristumiskohad nelinurksete aladena küljepikkusega ligikaudu 10-30 cm (vt joonis 10). Algselt joonestati mõlema trossi alumise serva kontuur abijoonega ning leiti ristumiskoht alumise trossi alumisse serva. Ristumiskoht leiti visuaalselt orienteerides iga risti korral vaade piki ülemise trossi alla joonestatud abijoont ning selle alusel leiti soovitud punkt võttes joone risti ülemise ja alumise abijoone vahel.



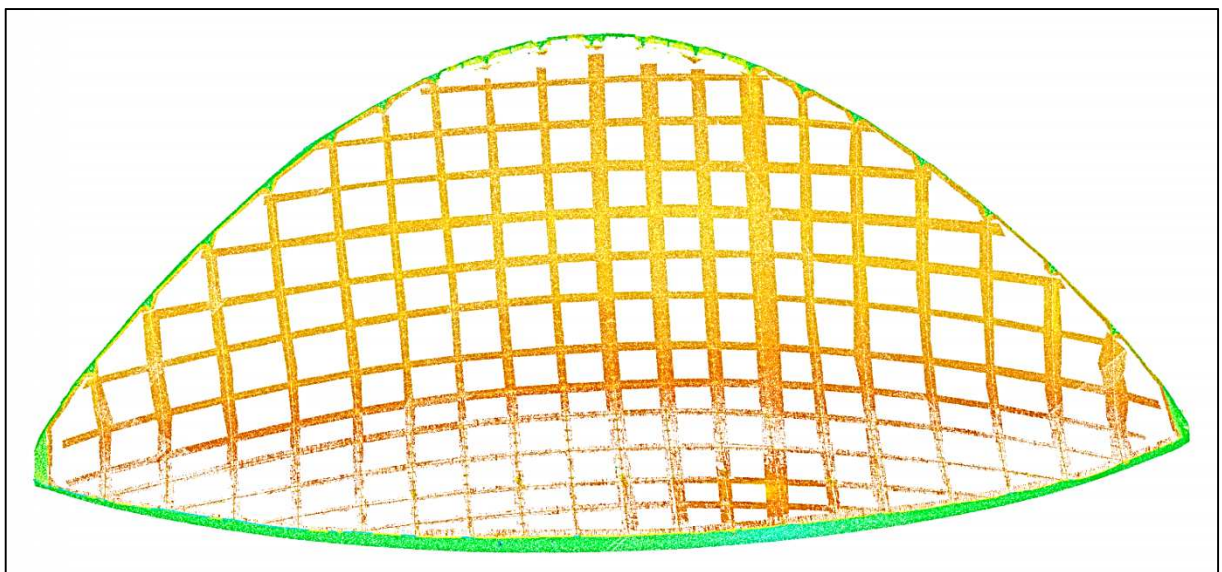
Joonis 10. Sügisese skaneerimise puhastatud punktipilv [Cyclone 8.0]

Täpsuses valmistas probleeme vähene punktide arv pilves aladel, kus skanneriga oli mõõdistatud vaid ühe, kuid terava nurga alt, mistõttu oli keerukas joonestada abijoont täpselt piki trossi allaserva. Seetõttu kannatas plaaniline täpsus, kõrguslik täpsus vähem. Ristumiskohtade tähistuseks valiti 20 cm läbimõõduga ringid, mille keskpunkt tähistas ristumispunkti. Valik tehti nii visuaalse, kui ka ühese arusaadavuse jaoks.

Sügisese skaneerimise pilv sisaldas kaare- ja seina konstruktsioone koos trosside kinnituselementidega. Seda kasutades joonestati joonega välja kaare- ja seina kontuurjoon ning trosside kinnituskohad, mis pikendati välja joonestatud kontuurini.

7.2. Talvise skaneerimise andmete töötlemine

Talvise skaneerimise punktipilv puhastati ja eksporditi samal viisil, nagu sügise skaneerimise punktipilv, kuid parema täpsuse huvides jäeti trossid kogu pikkuses alles (vt joonis 11). Lõigati välja trosside vahelise laudise alad. Lisaks olid ühes punktipilves koos lisaks trossidele ka kaare- ja seina konstruktsioonid, mis andmete mahu tõttu muutsid järeltöötlemise AutoCADis aeglasemaks, peamiselt kõrgete riistvaraliste nõutete tõttu, kuid eelnevalt omandatud kogemuse tõttu võttis joonestusprotsess vähem aega, kui sügise skaneeringu pilve puhul. Samuti on jooniselt selgelt näha, et infohulk mida töödeldi oli tunduvalt mahukam, kuid seetõttu ka ülevaatlikum ja selgem.



Joonis 11. Talvise skaneeringu punktipilv puhastatud kujul [23]

7.3. Kevadise skaneerimise andmete töötlemine

Sarnaselt sügise ja talvise skaneerimise käigus saadud punktipilvedele, puhastati ja eksporditi ka kevadine punktipilv, kuid piiratud ajaliste ressursside tõttu jäeti lisaks trossidele ja tugikaartele ja teistele kinnituselementidele alles ka laudis. Vajalikud trosside ristumiskohad, kinnitused ja tugokaarte piirjooned joonestati välja AutoCADis. Kasvanud kogemustepagasi tõttu suudeti eelnev informatsioon töödelda AutoCADis nelja tunniga.

7.3.1. Lume kogusest ekraanil

Leica Cyclone tarkvara kasutades saadi kahe pinnamudeli võrdlusel mahud [23], mille kaudu sai arvutada lume koguse ja kaalu, võttes aluseks mõõdetud ristküliku kujulise lumehulga.

Kahe pinnamudel võrdlusel saadud lume maht oli 229,5 m³. Pindala oli eelpool nimetatud alal 1358,6 m². Pinnamudeli võrdlusest saadud läbivajunud osa oli 2,0 m³, pindalaga 164,6 m². Kogu loodud pinnamudelite ala koos lumega oli 1895,8 m² ja lumeta mõõdistuse korral oli pindala 1750,7 m². Erinevus kahe mudeli üldpindalades ilmnes kaare ülemiste osade võrdluses, kuid oluline antud võrdluses on alumine osa.

Maha arvati kolme sissepääsu luugi ruumala 0,21 m³. Arvutuskäik, kui lumest ristkülik oli mõõdetmetega 13×13×14 cm ja kaaluga 0,609 kg:

1) *ristküliku maht*: $13 \times 13 \times 14 = 2366 \text{ cm}^3 = 0,002 \text{ m}^3$,

2) *lume maht*: $229,50 + 2,00 - 0,21 = 231,29 \text{ m}^3$,

3) *lume kaal*: $\frac{0,61 \times 231,29}{0,002} = 70\,543,45 \text{ kg}$,

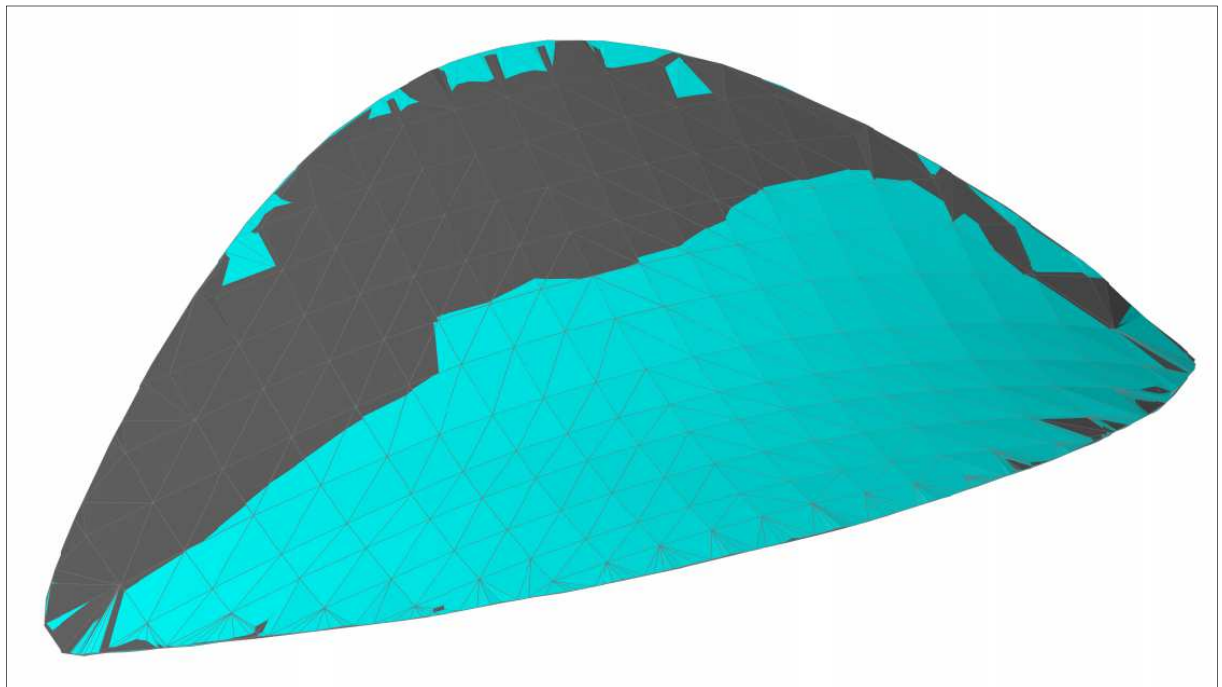
4) *ühe m³ lume kaal* $= \frac{70\,543,45 \text{ kg}}{231,29 \text{ m}^3} = 305 \text{ kg/m}^3$.

Võttes aluseks ±5 grammi täpsuse kasutatud kaalu puhul, siis kogu arvutatud lume raskuse täpsuseks sai arvutuslikult ±580 kg, millele lisandub võimalik määramatu lume tihedusest tulenev viga. Vea marginaali tõstab ka tõsiasi, et lumi oli vajunud kaare poolt alla ning moodustanud kaare ja seinu suhtes keskele tihedama kuhjatud osa. Kuna lume proov võeti ühtlasema tihedusega alast, peab kogu lume kaalu hindama võrreldes arvutustes saaduga suuremaks.

Vastavalt Eesti Meteoroloogia ja Hüdroloogia Instituudi andmetele [24] võib vana ja märja lume kuupmeeter kaaluda kuni 500 kg, mistõttu saab arvutuslik 305 kg/m³ kohta olla reaalseks tulemuseks.

7.4. Konstruksiooni deformatsioonide võrdlus

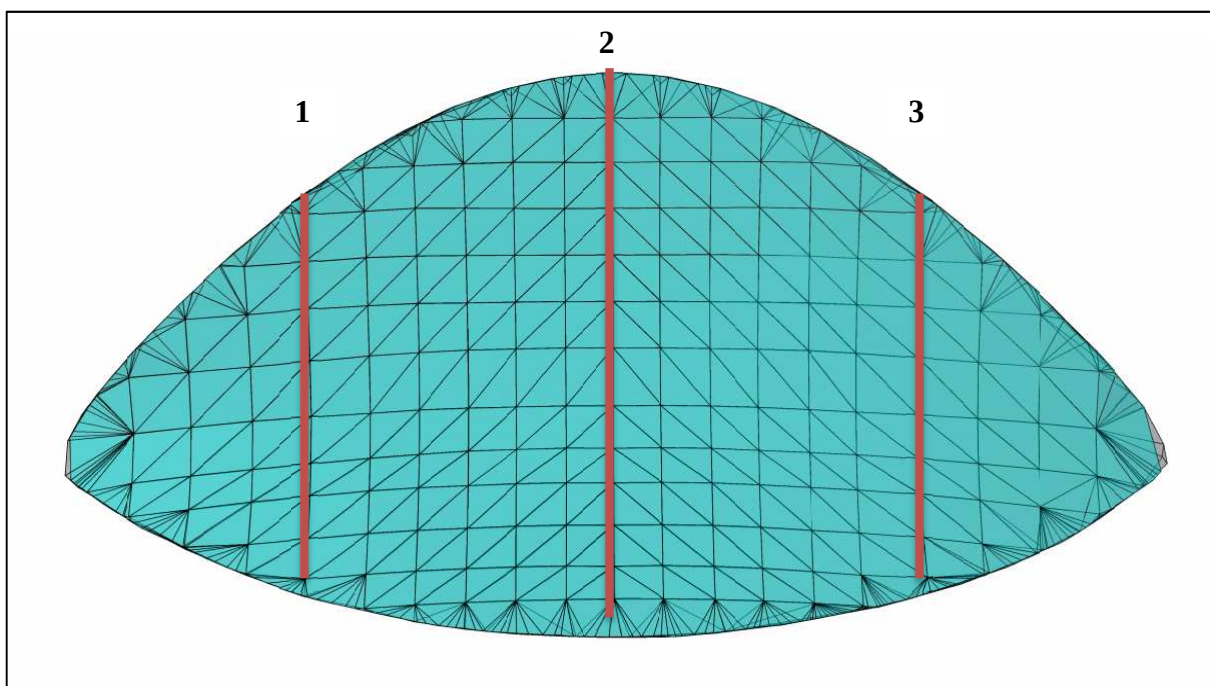
Kolme mõõdistuse alusel loodi trosside lõikumiskohtasid ning seina ja kaare kontuurjoont kasutades eraldi pinnamudelid. Viies pinnamudelid samasse süsteemi, saadi visuaalne võrdlus, kus oli näha, kuidas olid kõlaekraani konstruktsioon lume raskuse all deformeerunud, võrreldes normaalses olekus sügisese skaneerimisega. Kujutatud joonisel on helesinisena näha sügisese skaneerimise pinnamudel ning hallina lumega tehtud skaneerimine. Ilmekalt on näha, kuidas kaare alumine pool, mida lumi kattis, on vajunud läbi ning on seetõttu tõmmanud trossid rohkem pingule ekraani ülemises osas, mis on normaalolekus olevast mudelist kõrgemale tõusnud (vt joonis 12). Kevadise ja sügisese skaneerimise pinnamudelite võrdlusest olulisi deformatsioone välja ei paistnud.



Joonis 12. Lõikuvad pinnamudelid [AutoCAD]

Vajumine pole olnud ühtlane nagu polnud seda ka lumikate kõlaekraani peal. Deformatsioonide ilmekamaks näitamiseks võeti talvise ja sügisese mudeli võrdlemiseks kolm lõiget ning võrreldi piki neid lõikeid trosside ristumiste, seina kontuuri ja kandva kaare vajumisi. Samaselt tehti kolm lõiget ka sügisese ja kevadise mõõdistuse vahel, et uurida kuidas on konstruktsioon talvise lume mõjudest pärast lume sulamist muutunud.

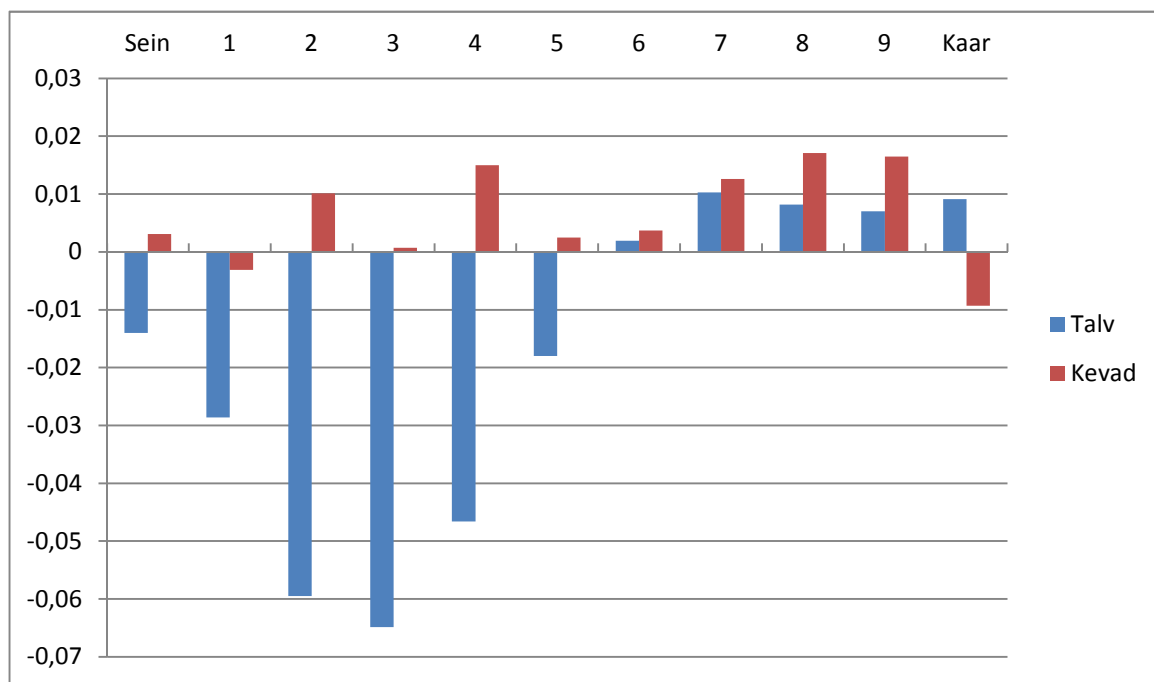
Lõiked fikseeriti numbritega (vt joonis 13) ning igale lõikele vastas numbriliselt vastav tulpgraafik, mis näitab talvisel või kevadisel skaneerimisel saadud vajumiste erinevusi sentimeetrites. Null tasapinnaks on seega sügisesel skaneerimisel saadud trosside ja konstruktsiooni elementide pind. Negatiivne väärtus näitab vajumist ja positiivne tõusmist. Graafiku ülaserbas kirjeldati lisaks kõlaekraani tagaseina ja kandva kaare kirjalikele tähistele nende vahele jäävaid trosside ristumiskohti järjestiku numbriliselt.



Joonis 13. Lõigete asukohad pinnamudelil [AutoCAD]

7.5. Pinnamudelite lõike 1 analüüs

Esimese lõike puhul (vt joonis 14) lumega oli vajumine kõige suurem kolmanda trosside ristumise juures 6,5 cm ning pindade lõikeala asetses viienda ja kuuenda ristumise vahel. Kõige suurem tõus oli seitsmenda trosside ristumise juures ning see jäi stabiilseks kaare toe suunas liikudes. Sama lõike puhul oli kevadel saadud tulemustes võrreldes sügisel saadud tulemustega konstruktsioon tõusnud, kuid deformatsioonid olid ebaühtlasemad jäädes valdavalt 2 cm ulatusse.

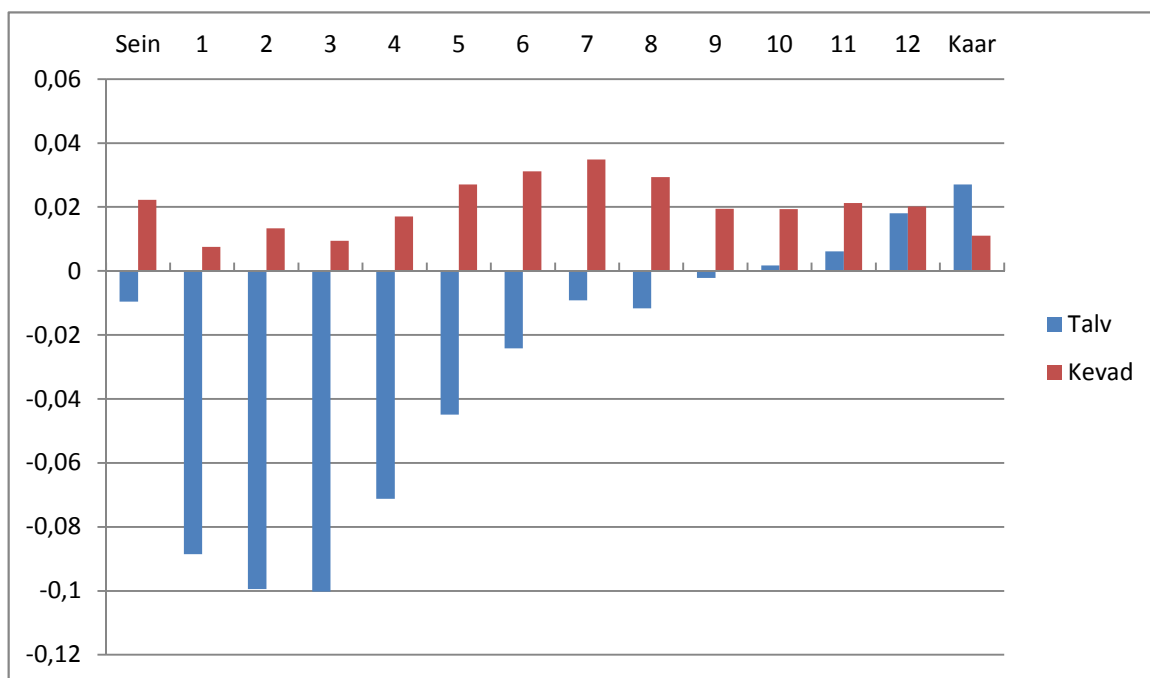


Joonis 14. Lõige 1 [Excel]

7.6. Pinnamudelite lõike 2 analüüs

Teise lõike puhul (vt joonis 15) oli lume tõttu järsk vajumine 8 cm seina kinnituse juurde mineva trossi ja esimese ristumise vahel ning suurim vajumine on teise ja kolmanda ristumise juures 10 cm, mille kohal katusel oli ka kõige rohkem lund. Seejärel vajumine väheneb sujuvalt kuni seitsmenda ristumiseni. Pindade lõikekoht jäi üheksanda ja kümnenda ristumise vahele. Järgnevate ristumiste juures tõus suurenes kasvavas tempos ja suurem kõrguste vahe kahe mudeli trosside kaare kinnituste vahel oli 2,7 cm.

Kevadise skaneeringu tulemustest selgub, et teise lõike kohal oli kõlaekraani konstruktsioon tõusnud. Deformatsioonid olid väikseimad kõlaekraani allosas tagaseina lähedal ja suurimad kõlaekraani keskosas vähenedes taas tugikaare suunas. Anomaalne 2 cm tõus oli trossil seina kinnituse juures, mis võis olla põhjustatud mõõtmise või töötluse veast.

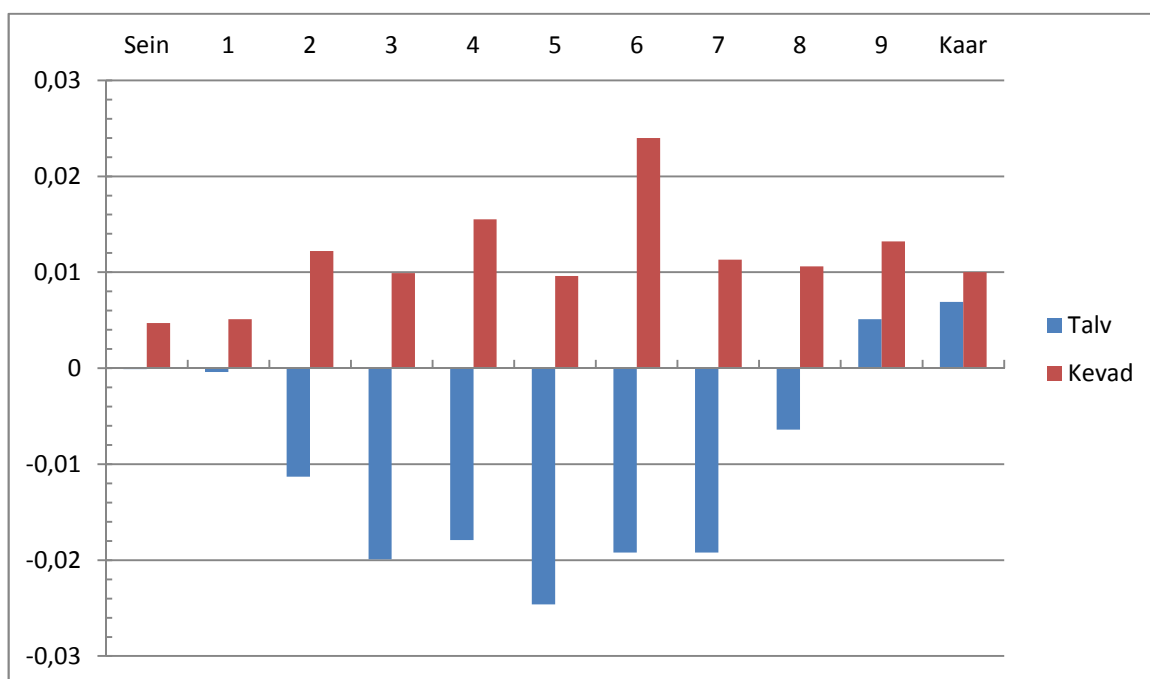


Joonis 15. Lõige 3 [Excel]

7.7. Pinnamudelite lõike 3 analüüs

Kolmanda lõike juures (vt joonis 16) oli lumest tingitud deformatsioonid ühtlasemad ning võib lugeda olematuteks sein kinnituse ja esimese trosside ristumise juures, ületades andmetöötlustest tulenevaid vigu. Kolmandast kuni seitsmenda ristumiseni oli vajumine ühtlaselt 2 cm piires, olles kõige suurem viienda ristumise juures 2,5 cm. Pindade lõikumiskoht oli kaheksanda ja üheksanda ristumiskoha vahel ja tõus jäi alla 1 cm.

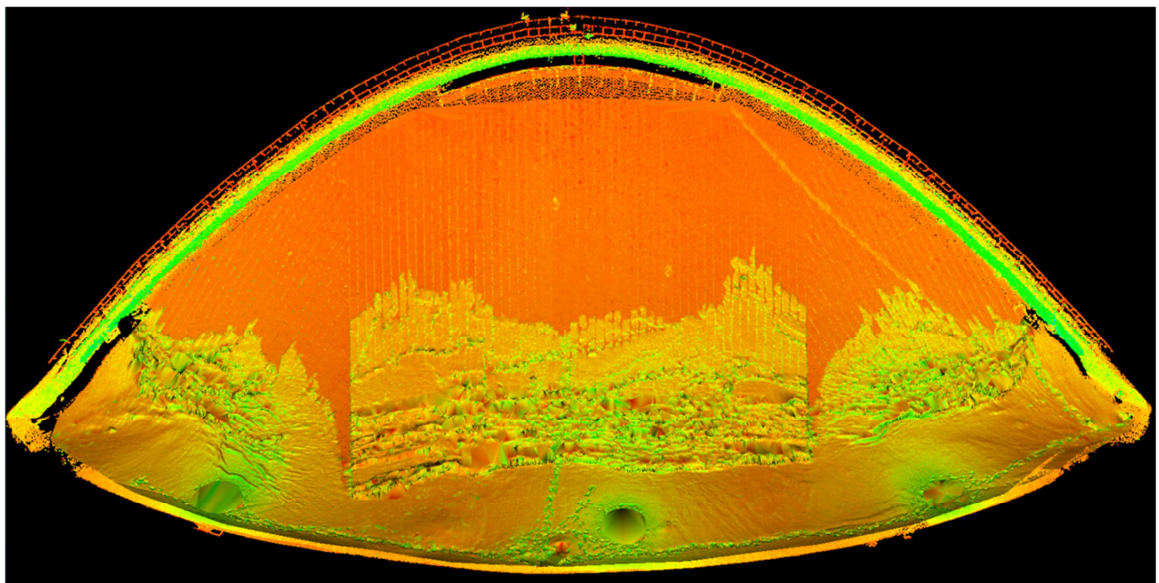
Kevadise mõõdistuse tulemustest selgus, et ka lõike 3 kohal oli kõlaekraani konstruktsioon kerkinud kogu lõike ulatuses, jäädes suurelt jaolt 1 cm piiresse, mida sai lugeda ka mõõdistuse ja töötluste täpsuseks, kuid ühtlane trend kinnitas andmete töötluste täpsust.



Joonis 16. Lõike 3 [Excel]

7.8. Lõigete võrdlus

Sügisese ja talvise mudeli lõigete võrdlusest selgub, et suurimad deformatsioonid jäid kõlaekraani keskele alumise serva poolsesse külge, kuhu langes ka kõige suurem koormus lume tõttu. Deformatsioon esimese lõike puhul oli suurem ja vajumine järsem, kuid väikesema ulatusega, kui kolmanda lõike puhul, kuigi mõlema lõike kaugus piki trossi oli kõlaekraani otstest sama kaugel, mis viitab lume koguse ja koormuse erinevale jaotumisele kõlaekraani peal. Joonisel 12 on näha kõige suuremat läbi vajunud osa ulatust lõike 3 juures ja kõige väiksemat lõike 1 juures. Sellest tulenevalt oli lõike 1 kohal lume kogus suurem ja raskuskese rohkem seinu suunas, kui lõike 3 puhul, kus lume kogus on 2-3 korda väiksema vajumise tõttu väiksem, kuid raskuskese on kõrgemal tugikaare suunas. Seda ilmestab ka joonis 17 [25], kus on näha lõike 1 juures (joonise vasakul pool), kõrgemaid lume kuhjatisi ja suuremat lumekogust seinu suunas, samas kus lõike 3 juures (paremal pool) oli lumi seinu pool ühtlasemalt jaotunud ning kaare poolt alla vajunud lume hulk väiksem. Sirged servad vajunud lume ja katuse pleki piiril tulenevad katusepleki kõrgest profiilist.



Joonis 17. Kõlaekraani pealne TIN³ mudel lumega

Kevadised tulemused näitavad, et kõlaekraan oli kerkinud võrreldes nii talvise, kui sügisese mõõdistusega, kuid muutused olid väikesemad, kui talvise mudeli puhul. Ebahühtlasemad olid deformatsioonid taaskord lõike 1 kohal, kuid siin võis oma mõju avaldada ka mõõdistuspäeval esinenud varasemast tugevam tuul. Kõlaekraani kerke põhjusteks, seda eriti kõlaekraani keskosas, oli ilmselt nii tuule mõju, mis oli mõõdistuspäeval suunaga kõlaekraani alla kui ka temperatuurist põhjustatud soojuspaisumine, mida antud töös täpsema uurimise alla ei võeta.

³ TIN mudel on ebakorrapäraste kolmnurkade võrgustikust moodustunud reljeefimudel. [26]

KOKKUVÕTE

Antud uurimustöö eesmärk oli terrestriilise laserskaneerimise seadmeid kasutades uurida Tallinna lauluväljaku kõlaekraani deformatsioone, mis olid tingitud staatilisest lume koormusest kõlaekraani peal.

Kuigi tahhümeetrilise käigu projekteerimine aitas hoida kokku väärtuslikku aega välitööde ajal, ilmnisid mõõdistajate piiratud instrumendi tundmisest ning osalt ka instrumendi iseärasustest probleemid käigu rajamise alguses, mistõttu tuli orienteerimine teostada esialgse plaani väliselt, mis kokkuvõttes ei põhjustanud märkimisväärset ajakulu. Käigu rajamisel tekkis probleem ühe treegeriga, mistõttu tuli jätkata jägmisel päeval ning planeeritud ühe päeva asemel kulus kaks päeva. Edasised tegevused nagu kõrgusliku võrgu loomine ja skaneerimised teostati plaanikohaselt.

Probleemiks kujunes punktipilve modelleerimine ja vajalike elementide efektiivne väljatoomine, mis tulenes olemasolevate tarkvarade vähesest tundmisest ning spetsiifiliste modelleerimistarkvarade olematusest. Samas puudus ka võimalus konsulteerida vastava ala spetsialistidega. Töötlemise etapid õpiti võimalusel jooksvalt protsessi käigus ning katsetati erinevaid lahendusi vajaliku info kätte saamiseks punktipilvest. Sellest tulenevalt võib tulemusi hinnata rahuldavateks, kuid kõrgema täpsuse saavutamiseks ja juhuslike vigade vältimiseks tuleks põhjalikult tutvuda andmetöötluks vajaliku tarkvaraga ja võimaluste korral kasutada spetsiaalselt selleks loodud programme, mis tõstaksid efektiivsust ning täpsust.

Uurimisaluse objekti jaoks püstitatud eesmärgid täideti. Analüüsi tulemusena tuvastati lume raskusest tingitud deformatsioonid kõlaekraani erinevates piirkondades ning analüüsiti nende tekkepõhjuseid lume koguste erineva jaotumise alusel kõlaekraani peal. Lisaks määrati mõjuva lume koguse kaal. Kevadise mõõdistuse tulemustes ilmenenud kerked kõlaekraanil märgiti ära, kuid laiemalt võimalikke tekkepõhjuseid nagu soojuspaisumine ja tuul, selles uurimustöös vaatluse alla ei võetud. Lumest põhjustatud jääkdeformatsioone kevadel ei tuvastatud.

SUMMARY

Investigating deformations of the acoustic screen of the song festival tribune in Tallinn by using terrestrial laser scanning technologies.

The Main goal of this research is to investigate possible deformations caused by snow on the acoustic screen and its structural elements. Leica Scanstation C10 laser scanner was used to scan the acoustic screen from below and above. A Trimble M3 total station was used for designed traverse and accurate height was transferred to newly created points by using a Leica Sprinter 100M electronic level.

The first stage consisted of planning and designing the traverse around the song festival tribune. New points in this traverse were later used to orient the laser scanner through resection or by using known backsight on some of the known points. In this traverse three control points and one base line were used. Misclosures were adjusted using the internal program of the Trimble M3 Total stations which relied on Bowditch method in process of computing adjustments. Correct height was also levelled for these new points around song festival tribune by using one bench mark. Leveling was accomplished over a loop that reverted to the starting point.

For measuring deformations on the acoustic screen three scanning sessions were used. The first scanning session took place just before snowfall, the second one with a thick layer of snow and the third session in spring after the snow had thawed. The resulting scans provided three-point clouds from which unnecessary information was removed using a Leica Cyclone 8.0 and were left only with the points from acoustic screen and supporting arcs around it. AutoCAD was used for extracting location and height information from these point clouds, such as cross-sections of cables that formed the network to support the wooden panels for acoustic screen and cable connection points on the supporting arcs. With this form of information, three surfaces were created in AutoCAD and analysed from different cross-sections. Analyses concluded there were considerable deformations due to snow on the acoustic screen and these deformations were not uniform due to difference in the distribution of snow on the acoustic screen. It was also pointed out that for more accurate conclusions better and more specific programs for processing point clouds are needed.

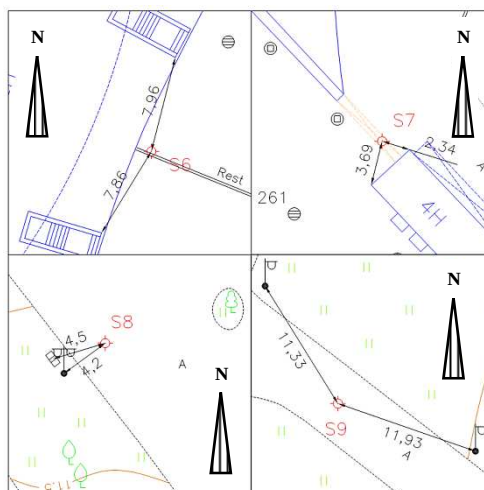
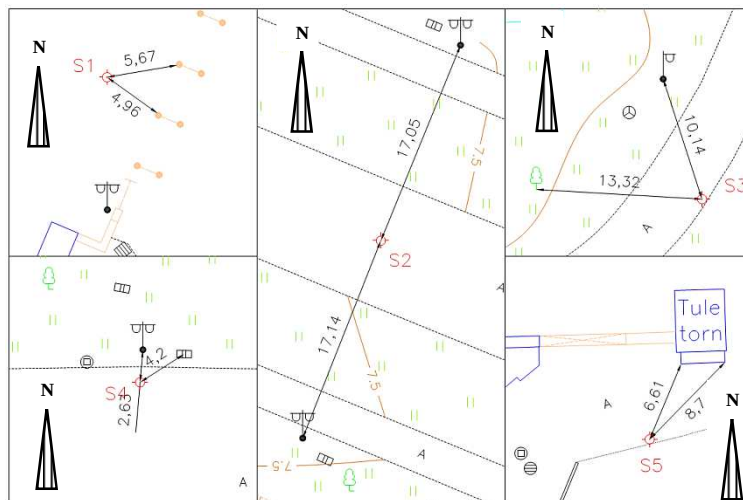
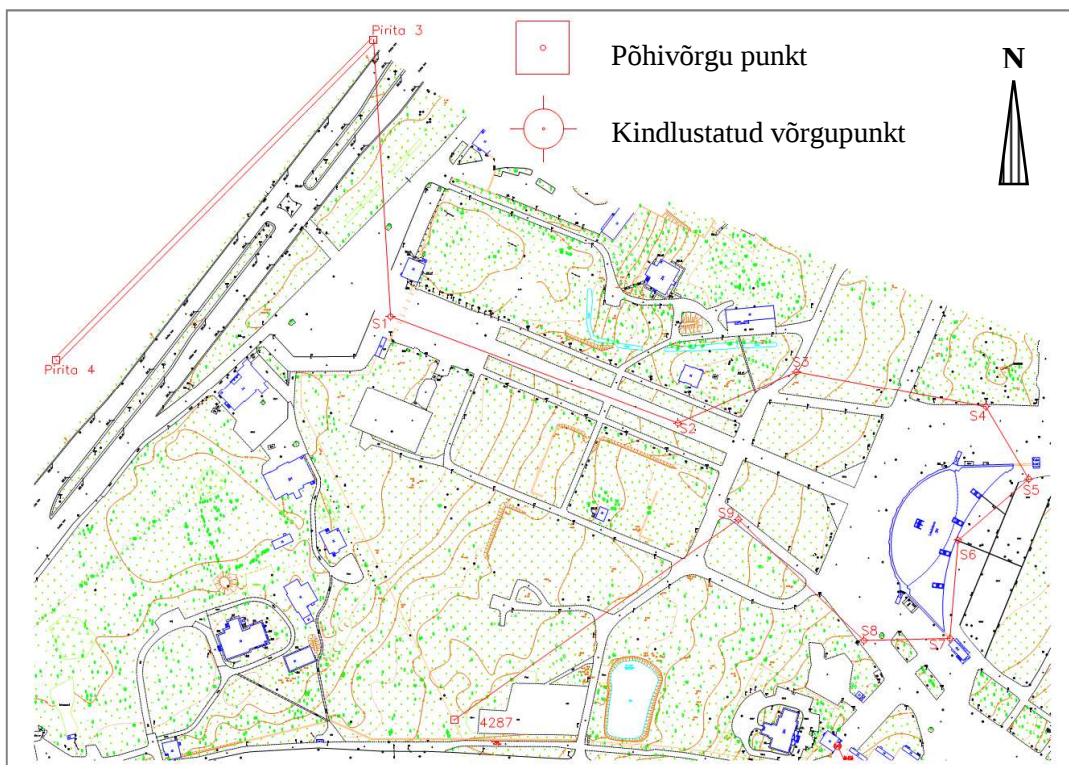
VIIDATUD ALLIKATE LOETELU

1. Poser, M. Cable Stayed Structures and Stay Cable Technology. [WWW]
<http://www.contech.co.nz/uploaded/Marcel%20Poser%20-%20Cable%20Stayed%20Structures%20and%20Stay%20Cable%20Technology.pdf>
(03.05.2013)
2. Kulbach, V. (2007). Cable Structures. Design and Static Analysis. Tln: Estonian Academy Publishers, 224.
3. Lauluväljak. Ajalugu. [WWW] <http://lauluvaljak.ee/tallinna-lauluvaljak/ajalugu/laulukaare-arhitektuur/> (03.05.2013)
4. 3D Risk Mapping. Theory and practice on Terrestrial Laser Scanning. [WWW]
https://lirias.kuleuven.be/bitstream/123456789/201130/2/Leonardo_Tutorial_Final_vers5_ENGLISH.pdf (07.05.2013)
5. Soudarissanane, S. Lindenbergh, R. Menenti, M. Teunissen, P. (2011). Scanning geometry: Influencing factor on the quality of terrestrial laser scanning points. - ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. USA: Elsevier B.V., 389-399.
6. Roy, S. K. (2010). Fundamentals of Surveying, Teine osa. Üheksas trükk. New Delhi: PHI Learning Private Limited, 606.
7. Surveying and Measurement. Traverse. [WWW]
http://www.sudeshnairs.webs.com/Surveying/7_UELSurveyingMeasurement.pdf (29.04.13)
8. Tata McGraw-Hill (2006). Surveying, Esimene osa. Neljas trükk. New Delhi: Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited, 633.
9. Ehitusgeodeetiliste uurimistööde tegemise kord. (2007). Riigi Teataja Lisa, 71, 1231.
10. Geosoft OÜ. Trimble M3 tootespetsifikatsioonid. [WWW]
<http://www.geosoft.ee/tooted/elektrontahhumeetrid/trimble-m3> (29.04.2013)

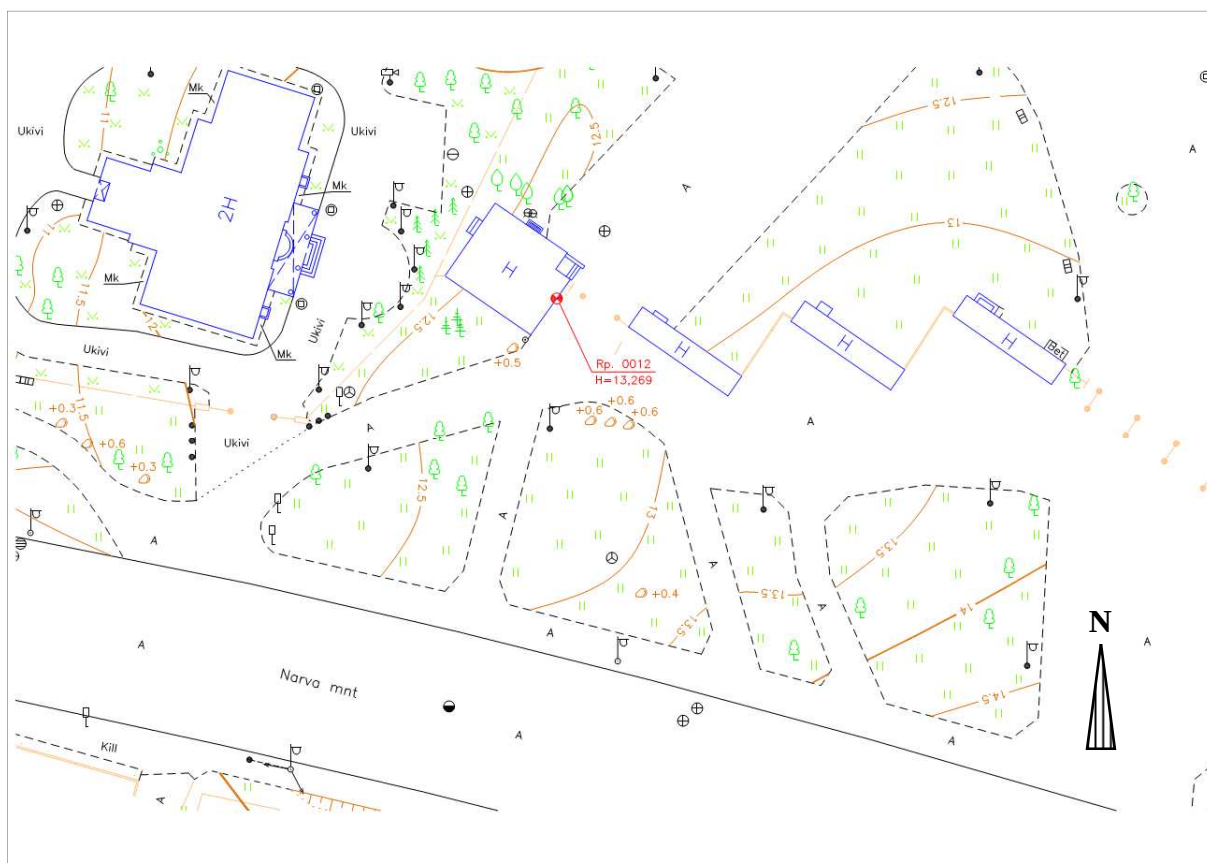
11. Jürgenson, H. Mõned standardid ja uued tehnoloogiad Elektrotahhümeetrias. [WWW] http://www.egu.ee/uploads/userfiles/file/geodeet/geo30_jyrgenson.pdf (29.04.2013)
12. I.V.A. LEON. Tootekataloog, Leica. [WWW] <http://www.ivalleon.ee/leica-sprinter-100-200/> (30.04.2013)
13. Leica-Geosystems. Leica Scanstation C10. Toote infoleht. [WWW] http://hds.leica-geosystems.com/downloads123/hds/hds/ScanStation%20C10/brochures-datasheet/Leica_ScanStation_C10_DS_en.pdf (29.04.2013)
14. Maa-amet. Geodeetiliste punktide andmekogu. [WWW] <http://xgis.maaamet.ee/xGIS/XGis> (15.11.2012)
15. Maa-amet. Geodeetiliste punktide andmekogu. [WWW] http://www.maaamet.ee/rr/geo/?refnr_id=51962 (12.02.2013)
16. Maa-amet. Geodeetiliste punktide andmekogu. [WWW] http://www.maaamet.ee/rr/geo/?refnr_id=51963 (12.02.2013)
17. Maa-amet. Geodeetiliste punktide andmekogu. [WWW] http://www.maaamet.ee/rr/geo/?refnr_id=48866 (14.02.2013)
18. Ranne, R. (2006). Geodeesia alused. Geodeesia II osa. Tln: Tallinna Tehnikakõrgkool, 76.
19. Maa-amet. Geodeetiliste punktide andmekogu. [WWW] http://www.maaamet.ee/rr/geo/?refnr_id=204207 (14.02.2013)
20. EMHI. Ilmavaatlused. [WWW] <http://www.emhi.ee/index.php?ide=21&ts=1353669161&go=3> (24.11.2012)
21. EMHI. Ilmavaatlused. [WWW] <http://www.emhi.ee/index.php?ide=21&ts=1360923087&go=4> (19.02.2013)
22. EMHI. Ilmavaatlused. [WWW] <http://www.emhi.ee/index.php?ide=21&ts=1368094774&go=4> (09.05.2013)

23. Mill, T. (2013) Tallinna Lauluväljaku kõlaekraani punktipilve töötlemise Leica Cyclone 8.0 [Aruanne]
24. EMHI. Kui palju kaalub lumi? [WWW]
<http://www.emhi.ee/index.php?ide=2&shownews=190> (06.05.2013)
25. Mill, T. (2013) Tallinna laululava kõlaekraani käitumise uurimine erinevates koormusolukordades terrestilise laserskaneerimise tehnoloogiaga [Projekt]
26. Tartu Ülikool. Digitaalsed kõrgusmudelid. [WWW]
<http://www.geo.ut.ee/kooligeo/EGCD/opik/juts/gis/dem.html> (15.05.2013)
27. Kima, V. (2013). Kindelpunktide asukoha skeemid. Joonis V. Kima valduses.
28. Kima, V. (2013). Skaneerimise jaamade asukoha skeemid. Joonis V. Kima valduses.

Lisa 1. Kindelpunktide asukoha skeemid [27]



Lisa 2. Reeperi asukohaskeem [27]

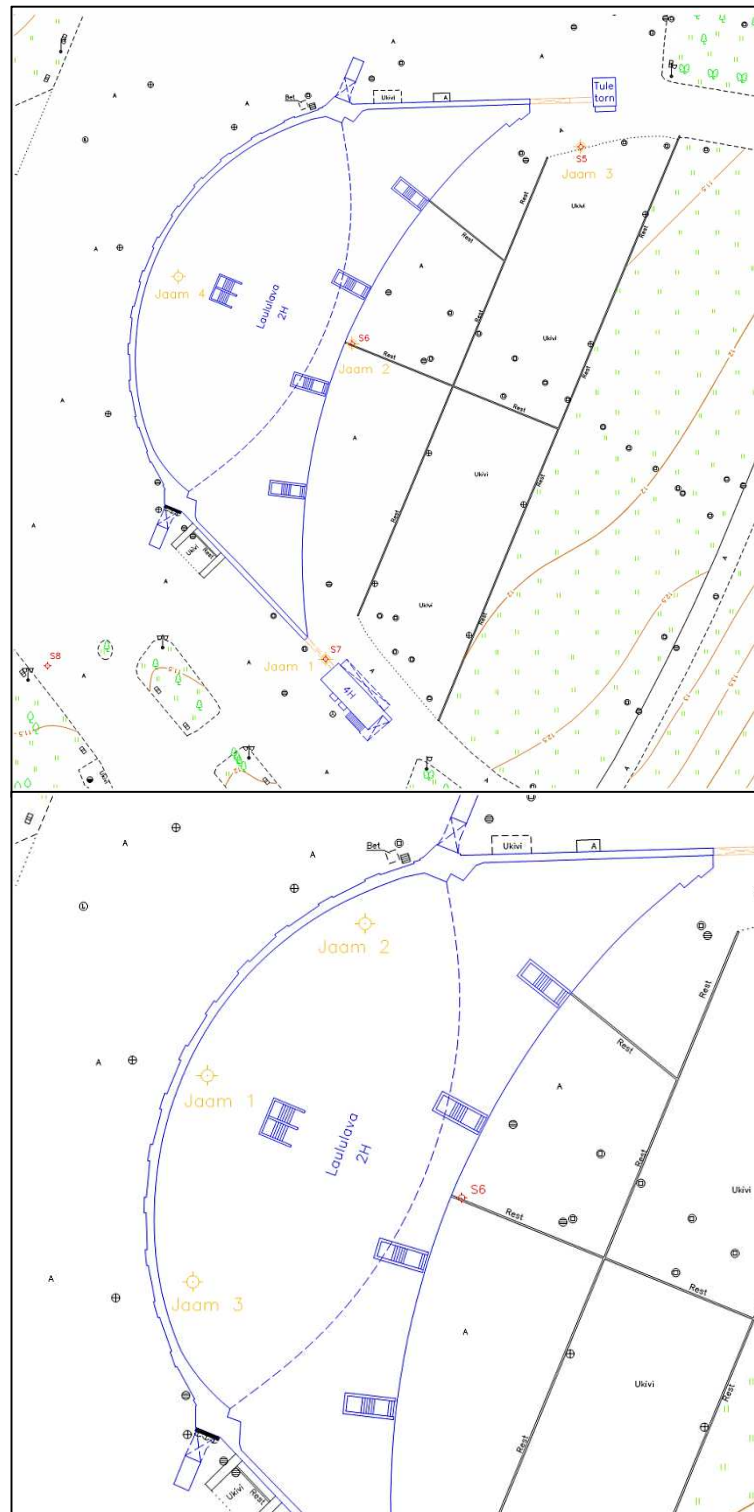


Lisa 3. Nivelleerimiskäigu tabel

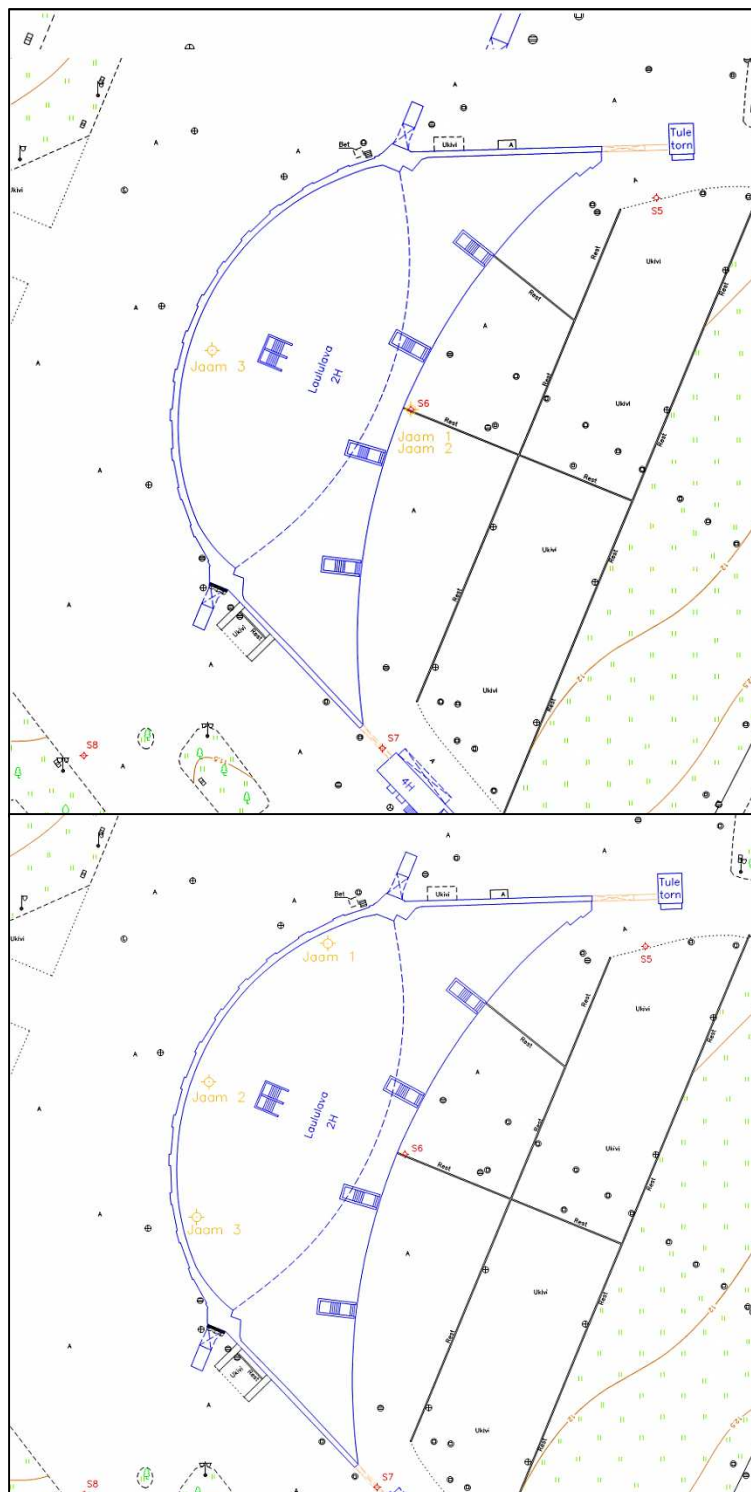
Jaamade nr	lati-punktid nr	Lugemid latilt m		Kõrguskas -vud ± m	Keskmise d kõrguskas -vud ± m	Parand ± m	Parandatud kõrguskasvu d± m	Absoluutsed või relatiivsed kõrgused m
		tagumisel t	eesmisel t					
I	1	0,337		-1,481	-1,481	0,001	-1,480	13,269
		0,205		-1,480				
	2		1,818					11,789
			1,686					
II	1	1,609		0,030	0,030	0,000	0,031	11,789
		1,492		0,030				
	2		1,578					11,819
			1,462					
III	1	1,320		-0,417	-0,417	0,001	-0,417	11,819
		1,211		-0,418				
	2		1,737					11,403
			1,628					
IV	1	1,235		-0,565	-0,565	0,000	-0,564	11,403
		1,112		-0,565				
	2		1,800					10,838
			1,677					
V	1	0,543		-2,099	-2,099	0,001	-2,099	10,838
		0,406		-2,100				
	2		2,641					8,740
			2,506					
VI	1	1,080		-1,226	-1,226	0,000	-1,226	8,740
		0,932		-1,226				
	2		2,306					7,514
			2,158					
VII	1	2,106		1,262	1,261	0,001	1,262	7,514
		1,979		1,261				
	2		0,844					8,776
			0,718					
VIII	1	2,788		2,423	2,424	0,000	2,424	8,776
		2,618		2,425				
	2		0,365					11,200
			0,194					
IX	1	2,714		2,069	2,069	0,000	2,069	11,200
		2,588		2,069				
	2		0,645					13,269
			0,520					
		26,273	26,281	-0,008	-0,004			
		-0,008		-0,004				

Käigu pikkus = 0,65 km

Lisa 4. Sügisese skaneerimise jaamade asukohad vastavalt kõlaekraani all ja –peal [28]



Lisa 5. Lumega skaneerimise jaamade asukohad vastavalt kõlaekraani all ja –peal [28]



Lisa 6. Kevadise skaneerimise jaamade asukohad kõlaekraani all [28]

