



1918
TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
TEEDEINSTITUUT

**TERRESTRILISE LASERSKANEERIMISE KAASAMINE
SILDADE KOORMUSKATSETUSTE GEODEETILISTEL
UURINGUTEL**

IMPLEMENTATION OF TERRESTRIAL LASER SCANNING
TECHNOLOGY IN GEODETIC OBSERVATIONS AT BRIDGE LOAD
TESTS

ETG 60 LT

Üliõpilane: **Hannes Lõhmus**

Juhendajad: **Prof. Artu Ellmann**

MSc. Silja Talvik

Tallinn 2014

KOKKUVÕTE

Käesolev väitekiri käsitles uudse terrestriilise laserskaneerimise tehnoloogia juurutamist sillakatsetuste geodeetilistel uuringutel. Seda meetodit rakendati sildade koormuskatsetusel vertikaalsuunaliste deformatsioonide määramisel ning võrreldi primaarselt tänapäeva ühe usaldusväärseima kõrgusmäärangu süsteemiga – täppisnivelleerimisega ning täiendavalt ka lasertahhümeetria ja mõõtekelladega. Võrdluste tulemused võimaldasid hinnata täpsust, mida on võimalik saavutada terrestriilise laserskaneerimisega (TLS) saadud punktipilve modelleerimisel.

TLS-i rakendati kahel, võrdlemisi äärmuslikes tingimustes läbi viidud silla koormuskatsetusel. Üks koormatavatest sildadest oli Loobu maantee-sild, millel viidi läbi purustav koormuskatse, kus mõõteinstrumente ei saanud ohtlikkuse tõttu silla alla ega peale paigaldada. See tingis olukorra, kus skanner tuli paigaldada silla kõrvale, kohta, kus laserkiirte peegeldumispinnad olid väga suured ($80\dots 87^\circ$). Teisel koormataval sillal, Tartu raudteeviaduktil viidi läbi enne silla täiskoormusega eksploatatsiooni andmist lisatava koormusega katse, kus kasutati silla arvutuslikust kandevõimest väiksemat koormust, mis võimaldas laserskanneri paigaldada ka otse koormatava silla alla.

TLS-i punktipilvede esmane andmetöötlus (registreerimine, puhastamine ja hõrendamine) viidi läbi Leica Cyclone tarkvaraga ning deformatsioonide arvutamiseks kasutati MathWorksi tarkvara Matlab. TLS-põhiste deformatsiooniarvutusteks moodustati koormuseta epohhi ja vastava koormusepohhi punktipilvedest võrkpinnad (*mesh*'id), mille vastavad väärtused lahutati aritmeetilise tehtena üksteisest. Loobu silla koormusepohhide skaneeringute punktipilved joondati umbes 1×1 cm võrgustikuks ning Tartu omad mõõtmismüra vähendamise eesmärgil umbes 5×5 cm võrgustikuks.

TLS-i võrdlemiseks teiste mõõtmismeetoditega võeti skaneeringust deformatsiooniväärtuste leidmiseks nivelleerimismärgi, tahhümeetri mõõtmispunkti või mõõtekella asukoha 5×5 võrguruudu suuruse ala ümbruses esinenud deformatsiooniväärtustest keskmine. Sellega välditi viga, mis võiks tekkida üksiku deformatsioonipinna ruudu väärtuse kasutamisega.

Loobu koormuskatsetusel küündisid deformatsioonid 200 tonnise täiskoormuse korral täppisnivelleerimise andmete põhjal 35,4 millimeetrini. Seejuures TLS-ist ja täppisnivelleerimisest saadud deformatsioonid erinesid lõunapoolse sillatala puhul vaid kuni 3,2 mm ja põhjapoolse sillatala puhul kuni 3,4 mm. Lõunapoolse tala jaoks olid TLS-põhised deformatsiooniväärtused väiksemad kui täppisnivelleerimise omad, põhjapoolse

tala puhul ilmnes aga vastupidine tendents. Skanner ise paiknes seejuures silla lõunapoolsel küljel.

Loobu sillamõõdistuse TLS ja tahhümeetria tulemuste võrdlemisel ilmnes, et TLS-ist saadud deformatsioonid olid pigem lähedasemad tahhümeetria deformatsioonidele kui täppisnivelleerimise omadele. Selle põhjuseks leiti olevat asjaolu, et nii TLS-i kui ka tahhümeetritega mõõdeti sillatalade deformatsioone, esimesel juhul talade alumistelt pindadelt ja teisel juhul talade külgedelt, aga täppisnivelleerimisega silladeki deformatsioone, ning talad deformeerusidki silladekist erinevalt. Lisaks ka see, et TLS-i ja lasertahhümeetrite tööpõhimõtted ning sellest tulenevalt mõõtmisvigade allikad on sarnased, mistõttu võivad nende instrumentide tulemused olla lihtsalt ühtmoodi ekslikud. Maksimaalselt erinesid TLS ja tahhümeetria põhised deformatsiooniväärtused lõunapoolse sillatala puhul kuni 1,9 mm ja põhjapoolse sillatala puhul kuni 2,8 mm, aga enamasti olid erinevused alla 1,0 mm.

Tartu koormuskatsetusel küündisid maksimaalsed deformatsioonid täppisnivelleerimise mõõtmiste põhjal 6,4 millimeetrini. TLS-ist ja täppisnivelleerimisest saadud väärtused erinesid üksteisest kuni 0,9 mm, kusjuures valdavalt olid TLS-ist saadud deformatsioonid suuremad. Sarnaselt võrdluses täppisnivelleerimisega andis TLS ka võrreldes mõõtekelladega süstemaatiliselt pisut suuremad deformatsioonid, erinedes kuni 1,3 mm. Kuigi TLS-i ja tahhümeetria võrdluses sarnast seaduspärasust ei esinenud, olid ka sel juhul saadud erinevused suhteliselt väikesed (kuni 1,2 mm).

Kuna antud töös määrati silla deformatsioonid TLS-i korduvmõõtmistest, oli oluline, et erinevate koormusepohhide skaneeringud oleksid samas koordinaatsüsteemis. Selleks viidi läbi erinevate skaneeringute tähis-tähisega (*target-to-target*) registreerimine. Tartu skaneeringute registreerimisvead olid nullilähedased. Loobus küündisid vertikaalsed vead üksikutel juhtudel 1 millimeetrini ning horisontaalsed vead kuni 4 millimeetrini. Kuna antud töös vaadeldi vaid vertikaalseid deformatsioone, võib öelda, et registreerimine mõjutas deformatsioonide väärtusi Loobu sillakatsetusel kuni 1 mm piires ning Tartus neid ei mõjutanud.

Lisaks hinnati TLS-iga deformatsioonide määramise täpsust koormusepohhide punktivilvedest võrkpindade modelleerimise täpsusega. Loobu lõunapoolsete sillatalade modelleerimise täpsused ulatusid kuni 0,8 mm ja põhjapoolsete sillatalade omad kuni 2,1 mm. Tartu võrkpindade modelleerimise täpsuseks oli 1,1 mm.

Antud uurimistööl võib öelda, et TLS-i punktivilvede modelleerimisega on võimalik määrata deformatsioone kuni 1 mm täpsusega. Küll aga tuleb arvestada, et

äärnuslikes tingimustes, kus laserkiirte peegeldumisnurgad on väga suured (üle 80°), on täpsus tagasihoidlikum. Seejuures tasuks alati TLS-i tulemusi muude meetoditega kontrollida. Töödel, mis nõuavad alla millimeetrist täpsust, TLS-i kasutada ei saa.

TLS-iga on võimalik määrata deformatsioone terve mõõdetava ala ulatuses, sh ka kohtades, kus esinevad ettearvamatud deformatsioonid, mis hõredate punktipõhiste mõõtmismeetoditega (täppisnivelleerimine, tahhümeetria, mõõtekellad) võiksid jääda märkamatuks. Lisaks saab TLS-i kui kaugseire tehnoloogiat rakendada purustava koormuskatse lõppfaasides, tagades seejuures ka skanneri operaatori ohutuse. Samas tuleb TLS-i puhul arvestada mõõtmismüraga, mis ei pruugi kajastada mõõdetava objekti tegelikku kuju ega deformatsiooni.

Peale selle saab laserskanneriga, kus on kaamera, ka pildistada. Saadud fotod annavad koormuskatsest visuaalse ülevaate ning omavad ka asukoha informatsiooni, mida saab kasutada deformatsioonide arvutamiseks.

Tulevastes töödes võikski skanneriga pildistamise potentsiaali lähemalt uurida ning võrrelda selle tulemusi tavapärase skaneeringutega. Lisaks võiks uurida erinevate mõõtmismüra filtreerimisalgoritmide mõju deformatsioonide määramise täpsusele.

SUMMARY

The current master thesis tackles implementation of novel terrestrial laser scanning technology (TLS) in geodetic observations at bridge load tests. This method was applied for determining vertical deformations at bridge load tests and compared primarily with the most accurate height determination technique – precise levelling, as well as with laser tacheometry and dial gauges. The comparisons also enabled to assess the accuracy of TLS possible to achieve for such applications.

TLS technology was used at two bridge load tests under relatively extreme conditions. At the Loobu highway bridge a rather unique destructive load test was carried out. Due to the hazardousness of the test the TLS station had to be placed at bridge-side, resulting in undesirably very large laser beam incidence angle values (80...87°). At a new railroad viaduct in Tartu a supplementary load test was carried out. Since the load used was not exceeding the designed carrying capacity of the viaduct the TLS station was established directly under the bridge-deck.

Initial data processing (registration, cleaning and data thinning) of TLS point clouds was carried out using the Leica Cyclone software, whereas calculation and visualization of deformations using the MathWorks Matlab program. Point clouds of the Loobu and Tartu bridge scanning epochs were modelled as 1×1 and 5×5 cm meshes, respectively. For TLS-based deformation calculations the zero-load epoch mesh was arithmetically subtracted from the corresponding load epoch mesh.

In order to compare the achieved TLS-based deformation results with those of other measurement technologies a low-pass filtering technique was applied. More specifically, the deformation value of a specific point of interest was averaged by using the surrounding 5×5 mesh squares. This is important to reduce the possible effect of using a single erroneous cell of the mesh in drawing any conclusions.

Precise levelling results reveal the Loobu bridge deformations reaching up to 35.4 mm. The deformations obtained from TLS and precise levelling differed only up to 3.2 and 3.4 mm for the southern and northern beam, respectively. TLS-based deformations for the southern beam were systematically smaller than those obtained from precise levelling, whereas for the northern beam an opposite tendency emerged. This could be due to very large incidence angles associated with the TLS measurements.

The match between the TLS and tacheometry results was slightly better. Differences in TLS- and tacheometry-based deformation values were mostly below 1.0 mm with a

maximum of 1.9 and 2.8 mm for the southern and northern beam, respectively. The discrepancies between the used techniques were found to be due to different deformational behaviour of the bridge beams and the bridge deck. Namely, both the TLS and tacheometry were used to determine the deformations of the bridge beams, whereas deformations of the bridge deck were monitored by the precise levelling. In addition to that, TLS and laser total stations have similar signal processing principles and hence the same sources of measurement errors.

At the Tartu bridge load test the maximum deformations according to precise levelling measurements reached 6.4 mm. The TLS-based values differed up to 0.9 mm from the levelling, with TLS-determined deformations being mainly larger. TLS-based deformations were also systematically higher than the dial gauge results, differing up to 1.3 mm. The differences between TLS and total station results were within 1.2 mm.

As the deformations were determined from the sequential TLS scans, it was essential that the scans of different load epochs were in the same coordinate system. For that purpose, target-to-target registrations were carried out. Registration errors for Tartu scans were estimated to be close to zero. In Loobu vertical errors reached up to 1 mm and horizontal errors up to 4 mm. Since only the vertical deformations were observed, registration affected the Loobu's deformation values within 1 mm, at Tartu it did not affect the results at all.

Additionally, the accuracy of the modelled meshes was estimated. For the Loobu southern and northern bridge beams it was estimated at 0.8 and 2.1 mm, respectively. The accuracy of the Tartu meshes was calculated to be 1.1 mm.

According to the results determining deformations with TLS could be carried out with an accuracy of up to 1 mm. However, in extreme conditions, where laser beam incidence angles are very large (over 80°) the accuracy could be poorer. In such cases, TLS results should be verified with other methods. For tasks demanding sub-millimetre accuracy, TLS cannot be used.

TLS has the capability of determining deformations over the entire surface, including unpredictable deformations in places where low-resolution point-wise technologies (such as precise levelling, tacheometry and dial gauges) could miss them. In addition to that, TLS as a remote sensing technology can be implemented in the final phases of destructive load test, thus ensuring the safety of the scanner operator. However, if using TLS, measurement noise has to be taken into account.

Moreover, TLS with a camera can be used for photographing. The acquired photos provide a visual overview of the test and carry positional information, which can be used in deformation calculation.

The potential of photographing with TLS could be investigated in the future works and compared with the results obtained from the traditional scans. Additionally, the influence of different noise filtering algorithms on the accuracy of deformation determination could also be investigated.