ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

OBOR GEODÉZIE A KARTOGRAFIE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Projekt, realizace a zhodnocení přesnosti kalibrační základny laserového skenování

Autor: Bc. Milan Kuta

Vedoucí práce: Ing. Zdeněk Vyskočil, Ph.D.

Praha, 2017

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
Fakulta stavební
Thákurova 7, 166 29 Praha 6

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Kuta Jméno: Milan Osobní číslo: 410916

Zadávající katedra: Katedra geomatiky

Studijní program: Geodézie a kartografie

Studijní obor: Geodézie a kartografie

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Projekt, realizace a zhodnocení přesnosti kalibrační základny laserového skenování.

Název diplomové práce anglicky: Project, realization and precision evaluation of laser scanning calibration basis.

Pokyny pro vypracování:
1. Návrh rozmístění bodového pole kalibrační základny s ohledem na požadovanou přesnost a rozsah kalibrace.
2. Realizace bodového pole.
3. Geodetické zaměření skenovacího etalonu a vyhodnocení přesnosti základny.
4. Kontrolní skenování a vyhodnocení přesnosti výsledku skenování.

Seznam doporučené literatury:

Jméno vedoucího diplomové práce: Ing. Zdeněk Vyskočil, Ph.D.

Datum zadání diplomové práce: 10.2.2017 Termín odevzdání diplomové práce: 21.5.2017
Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku

Podpis vedoucího práce Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v diplomové práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce" a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací".

10.2.2017
Datum převzetí zadání Podpis studenta(ky)

ABSTRAKT

Tato práce se zabývá návrhem a realizací kalibrační základny pro pozemní laserové skenery. Navrhuje rozmístění odrazných štítků pro určení prostorové přesnosti a přesnosti určení délky laserovým skenerem. Zaměření kalibrační základny proběhne velmi přesnou totální stanicí. Pomocí vytvořeného programu bude toto zaměření následně automaticky porovnáno se zaměřením vybranými laserovými skenery.

KLÍČOVÁ SLOVA

Kalibrační základna, pozemní laserové skenování, laserový skener, automatická kalibrace

ABSTRACT

This thesis describes desing and realization of calibration basis for terestrial laser scanners. Thesis design the placement of reflective targets to determine the spatial and length accuracy of laser scanner. Measurement of calibration basis will be make with very accurate total station. By own developed program will be this measurement autamatically compared with the measurement from chosen laser scanners.

KEYWORDS

Calibration basis, terrestrial laser scanning, laser scanner, automatic calibration

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literaturu, projekty) uvedené v přiloženém seznamu.

V Praze dne ....

Bc. Milan Kuta

Poděkování

Děkuji Ing. Zdeňku Vyskočilovi, Ph.D. za vedení mojí diplomové práce a za podnětné návrhy, které ji obohatily. Dále bych chtěl poděkovat firmě GEOREAL spol. s.r.o., jmenovitě Ing. Radkovi Houškovi za poskytnutí prostor a měřícího vybavení. Také bych chtěl poděkovat všem vlastníkům nemovitostí ve vnitrobloku ulic Hálkova, Skrétova a Bendova v Plzni, kteří mi umožnili vstup a instalaci odrazných štítků.

Bc. Milan Kuta

Obsah

1 Úvod **1**

2 Návrh kalibrační základny **3**
2.1 Návrh délkové základny 4
2.2 Návrh rozložení bodů pro prostorovou síť 4
2.3 Umístění rovinné desky a válce pro určení šumu 5
2.4 Porovnání částí naskenovaných modelů 5
2.5 Skenování ze speciálního nástavce na auto 5
2.6 Rozbor přesnosti před měřením základny 6

3 Realizace kalibrační základny **8**
3.1 Realizace bodového pole 8
3.2 Zaměření kalibrační základny 10
3.3 Vyrovnání bodů kalibrační základny 11

4 Přístroje testované na kalibrační základně **13**
4.1 Leica MS50 13
4.2 Riegel Z420i 13
4.3 Riegel VZ-2000 14
4.4 Surphaser 25HSX 14

5 Vyhodnocení **15**
5.1 Tvorba programu pro automatické vyhodnocení naskenovaných dat 15
5.2 Vyhodnocení naskenovaných dat 19
5.2.1 Vyhodnocení dat z přístroje Leica MS50 19
5.2.2 Vyhodnocení dat z přístroje Riegl Z420i 21
5.2.3 Vyhodnocení dat z přístroje Riegl VZ-2000 23
5.2.4 Vyhodnocení dat z přístroje Surphaser 25HSX 25
5.3 Návod na využití kalibrační základny s automatickým vyhodnocením 25

6 Závěr **27**

Literatura **29**

Seznam obrázků **30**

Seznam tabulek **30**

Seznam použitých zkratek **31**

Seznam použitých symbolů **31**

Seznam použitých programů **31**

Seznam příloh **32**

1 Úvod

Tato práce se zabývá tvorbou kalibrační základny pro laserové skenery. Při tvorbě této základny bylo spolupracováno s firmou GEOREAL spol. s r. o., která poskytla prostory pro tvorbu základny a přístrojové vybavení na její zaměření. Bylo vytvořeno prostorové bodové pole pro určení úhlových chyb skenerů. Také bylo vytvořeno bodové pole délkové kalibrační základny s přihlédnutím k standardně měřeným délkám orientací a možnostem vnitrobloku, kde je sídlo firmy a kde je tato kalibrační základna realizována. Body kalibrační základny byly zaměřeny velmi přesným přístrojem. Pro zvýšení přesnosti bodů bylo měření provedeno z několika stanovisek a všechna měření byla poté společně vyrovnána. Na základě souřadnic kalibrační základny a naskenovaných dat byl vytvořen program na automatické vyhodnocení. Program určí jednotlivé charakteristiky přístroje. Všechny výstupy byly následně uloženy do textových souborů a grafů, aby mohl být porovnán vývoj přesnosti v průběhu dalších let.

Základna byla vybudována z toho důvodu, že firma, se kterou spolupracuji, je firmou dodržující standardy normy ČSN EN ISO 9000 [1] a navazující normy. Tyto normy firmu zavazují k soustavnému zlepšování poskytovaných služeb a tím větší spokojenosti zákazníků. Tato práce, a s ní vytvořený program, přispěje k lepší znalosti charakteristik testovaných laserových skenerů. Tím se zlepší i znalost přesnosti souřadnicových mračen změřených testovanými přístroji.

Laserové skenery jsou bezkontaktní neselektivní a velmi rychlé měřící přístroje. Ze souřadnic určených těmito přístroji poté může být snadno vytvořen prostorový model předmětu nebo celé budovy. Jejich základní dělení je na polární skenery a skenery se známou délkou základny.

Polární skenery:

- Tyto skenery fungují podobně jako totální stanice. Jednotlivé body jsou určeny prostorovou polární metodou z naměřených úhlů a délek. Jako u totálních stanic, tak i u polárních laserových skenerů je částečně omezeno zorné pole přístroje. Toto omezení vždy závisí na konstrukčním řešení daného typu přístroje.

- Délky jsou určeny stejně jako u totálních stanic na základě měření tranzitního času nebo fázového rozdílu. Rychlost a přesnost měření poté ovlivňuje prostředí, kterým svazek prochází, skenovaný materiál a jeho natočení vůči skeneru. Dalším faktorem ovlivňujícím rychlost je způsob, jakým je rozmítán laserový paprsek.

- Rozmítání laserového paprsku je realizováno několika způsoby. Může být využito rotace samotného zdroje záření. Další způsob rozmítání paprsku je pomocí rotujícího zrcadla, či rotujícího odrazného hranolu. U rotujícího hranolu se pak rychlost skenování zvyšuje s počtem hran hranolu. Dále může být svazek rozmítán pomocí optických vláken nebo statického optického elementu.

Skenery se známou délkou základny:

- Souřadnice jsou určeny na základě protínání z úhlů. U jednokamerového systému je základna tvořena CCD kamerou a středem rotace zrcátka, kdy se snímá stopa laserového svazku na skenovaném objektu. U dvoukamerového systému je základna tvořena dvěma konvergentně zamířenými CCD kamerami a světelný řez je opět vytvořen laserem nebo projektorem [2].

- Tyto skenery se však využívají především ve strojírenství ke kontrole správnosti dílů. Proto nebudou testovány na vytvořené kalibrační základně.

Laserové skenery se využívají ve strojírenství na kontrolu vyrobených dílů. Další oblastí využití je skenování soch a historických budov, kde jsou lépe zachyceny nerovnosti stěn a zdobení na fasádách. Využití našly i při tvorbách map závodů, kdy jsou v naskenovaných datech velmi snadno vymodelována jednotlivá potrubí a produktovody. Skvěle se také dají využít při zjišťování objemů skládek materiálu nebo množství vytěženého materiálu z dolů a lomů.

Mezi vlivy působící na přesnost modelů, vytvořených pomocí laserového skenování, patří přesnost určení jednotlivých veličin, z kterých jsou polární metodou vypočteny prostorové souřadnice. Přesnost také závisí na geometrii a povrchu měřeného objektu. Mezi vlivy, které určují výslednou přesnost, patří také přesnost, s jakou byly určeny vlícovací body sloužící ke spojení skenů, nebo přesnost metody, která spojuje jednotlivé skeny na základě překrytu těchto skenů. Výsledné mračno bodů ovlivňuje i nastavená hustota skenování.

Před zahájením prací na vlastní kalibrační základně byly zkoumány přístupy ostatních geodetů. Všichni, kteří prováděli testování přesnosti laserových skenerů, nějakým způsobem testovali přesnost měření délek a úhlů. Testována byla ale i odrazivost laserového paprsku od různých materiálů, kdy byly prováděny testy na různých materiálech s různou barvou, a taktéž byl zkoumán vliv náklonu skenovaného materiálu vůči skeneru. Dále jsou uvedeny testy, které mě více či méně ovlivnily při tvorbě vlastní kalibrační základny.

Na Stavební fakultě Českého vysokého učení technického v Praze byly provedeny testy, zkoumající přesnost určení prostorové vzdálenosti mezi dvěma páry pravidelných čtyřbokých jehlanů. Skenování bylo provedeno skenerem Cyrax 2500, kdy byly v cílovém prostoru krom jehlanů umístěny ještě vlícovací body. Vzdálenosti určené ze skenu oblasti s vymodelovanými jehlany byly poté porovnány s geodetickým zaměřením [2].

Pracovníci na Hamburské univerzitě Hagen City provedli sérii testů laserových skenerů [3]. Pro zjištění odchylek vytvořili trojrozměrnou síť, kterou umístili v atriu budovy. Tím bylo dosaženo optimálního rozložení bodů v celém zorném poli skeneru. Pro testování odchylek délky vytvořili základnu s délkami po 10 metrech až do délky 100 metrů. Dalším testem bylo skenování desky pod různými úhly, kdy byly zjišťovány odchylky roviny proložené skenem a referenční roviny. Dále byla zjišťována velikost šumu v okolí hran a efekt barvy na měřenou vzdálenost.

Další obdobné testy byly popsány výzkumníky z univerzit v Mohuči [4] a v geodetickém a fotogrammetrickém institutu v Curychu [5].

Po pročtení těchto dokumentů a zvážení vlastních možností byl v této práci vytvořen a realizován návrh kalibrační základny a všech testů, které na ní budou provedeny a automaticky vyhodnoceny.

2 Návrh kalibrační základny

Pro vytvoření kalibrační základny byl zvolen dvůr ve vnitrobloku ulic Hálkova, Skrétova, Bendova a Klatovská třída v Plzni. Zde je sídlo firmy GEOREAL spol. s r.o., se kterou jsem při tvorbě základny spolupracoval.

Kalibrační základna bude vytvořena z prostorového bodového pole a délkové základny. Vlícovací body kalibrační základny budou zaměřeny jak z pevného stanoviska, které bude sloužit i pro kalibrační skeny, tak alespoň z jednoho volného stanoviska. Tento postup zajistí vyrovnání celé sítě a tím větší přesnost jednotlivých bodů. Pro další test bude umístěna rovinná deska a válec potažený odraznou fólií. Jako poslední test bude vybrána část domu pro porovnání odchylek mezi naskenovanými modely. U laserových skenerů bude zjištěna směrodatná odchylka vodorovného směru, zenitového úhlu a vzdálenosti. Po naskenování vlícovacích bodů bude také určen rozdíl souřadnic stanoviska. Tento rozdíl bude zjištěn pomocí Helmertovy shodnostní prostorové transformace.

Při vytvoření základny ve vnitrobloku je k umístění vlícovacích bodů třeba souhlasu majitelů jednotlivých nemovitostí. Kalibrační základna je plánována jako dlouhodobá bez nutnosti opětovného zaměření a vyrovnání celé sítě. Proto budou ke stabilizaci použity odrazné štítky místo nejčastěji využívaných kulových vlícovacích bodů. Štítků bude využito z důvodu jejich menších rozměrů a menších zásahů do fasády. Dalším důvodem použití štítků je automatizace vyhodnocení bez použití speciálních programů. Při skenování kulových cílů by musel být využit další program, který by skenovanými daty prokládal koule a určoval jejich středy. Přístroje použité na kalibrační základně jsou uzpůsobeny k měření na štítky a z přístroje lze přímo exportovat souřadnice středů štítků. Tím se stává automatické vyhodnocení jednodušším a uživatelsky méně náročným.

Pro jednoznačné určení středu štítku totální stanicí i laserovým skenerem byl s ohledem na vzdálenost vytvořen odrazný štítek (viz obr. 2.1) ze samolepicí fólie a samolepicí odrazné vrstvy o průměru 6 cm. Štítek bude umístěn na vyhovujících místech, kde bude fixován samolepicí odraznou vrstvou, popřípadě speciálním lepidlem, které odolá všem povětrnostním podmínkám a tím zajistí stálost sítě.

Obr. 2.1: Ukázka odrazného štítku

Před umístěním odrazných štítků budou jednotliví vlastníci dotázáni ohledně možnosti nalepení štítků. Díky tomu se nemusí návrh shodovat s vytvořeným bodovým polem.

2.1 Návrh délkové základny

Délková kalibrační základna bude situována ve vnitrobloku, od průjezdu domem v Hálkově ulici č. e. 12 přes železniční trať a bude ukončena na domě v Borské ulici č. e. 13.

Základna se bude skládat z pěti měřických štítků. Tyto štítky budou umístěny v přímce tak, aby nedošlo k zákrytu a mohli tak být skenerem jednoznačně identifikovány. Celková délka je volena s ohledem na nejčastěji měřené vzdálenosti orientací do 150 m. Štítky budou v této délce rozmístěny rovnoměrně. Toto rozmístění bude také ovlivněno rozložením objektů vhodných pro stabilizaci štítků.

Délková kalibrační základna bude proměřena z bodu shodného s bodem pro měření prostorové sítě. Taktéž bude provedeno zaměření z volného stanoviska.

2.2 Návrh rozložení bodů pro prostorovou síť

Návrh rozložení bodů prostorové sítě ve vnitrobloku byl zvolen tak, aby co nejlépe vyplňoval celý prostor a byla zajištěna viditelnost všech bodů.

Obr. 2.2: Návrh rozvržení bodů prostorové sítě - pohled jihozápadní

Obr. 2.3: Návrh rozvržení bodů prostorové sítě - pohled severozápadní

Body pro určení úhlové přesnosti laserového skeneru budou umístěny po třech štítcích v několika vzdálenostech. Při umisťování bude dbán důraz na vodorovnost, respektive svislost umístěné dvojice štítků.

2.3 Umístění rovinné desky a válce pro určení šumu

Rovinná deska a válec budou sloužit k určení délkové odchylky na ploše. Jejich zaměření proběhne pouze testovanými laserovými skenery, kdy budou do grafu vyneseny pouze odchylky délky ve směru normály.

Tyto objekty budou umístěny do prostoru, aby nemohly vznikat chyby z vícenásobného odrazu. Taktéž bude snaha o stabilní umístění kolmo ke skeneru. Jak vertikálně, tak horizontálně.

U rovinné desky se bude jednat o zbroušený plech čtvercového formátu 600 x 600 mm, který bude následně nastříkán barvou. Tím budou minimalizovány chyby z prohnutí a nehladkosti materiálu.

Pro zjištění odchylek na kulové ploše, bude použit plastový válec o průměru 315 mm. Na jeho části bude nalepena odrazná fólie pro lepší odrazivost.

2.4 Porovnání částí naskenovaných modelů

Jak již bylo zmíněno výše, při kalibračních skenech budou laserové skenery centrovány nad bodem kalibrační základny. Tím bude zajištěna pokaždé téměř stejná pozice. Po exportu souřadnic vlícovacích bodů a zjištění transformačního klíče bude tento klíč aplikován na všechny skenované body. Tímto se budou pořízené skeny ze všech přístrojů shodovat a bude tak moci být provedeno vyhodnocení odchylek na nerovném povrchu. Vyhodnocení souřadnic plochy může proběhnout například v programu *ArcMap*.

2.5 Skenování ze speciálního nástavce na auto

Pro simulaci podmínek v terénu a tím i zjištění reálné chyby přístroje při měření bude provedeno skenování ze speciálního nástavce na auto (viz obr. 2.4). Hodnoty by se neměly výrazně

měnit, ale přístroj může být ovlivněn chvěním motoru, který je neustále v chodu z důvodu dodávky elektrické energie přístrojům a taktéž z důvodu velkého rozdílu ve výdrži autobaterie.

Obr. 2.4: Speciální nástavec pro skenování z auta

2.6 Rozbor přesnosti před měřením základny

Na zaměření kalibrační základny bude použit přístroj Leica TS16 s charakteristikami danými výrobcem [6], které jsou uvedeny v následující tabulce (viz tab. 2.1). Přesnost směru dle ISO 17123-3 je určena pro směr určený v jedné skupině v obou polohách dalekohledu.

Veličina	Hodnota
Přesnost směru	0,3 mgon
Délková přesnost	1 mm + 1,5 ppm

Tab. 2.1: Tabulka charakteristik přístroje Leica TS16

Rozbor přesnosti bude vycházet z předpokladu, že dnes dostupné laserové skenery měří s přesností na několik milimetrů. Kalibrační základna je především navržena pro přístroje se střední třídou přesnosti P3 [7] (tj. přesnost 2 až 6 mm). Přesnost kalibrační základny proto bude vytvořena s požadovanou souřadnicovou směrodatnou odchylkou $\sigma_{P\,max}$ do 1,5 mm s ohledem na přesnost měření vzdálenosti u použitého přístroje.

Souřadnice vlícovacích bodů budou zaměřeny prostorovou polární metodou.

$$x = d * cos(\omega) * sin(\zeta) \tag{2.1}$$

$$y = d * sin(\omega) * sin(\zeta) \tag{2.2}$$

$$z = d * cos(\zeta) \tag{2.3}$$

Pomocí parciálních derivací vzorců jsou získány vzorce skutečných chyb souřadnic.

$$\epsilon_x = cos(\omega) * sin(\zeta) * \epsilon_d - d * sin(\omega) * sin(\zeta) * \epsilon_\omega + d * cos(\omega) * cos(\zeta) * \epsilon_\zeta \tag{2.4}$$

$$\epsilon_y = sin(\omega) * sin(\zeta) * \epsilon_d + d * cos(\omega) * sin(\zeta) * \epsilon_\omega + d * sin(\omega) * cos(\zeta) * \epsilon_\zeta \tag{2.5}$$

$$\epsilon_z = cos(\zeta) * \epsilon_d - d * sin(\zeta) * \epsilon_\zeta \tag{2.6}$$

Protože jsou známy směrodatné odchylky měření σ_ω, σ_ζ a σ_d, jsou rovnice skutečných chyb převedeny dle zákona hromadění směrodatných odchylek na vzorce směrodatných odchylek souřadnic.

$$\sigma_x^2 = cos^2(\omega) * sin^2(\zeta) * \sigma_d^2 + d^2 * sin^2(\omega) * sin^2(\zeta) * \sigma_\omega^2 + d^2 * cos^2(\omega) * cos^2(\zeta) * \sigma_\zeta^2 \quad (2.7)$$

$$\sigma_y^2 = sin^2(\omega) * sin^2(\zeta) * \sigma_d^2 + d^2 * cos^2(\omega) * sin^2(\zeta) * \sigma_\omega^2 + d^2 * sin^2(\omega) * cos^2(\zeta) * \sigma_\zeta^2 \quad (2.8)$$

$$\sigma_z^2 = cos^2(\zeta) * \sigma_d^2 + d^2 * sin^2(\zeta) * \sigma_\zeta^2 \quad (2.9)$$

Vzorec 2.12 pro směrodatnou odchylku polohovou σ_{P1} je poté získán součtem směrodatných odchylek souřadnic pod odmocninou.

Další zjištěný způsob je, že je ze skutečných chyb souřadnic vypočtena skutečná chyba polohová 2.10 [2].

$$\epsilon_P = \sqrt{\epsilon_x^2 + \epsilon_y^2 + \epsilon_z^2} \quad (2.10)$$

Dosazením a úpravou vzorce pro skutečnou chybu polohovou 2.10 vznikne vzorec 2.11.

$$\epsilon_P = \epsilon_d + d * sin(\zeta) * \epsilon_\omega + d * \epsilon_\zeta \quad (2.11)$$

Při známých směrodatných odchylkách měření je rovnice skutečné polohové chyby převedena dle zákona hromadění směrodatných odchylek na vzorec směrodatné odchylky polohové σ_{P2} 2.13. Pro určení směru musí být cíleno na počátek, proto jsou zvětšeny úhlové směrodatné odchylky odmocninou ze dvou. Pro výpočty jsou uvažovány následující hodnoty (viz tab. 2.2). Hodnoty jsou zvoleny jako maximální hodnoty, kterých může být v místě realizace kalibrační základny dosaženo.

Veličina	Hodnota
Δ_{max} zenitového úhlu	25 gon
Šikmá vzdálenost	80 m
Úhlová přesnost	0,42 mgon
Délková přesnost	1,12 mm

Tab. 2.2: Tabulka charakteristik přístroje Leica TS16

$$\sigma_{P1}^2 = \sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2 \quad (2.12)$$

$$\sigma_{P2}^2 = \sigma^2 + d^2 * sin^2(\zeta) * \sigma_\omega^2 + d^2 * \sigma_\zeta^2 \quad (2.13)$$

Po převedení úhlových hodnot z tabulky (viz tab. 2.2) na radiány a dosazení do vzorce 2.12 a 2.13 vyjdou následující hodnoty (viz tab. 2.3).

Veličina	Hodnota [mm]
σ_{P1}	1,3
σ_{P2}	1,3
σ_{Pmax}	1,5

Tab. 2.3: Tabulka polohové směrodatné odchylky

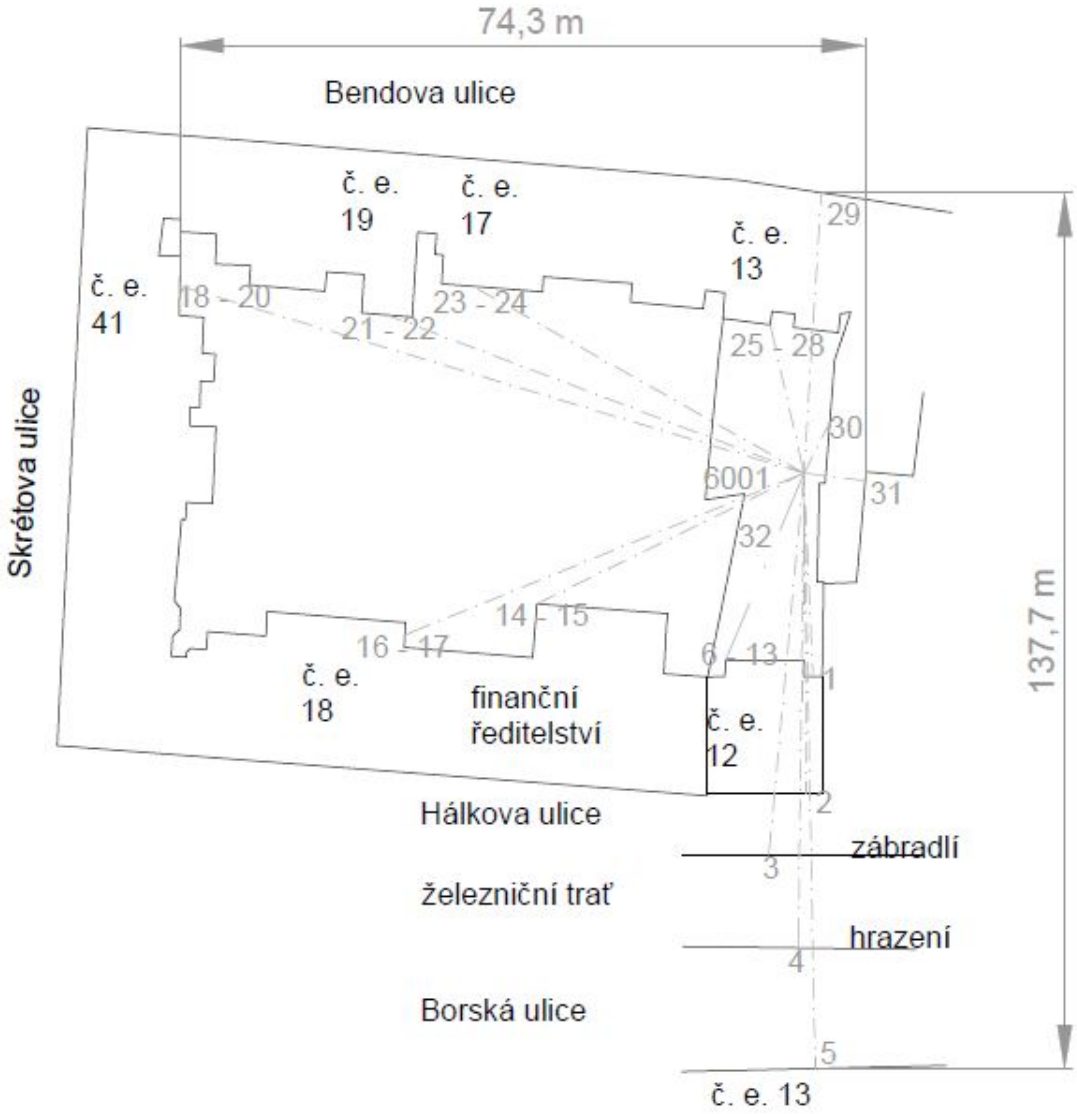
Polohové směrodatné odchylky nepřekračují maximální směrodatnou odchylku a proto bude dostatečné měřit v jedné měřické skupině. Pokud dojde k měření ze dvou stanovisek, je díky vyrovnání předpoklad snížení polohové směrodatné odchylky.

3 Realizace kalibrační základny

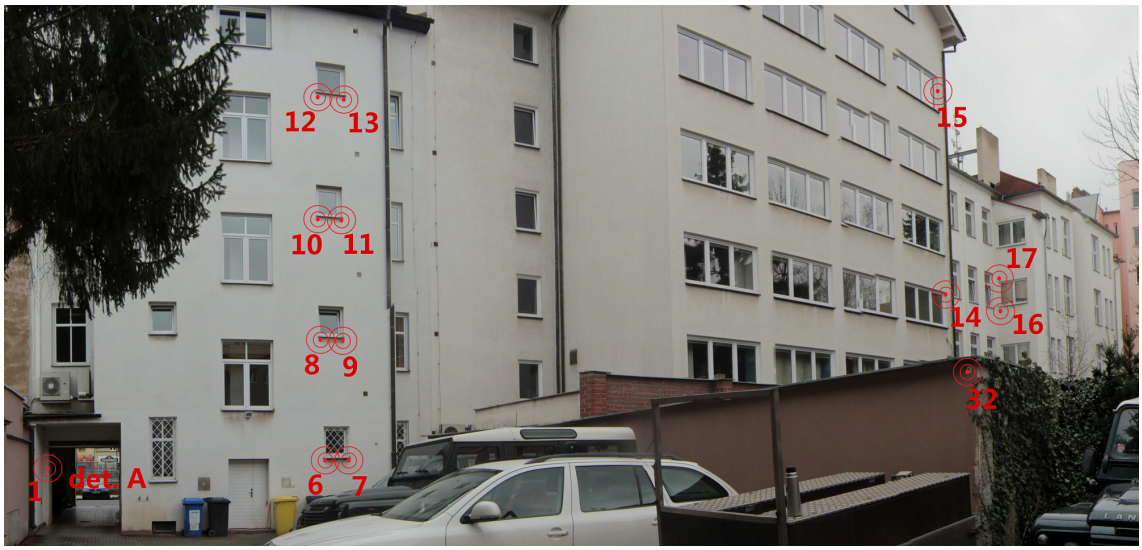
3.1 Realizace bodového pole

Na dvoře společnosti GEOREAL spol. s r.o. byla v místě s nejlepší viditelností provedena stabilizace stanoviska pomocí hřebu. Poté byly umístěny jednotlivé vlícovací body. U všech bodů sítě byl kladen důraz na viditelnost, stálost a pevnost podkladu a minimalizaci vlivu počasí. Umístění bodů bylo také ovlivněno minimálním vybavením pro práci ve výškách.

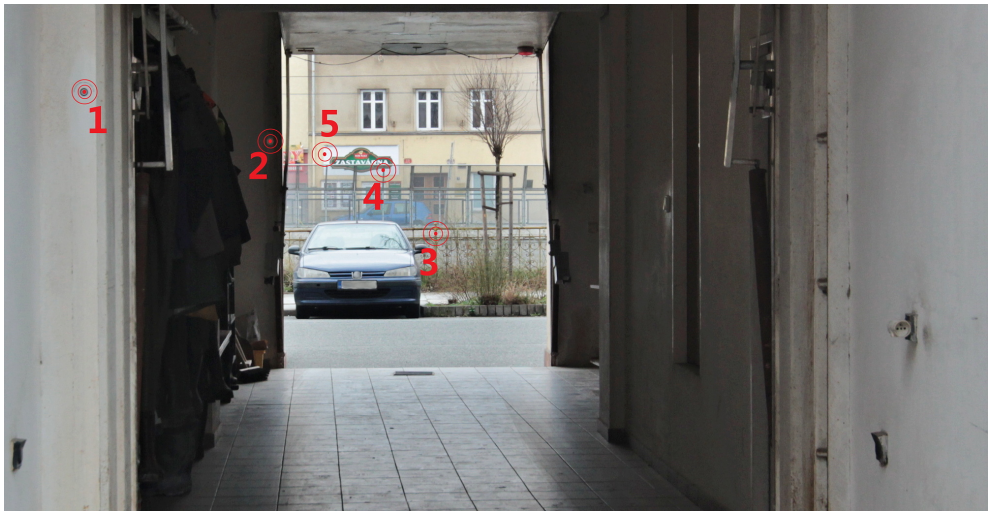
Realizace kalibrační základny byla provedena po dohodě o umístění značek s vlastníky. Jednotlivé vlícovací body jsou umístěny a očíslovány dle následujícího náčrtu (viz obr. 3.1). Pro jejich snadnější identifikaci v terénu jsou přiloženy fotografie s rozložením vlícovacích bodů při pohledu na jihozápad (viz obr. 3.2), pohledu na severozápad (viz obr. 3.4) a východ (viz obr. 3.5).



Obr. 3.1: Náčrt rozložení a očíslování bodového pole



Obr. 3.2: Fotografie skutečného rozvržení bodů prostorové sítě - jihozápadní pohled



Obr. 3.3: Fotografie skutečného rozvržení bodů prostorové sítě - detail A

Obr. 3.4: Fotografie skutečného rozvržení bodů prostorové sítě - severozápadní pohled

Obr. 3.5: Fotografie skutečného rozvržení bodů prostorové sítě - východní pohled

Návrh se od realizace bodového pole v umístění většiny vlícovacích bodů liší. Přesto je bodové pole rozmístěno v celé ploše. Na budovu v ulici Hálkova č. e. 12 a budovu v ulici Skrétova č. e. 41 bylo možné umístit více vlícovacích bodů než bylo zamýšleno. Díky snaze o umístění bodů v horizontální, respektive vertikální rovině bylo možné lépe určit jednotlivé směrodatné odchylky laserových skenerů.

3.2 Zaměření kalibrační základny

Zaměření kalibrační základny proběhlo dle stanoveného plánu. Nejprve byla provedena centrace a horizontace přístroje nad bodem základny 6001 a byly z něj zaměřeny všechny orientace v jedné měřické skupině. Následně byl přístroj přesunut na volné stanovisko a proběhlo opětovné zaměření všech vlícovacích bodů. Atmosférické korekce byly vypočteny přístrojem po vložení zjištěných hodnot teploty, tlaku a vlhkosti.

3.3 Vyrovnání bodů kalibrační základny

Vyrovnání bodového pole kalibrační základny proběhlo v programu Easynet. Do programu byla nahrána měření z přístroje Leica TS16 ve formátu mapa2. Byly nastaveny kontroly mezi polohami, kdy byly použity hodnoty směrodatných odchylek přístroje Leica TS16 (viz tab. 2.1). Krátká záměra mezi volným stanoviskem a bodem 6001 překročila takto nastavené odchylky. Proto byly hodnoty kontroly nastaveny dle následující tabulky (viz tab. 3.1) a u úhlových měření na bod 6001 byly nastaveny vyšší směrodatné odchylky, čímž byla snížena jejich váha ve vyrovnání.

Veličina	Hodnota
Rozdíl směrů mezi dvěma polohami	0,6 mgon
Rozdíl zenitových úhlů mezi dvěma polohami	0,6 mgon
Rozdíl délek mezi dvěma polohami	1,2 mm

Tab. 3.1: Tabulka hodnot použitých v kontrole měření v programu Easynet

Následně proběhlo vyrovnání sítě. V tabulce jsou vybrány nejdůležitější hodnoty z vyrovnání (viz tab. 3.2) a celý protokol je uveden v přílohách. Vstupní přesnost byla snížena pouze kvůli krátké zaměře mezi body 6001 a 7001. Mezi těmito body byl i přes snížení přesnosti vyrovnáním vyřazen jeden zenitový úhel. Ostatní měření bylo vyrovnáno bez problémů, proto byla pro směrodatné odchylky bodů a vyrovnaného měření použita aposteriorní směrodatná odchylka. Vyrovnané souřadnice se směrodatnými odchylkami byly po transformaci na bod a směrník vloženy do tabulky (viz tab. 3.3). Jako počátek soustavy pro transformaci byl zvolen bod 6001 a směrník na bod 1. Dále byl vytvořen výkres, kde jsou vyneseny měřené směry a zvětšené elipsy chyb. Pro lepší orientaci je do výkresu vložena katastrální mapa. Výkres je uveden v přílohách práce.

Veličina	Hodnota
Apriorní směrodatná odchylka	1
Aposteriorní směrodatná odchylka	0,680
Počet měření	195
Počet vyloučených měření	1
Počet nadbytečných měření	94

Tab. 3.2: Tabulka vybraných hodnot z protokolu o vyrovnání

Číslo bodu	X [m]	Y [m]	Z [m]	σ_X [mm]	σ_Y [mm]	σ_Z [mm]	σ_P [mm]
1	-0,0001	22,5304	9,5482	0,13	0,69	0,12	0,71
2	-1,0133	34,7817	9,7475	0,18	0,70	0,17	0,74
3	-4,3789	52,3189	8,7232	0,25	0,70	0,24	0,78
4	-6,5411	85,8672	10,2619	0,36	0,70	0,47	0,92
5	-6,0005	106,8699	11,1778	0,41	0,70	0,48	0,94
6	-7,7658	20,1510	9,6791	0,26	0,64	0,11	0,70
7	-8,4805	20,1020	9,6723	0,27	0,63	0,11	0,69
8	-7,7669	20,1421	13,1892	0,25	0,62	0,17	0,69
9	-8,4347	20,0978	13,1788	0,27	0,62	0,17	0,70
10	-7,7284	20,1383	16,6803	0,24	0,60	0,25	0,69
11	-8,4272	20,0924	16,6715	0,26	0,59	0,25	0,69
12	-7,6723	20,1433	20,2403	0,23	0,57	0,33	0,70
13	-8,6141	20,0840	20,2250	0,27	0,57	0,33	0,71
14	-29,6686	12,5329	16,0116	0,62	0,32	0,21	0,73
15	-29,6761	12,5338	24,5476	0,58	0,30	0,34	0,74
16	-45,3976	15,9309	18,2519	0,65	0,32	0,26	0,77
17	-45,4200	15,9451	20,0407	0,65	0,32	0,27	0,77
18	-67,3858	-24,6656	21,1662	0,66	0,38	0,34	0,83
19	-67,1481	-26,8726	21,4958	0,65	0,39	0,34	0,83
20	-67,1395	-26,8889	23,0461	0,65	0,39	0,35	0,83
21	-45,3317	-20,8521	20,2189	0,63	0,35	0,27	0,77
22	-45,3269	-20,8508	21,5256	0,63	0,35	0,28	0,77
23	-33,0850	-22,9585	13,0492	0,58	0,42	0,20	0,74
24	-33,0813	-22,9737	20,2325	0,57	0,41	0,27	0,75
25	-2,4868	-17,5556	9,4126	0,15	0,65	0,09	0,67
26	-2,4765	-17,1927	13,1556	0,14	0,65	0,20	0,69
27	-2,5143	-17,1940	16,3838	0,14	0,63	0,31	0,72
28	-2,5060	-17,1988	19,6308	0,14	0,58	0,40	0,72
29	3,5553	-30,8207	9,3018	0,19	0,69	0,14	0,73
30	2,8802	-4,4180	9,7362	0,13	0,17	0,06	0,22
31	6,9071	1,5887	10,8845	0,27	0,15	0,10	0,32
32	-6,1736	1,7813	10,1419	0,22	0,14	0,07	0,27
6001	-0,0001	-0,0001	7,8630	0,07	0,11	0,05	0,14
7001	-0,1065	-2,1761	1,5399	0,07	0,12	0,05	0,15

Tab. 3.3: Tabulka vyrovnaných souřadnic a jejich směrodatných odchylek

4 Přístroje testované na kalibrační základně

4.1 Leica MS50

Jedná se o automatizovanou totální stanici, která má navíc funkci skenování. K dispozici byl přístroj s označením R2000, který má dle manuálu [8] tyto charakteristiky přesnosti (viz tab. 4.1)[1].

Z toho vyplývá, že je tento přístroj stejné přesnosti jako Leica TS16, která byla použita na zaměření sítě. Zaměření vlícovacích bodů přístrojem Leica MS50 proto bude vždy bráno jako kontrolní zaměření stálosti sítě. Vyhodnocování přesností proto proběhne pouze kontrolně a hodnotit budeme jen odchylky zjištěné na skenech pořízených tímto přístrojem.

Veličina	Hodnota
Úhlová přesnost	0,3 mgon
Délková přesnost	1,2 mm
Minimální velikost úhlového kroku	neuvedeno
Nejkratší měřitelná vzdálenost	1,5 m
Nejdelší měřitelná vzdálenost	2000 m
Přesnost měření délky do 500 m	2 mm + 2 ppm
Přesnost měření délky nad 500 m	4 mm + 2 ppm

Tab. 4.1: Tabulka charakteristik přístroje Leica MS50

Šum měřené vzdálenosti je závislý na měřené vzdálenosti a rychlosti ukládání. Nabývá hodnot od 0,4 mm (při vzdálenosti do 10 m a rychlosti 1 Hz) až 6,0 mm (při vzdálenosti 200 m a rychlosti 1000 Hz). Tyto hodnoty jsou uvedeny pro měření na šedou odraznou desku Kodak.

4.2 Riegel Z420i

Tento starší pozemní laserový skener má možnost detekce vlícovacích bodů. Tato funkce lze spustit po předběžném skenu okolí a hrubém označení vlícovacích bodů. Zajímavou vlastností je možnost sklopení otočné osy přístroje a přiložení fotoaparátu pro přidání textury na vyhotovený sken. Přístroj má tyto charakteristiky (viz tab. 4.2). Přístroj pro rozmítání laserového paprsku využívá polygonového odražeče s několika odraznými plochami, který podle rychlosti skenování rotuje nebo osciluje. Výkon skenování bodů je maximálně 24kHz.

Veličina	Hodnota
Přesnost	10 mm
Preciznost	5 mm
Minimální velikost úhlového kroku	0,0111 gon
Nejkratší měřitelná vzdálenost	2 m
Nejdelší měřitelná vzdálenost	1000 m

Tab. 4.2: Tabulka charakteristik přístroje Riegel Z420i

[1] Přesnost určení délky vychází z tabulek daných výrobcem. Je brána hodnota pro průměrované měření vzdálenosti a maximální měřená délka do 150 m.

Testovaný přístroj byl vyroben v roce 2005. Od tohoto roku je aktivně využíván pro měření v terénu, proto jsou u přístroje předpokládány větší rozdíly od hodnot daných výrobcem [9].

4.3 Riegel VZ-2000

Laserový skener Riegel VZ-2000 je nástupcem skeneru Riegel Z420i. U tohoto přístroje je krom možnosti připojení fotoaparátu i možnost připojení GNSS antény pro určení souřadnic stanoviska. U přístroje byly v manuálu [10] vyhledány tyto charakteristiky (viz tab. 4.3). Laserový paprsek je rozmítán pomocí rotačního polygonového odražeče. Je schopen měřit až 400 000 bodů za vteřinu.

Veličina	Hodnota
Přesnost	8 mm
Preciznost	5 mm
Minimální velikost úhlového kroku	2,7 mgon
Nejkratší měřitelná vzdálenost	2,5 m
Nejdelší měřitelná vzdálenost	2000 m

Tab. 4.3: Tabulka charakteristik přístroje Riegel VZ-2000

4.4 Surphaser 25HSX

Přístroj Surphaser 25HSX je laserový skener s přesným dálkoměrem, který je využitelný především k tvorbě 3D modelů větších součástek ve strojírenství. To plyne i z jeho přesnosti a nejdelší měřitelné délky (viz tab. 4.4). Výrobce však doporučuje přístroj využívat v rozsahu 0,2-5 m. Pro rozmítání paprsku je využito rotační zrcátko. Přistroj má poté výkon měření až 190kHz [11].

Veličina	Hodnota
Úhlová přesnost	0,0111 gon
Délková rozlišitelnost	0,1 mm
Minimální velikost úhlového kroku	0,0111 gon
Nejkratší měřitelná vzdálenost	0,2 m
Nejdelší měřitelná vzdálenost	39 m

Tab. 4.4: Tabulka charakteristik přístroje Surphaser 25HSX

5 Vyhodnocení

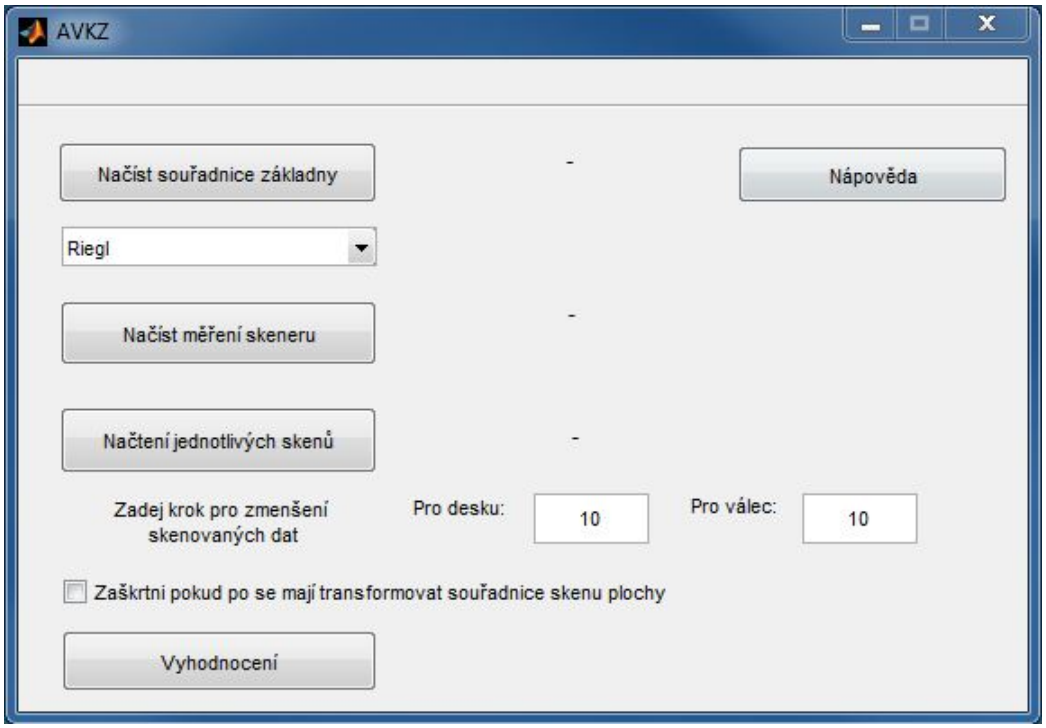
Na vytvořené kalibrační základně bude nejčastěji docházet pouze ke kalibraci přístrojů Riegel a Leica. Z tohoto důvodu bude vytvořený program na automatické vyhodnocení přizpůsoben výstupu z těchto přístrojů.

U zbývajícího testovaného přístroje Surphaser dojde pouze k samostatnému vyhodnocení jednotlivých charakteristik. Tento přístroj exportuje pouze souřadnice všech bodů a tak je automatické vyhodnocení téměř nemožné.

5.1 Tvorba programu pro automatické vyhodnocení naskenovaných dat

Program bude vytvořen v programu Matlab. Tento program pro automatické vyhodnocení bude vytvořen jako samostatně spustitelný program bez nutnosti vlastnit software společnosti MathWorks. Tím bude docíleno možnosti spustit vyhodnocení kalibrace na jakémkoliv zařízení.

Program se skládá z jednoduchého grafického rozhraní(viz obr. 5.1). Užívání je uživatelsky velmi jednoduché a jasné. Při nejasnostech slouží strukturovaná nápověda k vysvětlení funkcí jednotlivých tlačítek. Načítání textových souborů je ošetřeno základními chybovými zprávami, které budou popsány níže u popisu jednotlivých funkcí programu.



Obr. 5.1: Ukázka grafického rozhraní programu

- Načtení textového souboru se souřadnicemi je realizováno pomocí tlačítka *Načíst souřadnice základny*. Po kliknutí se ukáže okno pro vybrání textového souboru. Textový soubor bude umístěn ve složce s programem a proto bude snadno k vybrání. Při změně množství bodů kalibrační základny stačí vymazat souřadnice chybějících bodů a program se tomu přizpůsobí. Pokud bude okno zavřeno bez vybrání textového souboru se souřadnicemi, dojde k inicializaci varovného okna s příslušným textem. V okně programu se následně zobrazí text o nenačtení souřadnic základny.

- Načtení měření ze skeneru nebo multifunkční totální stanice je realizováno druhým tlačítkem *Načíst měření skeneru*. Před samotným načtením musí být v rozbalovacím menu zvolen přístroj, který byl pro skenování použit. Formát textového souboru pro oba přístroje musí být stejný jako v ukázkových souborech. Příslušné soubory jsou taktéž přiloženy u programu. Jejich formát je co nejvíce přizpůsoben možnostem exportu dat z přístroje. Stejně tak jako při načítání souřadnic se zobrazí textové pole o načtení měření a jeho počtu.

  Počet měření musí být o jedna menší než počet souřadnic. To je způsobeno uvedením souřadnic bodu 6001 v textovém souboru souřadnic základny. Pokud tato podmínka nebude splněna, program na to upozorní po spuštění tlačítka *Vyhodnocení*.

- K načtení skenovaných oblastí dojde po stlačení tlačítka *Načtení jednotlivých skenů*. Skeny musí být rozděleny do třech textových souborů. Sken desky, válce a plochy. U programu bude taktéž přiložen jeden ukázkový soubor. Tento soubor však vychází z textového souboru, který je výsledkem exportu, a proto by nemělo docházet k úpravám textových souborů s naskenovanými souřadnicemi. Nenačtení některého ze souborů bude doprovázeno příslušným chybovým oknem. Taktéž nebude možné pokračovat v celkovém vyhodnocení.

- Ve vyhodnocovacím programu jsou umístěna dvě okna umožňující vkládat krok pro zmenšení skenovaných dat pro desku a válec. Tato čísla zmenší vstupní soubory se souřadnicemi tak, že vyberou každý n-tý bod, který následně při vyhodnocení zobrazí v grafu. Program provádí zaokrouhlení takto vložených čísel na celá čísla. Také kontroluje, zda je číslo větší než 1. Pokud tato podmínka není splněna, zobrazí se chybové okno s touto informací. Chybové okno se zobrazí i za podmínky, že jedno z oken obsahuje nečíselné znaky.

- Při zaškrtnutí, že se mají transformovat souřadnice skenu plochy, dojde ve vyhodnocení k její transformaci. Možnost vypnutí byla přidána, protože je výpočet náročnější, a tím se velmi prodlužuje čas zpracování. Dalším důvodem je, že toto zpracování už není automatizováno a nemusí tak být vždy využito.

- Stisknutím tlačítka *Vyhodnocení* jsou spuštěny jednotlivé výpočetní funkce. Níže je popsán způsob, jakým program dle návrhu získává jednotlivé hodnoty. Při spuštění tohoto tlačítka program vyžaduje zvolení složky, do které bude ukládat jednotlivé výstupy. Proto je vhodné zvolit prázdnou složku s názvem jasně definujícím použitý přístroj.

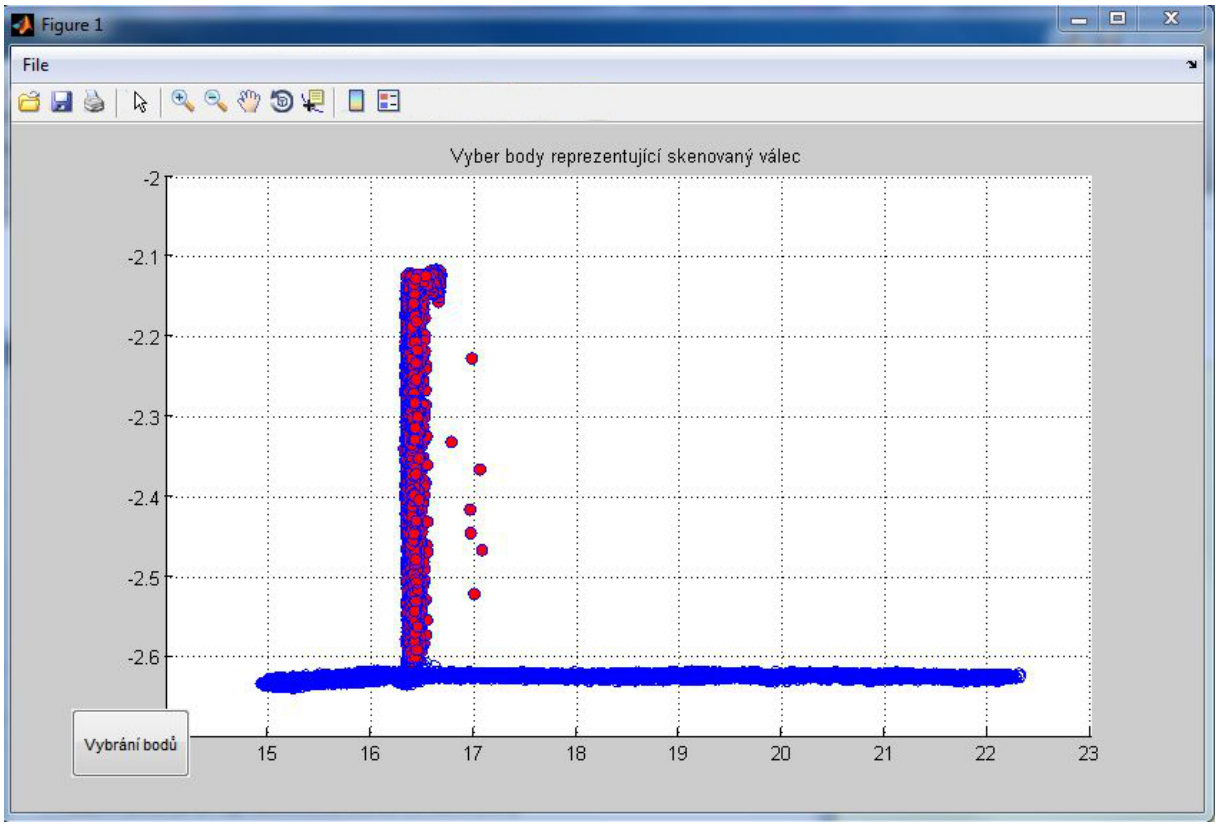
  Délky jsou vypočítány z prostorově určených vzdáleností mezi body základny 1 až 5. Výběrová směrodatná odchylka délky je získána z rozdílů délek určených v základním souřadnicovém systému a souřadnicovém systému skeneru. Na získání výběrové směrodatné odchylky z rozdílů byla použita funkce *var* [12], kdy byly jako váhy použity délky získané ze souřadnicového systému kalibrační základny. Rozdíly a výběrová směrodatná odchylka jsou následně exportovány do příslušného textového souboru.

  Odchylky horizontálního a zenitového úhlu jsou vypočítány taktéž ze souřadnic. Výpočet je proveden pomocí kosinovy věty. Pro výpočet horizontální směrodatné odchylky jsou brány pouze rovinné souřadnice bodů, protože pro určení této směrodatné odchylky jsou voleny pouze body, kdy je rozdíl výšek bodů minimální. Pro výpočet směrodatné odchylky zenitového úhlu je délka proti zjišťovanému úhlu vypočtena jako rozdíl výšek těchto bodů. Podobně jako v předchozím případě jsou k výpočtu zenitového úhlu voleny jen body, kdy

je polohový rozdíl bodů minimální. Výběrové směrodatné odchylky jsou bez využití vah taktéž vypočteny funkcí *var* [12]. Výsledné hodnoty jsou uloženy do textového souboru.

Transformace souřadnic je provedena pomocí Helmertovy shodnostní transformace, kdy byla pro výpočty využita funkce [13]. Pomocí této transformace je možné transformovat pouze pravotočivé souřadnicové systémy. Z tohoto důvodu je v této části programu převeden souřadnicový systém základny z levotočivé na pravotočivou souřadnicovou soustavu. Souřadnice bodů 3 až 5 jsou z transformace vyřazeny, aby nedocházelo k ovlivnění transformace, z důvodu špatného rozmístění bodů. Poloha bodu 6001 je po transformaci porovnána s centrem skeneru. Rozdíl polohy je způsoben částečně nedokonalou centrací. Taktéž z tohoto porovnání vyplyne případné odsazení středu skeneru. Tyto hodnoty jsou patrné z prvních dvou hodnot zjištěného transformačního klíče. Získaný transformační klíč a odchylky na jednotlivých bodech jsou uloženy do textových souborů mezi ostatní výstupy.

Při zpracování jednotlivých skenů je postupováno tak, že jsou zmenšeny podle nastaveného kroku. Podle hodnoty zadané uživatelem bude dále použit každý n-tý bod. Skeny jsou poté vyneseny do 3D grafu. V tomto grafu uživatel provede natočení a přiblížení celé soustavy tak, aby mohl vybrat pouze body určené ke zpracování. Výběr těchto bodů je realizován po zmáčknutí tlačítka *Vybrání bodů* (viz obr. 5.2). Vybrané body jsou nahrány do funkce *lsplane* [14], která metodou nejmenších čtverců proloží body rovinou a určí odchylky jednotlivých bodů od této roviny. Stejně funguje i funkce *lscylinder* [14], která proloží vybrané body válcem a určí odchylky bodů od válce. Do textového souboru je uložen počet vybraných bodů, maximální zjištěná odchylka a poloměr válce použitého na proložení bodů. Program taktéž k ostatním souborům uloží grafy zobrazující rozložení odchylek.



Obr. 5.2: Ukázka výběru dat pro další vyhodnocení

U nahraného skenu plochy dojde k transformaci všech bodů pomocí zjištěného transformačního klíče. Tento postup je zvolen proto, že v prostředí *Matlab* je další zpracování velice náročné a nelze ho automatizovat. Transformované souřadnice jsou tedy exportovány do textového souboru, z kterého je možnost je nahrát do dalšího softwaru jako je například *ArcMap*.

- Po stlačení tlačítka *Nápověda* dojde k otevření okna s nápovědou. Její obsah je téměř totožný s návodem na využití základny 5.3, který je popsán níže. Okno s nápovědou taktéž obsahuje stručný popis jednotlivých tlačítek.

5.2 Vyhodnocení naskenovaných dat

Vyhodnocení naskenovaných dat proběhne programem AVKZ (automatické vyhodnocení kalibrační základny), který je popsán výše 5.1. U skenerů značky Riegel jsou v manuálech od výrobce uvedeny i kalibrační protokoly [9] [10]. Proto bude porovnáno vyhodnocení programu s těmito protokoly.

5.2.1 Vyhodnocení dat z přístroje Leica MS50

Jak již bylo napsáno, přístroj Leica MS50 bude v dalších etapách využit pro kontrolu stálosti sítě. Níže jsou uvedeny tabulky z vyhodnocení a grafy četnosti rozdílů od proložené roviny, respektive válce. Tabulky odchylek po shodnostní transformaci, porovnání délek a tabulky porovnání horizontálního a zenitového úhlu jsou uvedeny v přílohách. Jsou převážně informativní a slouží hlavně pro ověření stálosti sítě.

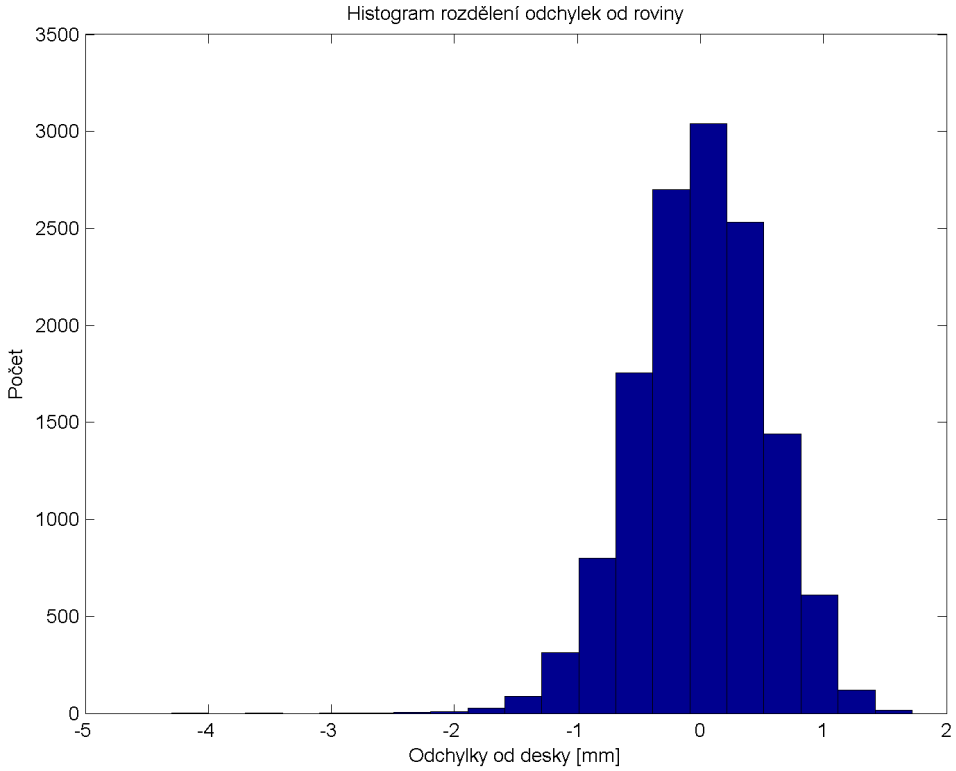
Charakteristiky přesnosti při skenování jsou zobrazeny v tabulce (viz tab. 5.2) a v grafu četnosti odchylek od proložené roviny (viz obr. 5.3) a válce (viz obr. 5.4).

Veličina	Hodnota
Maximální odchylka v souřadnici X	3,7 mm
Maximální odchylka v souřadnici Y	1,8 mm
Maximální odchylka v souřadnici Z	0,7 mm
Výběrová směrodatná odchylka rozdílu délky	0,5 mm
Výběrová směrodatná odchyla rozdílu horizontálního úhlu	1,55 mgon
Výběrová směrodatná odchyla rozdílu zenitového úhlu	0,45 mgon

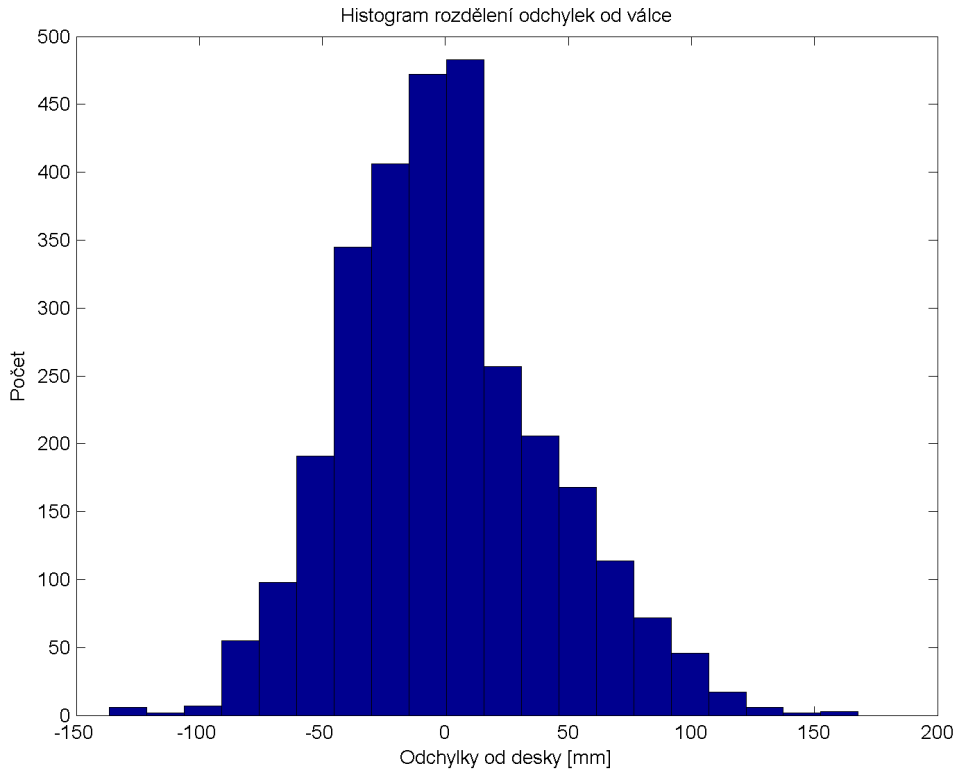
Tab. 5.1: Tabulka rozdílů určená z měření přístrojem Leica MS50

Veličina	Hodnota
Hodnoty pro desku	
Počet bodů na rovině	13463
Maximální odchylka od roviny	0,0043 m
Hodnoty pro válec	
Počet bodů na válci	2956
Maximální odchylka od roviny	0,1678 m
Poloměr proloženého válce	0,1474 m
Hodnoty pro plochu	
Počet bodů na ploše	29839

Tab. 5.2: Tabulka hodnot z vyhodnocení skenů přístroje Leica MS50



Obr. 5.3: Graf zobrazující rozložení odchylek od plochy pro přístroj Leica MS50



Obr. 5.4: Graf zobrazující rozložení odchylek od válce pro přístroj Leica MS50

5.2.2 Vyhodnocení dat z přístroje Riegl Z420i

Při automatickém vyhodnocení souřadnic získaných z tohoto přístroje byly získány níže uvedené výsledky.

Veličina	Hodnota
Maximální odchylka v souřadnici X	69,6 mm
Maximální odchylka v souřadnici Y	242,4 mm
Maximální odchylka v souřadnici Z	9,7 mm
Výběrová směrodatná odchylka rozdílu délky	1,4 mm
Výběrová směrodatná odchylka rozdílu horizontálního úhlu	5,53 mgon
Výběrová směrodatná odchylka rozdílu zenitového úhlu	2,66 mgon

Tab. 5.3: Tabulka rozdílů určená z měření přístrojem Riegl Z420i

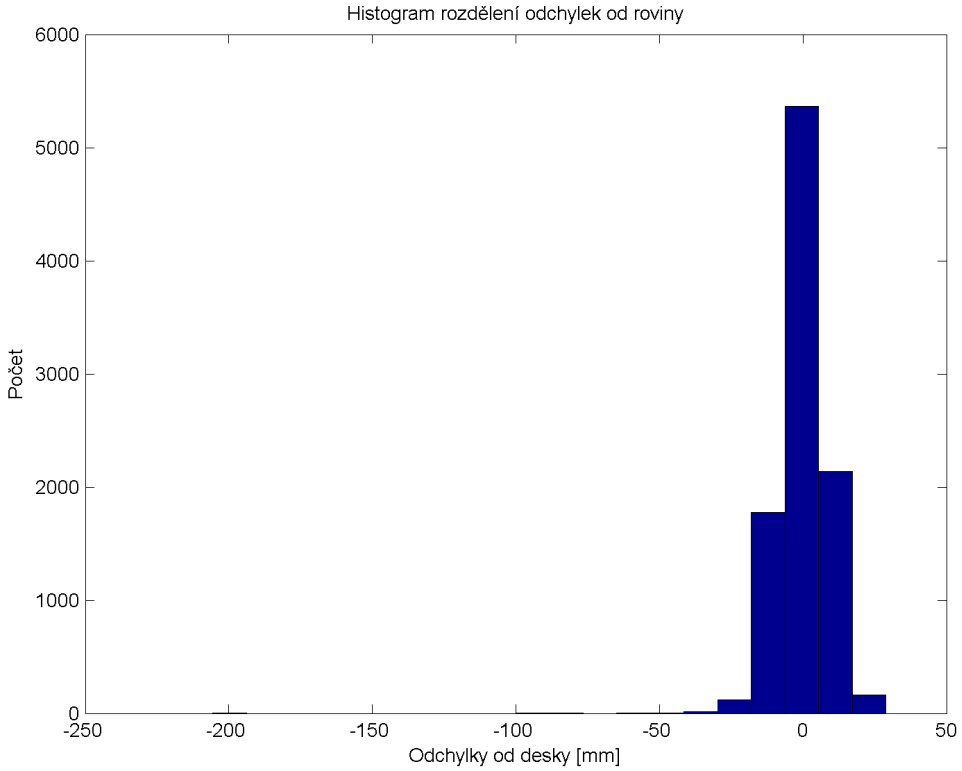
Veličina	Hodnota
Hodnoty pro desku	
Počet bodů na rovině	9587
Maximální odchylka od roviny	0,2056 m
Hodnoty pro válec	
Počet bodů na válci	7761
Maximální odchylka od roviny	0,1588 m
Poloměr proloženého válce	0,1603 m
Hodnoty pro plochu	
Počet bodů na ploše	492492

Tab. 5.4: Tabulka hodnot z vyhodnocení skenů přístrojem Riegl Z420i

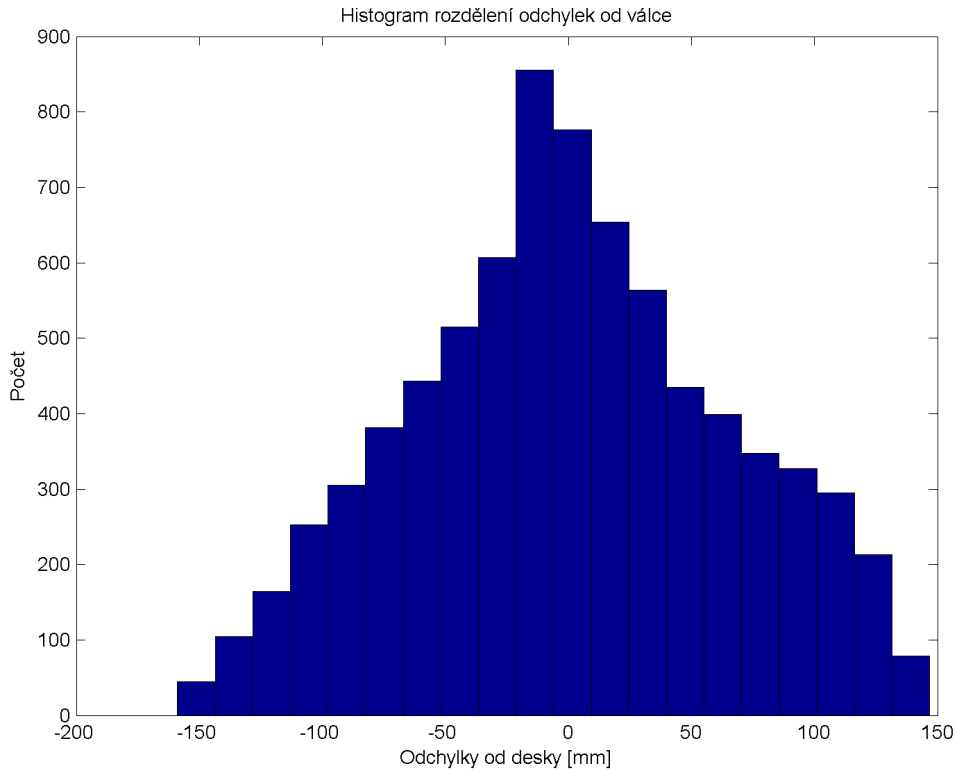
V protokolu z kalibrace provedené výrobcem jsou uvedeny délky pro různé povrchy (viz tab. 5.5). Jsou zde uvedeny i maximální odchylky pro jednotlivé povrchy, kdy do tohoto čísla už je započten i faktor chyby velikosti měřené délky. V protokolu je uvedeno, že výrobce počítá s hodnotou 20 ppm. Celý protokol je uveden v přílohách práce.

Cíl	Nominální hod. [m]	Měřená hod.[m]	Povolená odchylka [mm]
Bílá zeď	14,282	14,289	± 10
Cílový terč q≥ 80%	129,249	129,260	± 13
Cílový terč q≥ 10%	131,325	131,325	± 13
Odrazný štítek	147,109	147,106	± 13

Tab. 5.5: Tabulka přesnosti měření z kalibračního protokolu dodaného k přístroji Riegl Z420i



Obr. 5.5: Graf zobrazující rozložení odchylek od plochy pro přístroj Riegl Z420i



Obr. 5.6: Graf zobrazující rozložení odchylek od válce pro přístroj Riegl Z420i

5.2.3 Vyhodnocení dat z přístroje Riegl VZ-2000

Při automatickém vyhodnocení souřadnic získaných tímto přístrojem byly získány hodnoty uvedené v následujících tabulkách.

Veličina	Hodnota
Maximální odchylka v souřadnici X	4,7 mm
Maximální odchylka v souřadnici Y	4,2 mm
Maximální odchylka v souřadnici Z	3,5 mm
Výběrová směrodatná odchylka rozdílu délky	1,9 mm
Výběrová směrodatná odchylka rozdílu horizontálního úhlu	2,36 mgon
Výběrová směrodatná odchylka rozdílu zenitového úhlu	1,74 mgon

Tab. 5.6: Tabulka rozdílů určená z měření přístrojem Riegl VZ-2000

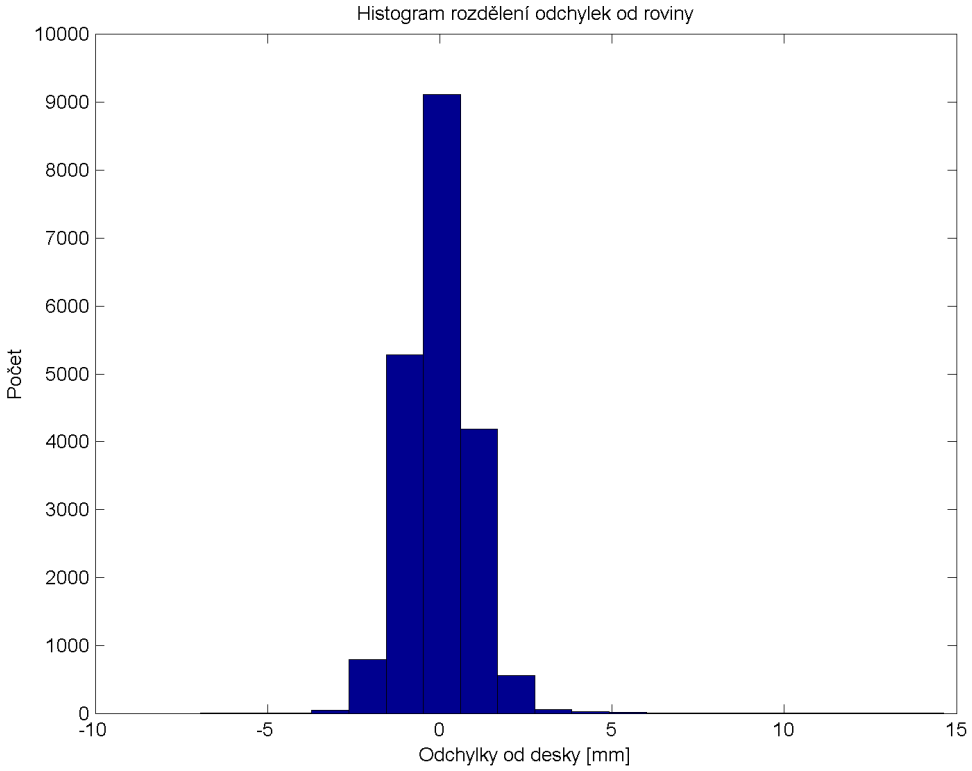
Veličina	Hodnota
Hodnoty pro desku	
Počet bodů na rovině	20097
Maximální odchylka od roviny	0,0146 m
Hodnoty pro válec	
Počet bodů na válci	17153
Maximální odchylka od roviny	0,1414 m
Poloměr proloženého válce	0,1474 m
Hodnoty pro plochu	
Počet bodů na ploše	863640

Tab. 5.7: Tabulka hodnot z vyhodnocení skenů přístrojem Riegl VZ-2000

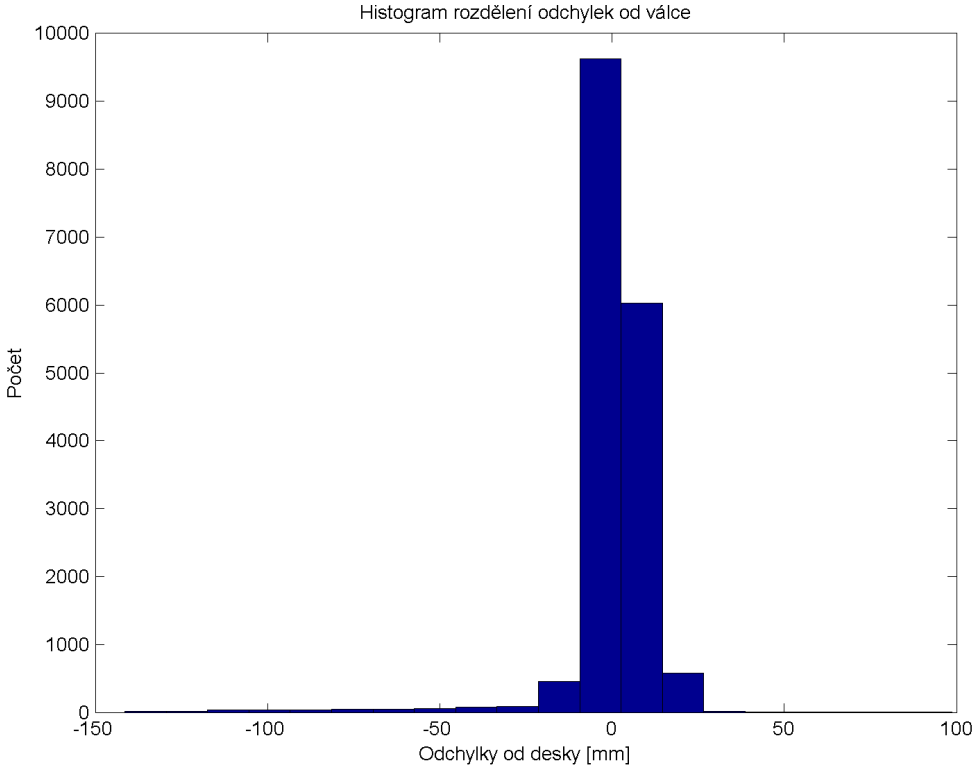
V protokolu z kalibrace provedené výrobcem jsou uvedeny délky pro různé povrchy (viz tab. 5.8). Jsou zde uvedeny i maximální odchylky pro jednotlivé povrchy, kdy do tohoto čísla už je započten i faktor chyby velikosti měřené délky. Hodnota chyby závislé na měřené vzdálenosti však není v protokolu uvedena. Celý protokol je uveden v přílohách práce.

Cíl	Typ měření	Nom. hod.[m]	Měř. hod. [m]	Povol. odch. [mm]
Odrazná fólie (ø50mm)	Odrazný cíl	11,279	11,278	± 8
Cílový terč q≥ 80%	1010 kHz	101,873	101,872	± 9
Cílový terč q≥ 80%	50 kHz	101,873	101,875	± 9
Cílový terč q≥ 10%	1010 kHz	101,899	101,897	± 9
Cílový terč q≥ 10%	50 kHz	101,899	101,902	± 9
Odrazná fólie (ø150mm)	Odrazný cíl	137,525	137,520	± 10

Tab. 5.8: Tabulka přesnosti měření z kalibračního protokolu dodaného k přístroji Riegl VZ-2000



Obr. 5.7: Graf zobrazující rozložení odchylek od plochy pro přístroj Riegl VZ-2000



Obr. 5.8: Graf zobrazující rozložení odchylek od válce pro přístroj Riegl VZ-2000

5.2.4 Vyhodnocení dat z přístroje Surphaser 25HSX

U tohoto přístroje bylo při exportu zjištěno, že nemohou být exportovány pouze souřadnice vlícovacích bodů. Při exportu všech souřadnic bylo dosaženo počtu téměř pěti milionů bodů. S tak velkým množstvím bodů už nelze v programu Matlab s využitím mého hardwarového vybavení pracovat v celku. Tím se smysluplné rozdělení takového množství bodů na menší mračna ukázalo jako neproveditelné. Z těchto důvodů nebylo vyhodnocení uskutečněno.

5.3 Návod na využití kalibrační základny s automatickým vyhodnocením

1. Nad bodem kalibrační základny č. 6001 je třeba provést centraci a horizontaci přístroje umožňujícího provést tyto úkony. Nejlépe přístrojem Leica MS50 nebo přístrojem umožňujícím skenování a disponujícím odpovídající přesností. Do přístroje musí být nastaveny správné hodnoty pro výpočet atmosferických korekcí. Pro správnou funkci programu je důležité nastavit nulové souřadnice stanoviska. Při zaměřování jednotlivých vlícovacích bodů musí být dodrženo číslování bodů podle obrázků v kapitole 3.1. Pořadí jejich zaměření již nemusí být dodrženo.

2. Po provedené centraci a horizontaci musí být přístroj vyjmut z trojnožky a nahrazen speciálním nástavcem, na kterém bude upnut skenovací přístroj (viz obr. 5.9). V provedeném prvotním skenu musí být vybrány pro přesnější naskenování jednotlivé vlícovací body ve správném pořadí. Po přesnějším naskenování vlícovacích bodů je nutné zkontrolovat průměry cílových značek. Tyto průměry by se měly blížit hodnotě 6 cm. Následně musí být vybrány plochy pro přesnější naskenování desky, válce a stěny. Takto musí být postupováno u všech testovaných skenerů.

Obr. 5.9: Speciální nástavec pro upnutí skeneru do trojnožky

3. Export souřadnic z jednotlivých přístrojů musí odpovídat ukázkovým datům, která jsou přiložena u programu. Při správném exportu se jedná o změny, které je možné provést v textovém editoru za použití funkce *Najít a Nahradit*. U přístroje použitého pro kontrolu stálosti sítě je lepší provést export souřadnic s přesností na čtyři desetinná místa. Správné vyhodnocení nezávisí na pořadí bodů v exportovaných souborech.

4. Po zapnutí programu AVKZ proveďte načtení souřadnic kalibrační základny. Soubor s těmito souřadnicemi musí obsahovat pouze body využité při aktuální etapě měření. Po zvolení přístroje použitého pro skenování proveďte načtení jednotlivých vstupních textových souborů pomocí příslušných tlačítek. Před stiskem vyhodnocení je vhodné nastavit redukci

dat získaných skenováním předmětů. Redukce závisí především na výkonu počítače použitého pro vyhodnocení. Také je důležité zvolit, zda chcete transformovat souřadnice skenu plochy pro další zpracování v jiném softwaru.

5. Vyhodnocení proběhne téměř celé automaticky po zmáčknutí příslušného tlačítka a zvolení složky pro ukládání dat. Vyhodnocení délkové základny, transformace a úhlových odchylek proběhne hned po zvolení složky.

   Pro vyhodnocení jednotlivých skenů se vždy zobrazí okno, v kterém budou do grafu vyneseny všechny body. Pro výběr bodů, které reprezentují hledaný útvar, musí být nejprve provedeno optimální natočení celého grafu. Toto natočení a přiblížení jde vykonat pomocí tlačítek nacházejících se v horní liště okna. Po správném natočení musí být zmáčknuto tlačítko *Vybrání bodů*. Po stisknutí dojde k inicializaci vyskakovacího okna. Toto okno ignorujte do doby než označíte všechny požadované body. Poté vypněte inicializované okno a následně i okno s grafem. Pokud nedodržíte tento postup, nedojde k uložení vybraných bodů a celý proces bude muset být opakován. Stejně postupujte i u druhého skenu.

6. Tímto je vyhodnocení úspěšně ukončeno a veškeré výstupní soubory jsou uloženy do zvolené složky. Zde je možné zjistit výsledky a porovnat je s dřívějšími etapami měření nebo s hodnotami uvedenými v protokolu z kalibrace provedené výrobcem.

7. Při nesprávném uložení výsledných souborů je potřeba postupovat dle pokynů chybových oken. Pokud toto nepomáhá, je nutné znovu zkontrolovat formát vstupních souborů a počty bodů v souborech. Pokud chyba stále přetrvává, kontaktujte tvůrce programu.

6 Závěr

Cílem této práce bylo vyhotovení návrhu a následná realizace kalibrační základny pro laserové skenery. Základna byla vytvořena ve vnitrobloku společnosti GEOREAL spol. s r.o.. Byla provedena série testů za účelem zjistit přesnost vybraných laserových skenerů. Ke kalibrační základně byl vyvinut program AVKZ (automatické vyhodnocení kalibrační základny) pro vyhodnocení naskenovaných dat.

Při návrhu rozmisťování bodů kalibrační základny bylo dbáno na rovnoměrné rozmístění bodů sítě. Pro určení směrodatných odchylek horizontálního a zenitového úhlu byly vybrané body zdvojeny tak, aby jejich vzájemná vzdálenost a rozdíl převýšení, polohy byl minimální. Ke změnám docházelo podle možností rozmístění, které byly dojednány s jednotlivými vlastníky. Celkem bylo rozmístěno třicet dva odrazných štítků a jeden měřický hřeb, který slouží jako stabilizace stanoviska pro měření. Pro určení šumu bylo zvoleno nejoptimálnější umístění desky a válce. Taktéž byla zvolena část zdi pro porovnání přesnosti výsledného modelu.

Zaměření základny bylo provedeno přesnou totální stanicí ze dvou stanovisek. Na každém stanovisku bylo dle rozboru před měřením měřeno v jedné měřické skupině. Toto zaměření bylo vyrovnáno v programu *EasyNET*. Vybrané hodnoty z protokolu o vyrovnání jsou uvedeny v tabulce (viz tab. 6.1). Kompletní protokol je uveden v přílohách práce spolu s výkresem sítě. Vyrovnáním byly získány souřadnice se směrodatnými odchylkami uvedenými v tabulce (viz tab. 3.3).

Veličina	Hodnota
Apriorní směrodatná odchylka	1
Aposteriorní směrodatná odchylka	0,680
Počet měření	195
Počet vyloučených měření	1
Počet nadbytečných měření	94
Maximální polohová odchylka σ_P	0.94 mm
Požadovaná přesnost $\sigma_{P\,max}$	1,5 mm

Tab. 6.1: Tabulka dokládající přesnost sítě kalibrační základny

Měření ze skenerů značky Riegl a Leica byla vyhodnocena programem AVKZ a jejich výsledky jsou uvedeny v kapitole 5.2 a v přílohách. Vyhodnocení z přístroje Surphaser se nepodařilo kvůli velkému množství bodů v jednom souboru, protože taková operace v programu Matlab kladla příliš velké nároky na výkon vlastněného hardwarového vybavení.

Z celkových vyhodnocení vyplývá, že použité přístroje Riegl dosahují lepších přesností, než deklaruje výrobce (viz tab. 6.2). Větší odchylky jsou vždy na jednom nebo dvou bodech. Protože se nejedná vždy o stejný bod, lze vyvodit, že při měření došlo k náhodné hrubé chybě. Kalibrační základna tedy byla změřena správně a s dostatečnou přesností.

Přístroj	Hodnota
Výběrová sm. odchylka rozdílu délky	
Leica MS50	0,5 mm
Riegl Z420i	1,4 mm
Riegl VZ-2000	1,9 mm
Výběrová sm. odchylka rozdílu horizontálního úhlu	
Leica MS50	1,55 mgon
Riegl Z420i	5,53 mgon
Riegl VZ-2000	2,36 mgon
Výběrová sm. odchylka rozdílu zenitového úhlu	
Leica MS50	0,45 mgon
Riegl Z420i	2,66 mgon
Riegl VZ-2000	1,74 mgon

Tab. 6.2: Tabulka odchylek získaných z měření

Při porovnání výsledků ze skenování desky jsou uvedené maximální odchylky taktéž ojedinělé (viz tab. 6.3). Rozložení odchylek je nejlépe vidět v jednotlivých grafech v kapitole 5.2.

Při proložení skenovaných dat válcem již nejsou výsledky tak jednoznačné jako u skenování desky. Skutečný poloměr válce je 157,5 mm. K této hodnotě se s rozdílem jednoho centimetru blíží všechny použité skenery (viz tab. 6.3). Rozložení odchylek je také nejlépe zobrazeno v grafech v kapitole 5.2.

Přístroj	Hodnota
Maximální odchylky od desky	
Leica MS50	4,3 mm
Riegl Z420i	205,6 mm
Riegl VZ-2000	14,6 mm
Maximální odchylky od válce	
Leica MS50	167,8 mm
Riegl Z420i	158,8 mm
Riegl VZ-2000	141,4 mm
Poloměr proloženého válce	
Leica MS50	147,4 mm
Riegl Z420i	160,3 mm
Riegl VZ-2000	147,4 mm

Tab. 6.3: Tabulka odchylek získaných z měření

Z hodnot uvedených v této práci vyplývá, že byl návrh a následné vyhotovení kalibrační základny provedeno správně a s dostatečnou přesností. Díky malé časové náročnosti může být základna spolu s programem na zpracování využívána k častější kontrole přesnosti přístroje. Získané výsledky přispějí ke zkvalitnění poskytnutých služeb.

Literatura

[1] ČSN EN ISO 9000. Systémy managementujakosti - základní principy a slovník, Praha: Český normalizační institut, 2016.

[2] ŠTRONER Martin a České vysoké učení technické v Praze. Katedra speciální geodézie. *3D skenovací systémy.* Vyd. 1. Praha: České vysoké učení technické, 2013. ISBN 9788001053713;8001053717.

[3] Klaus Mechelke, Thomas P Kersten, and Maren Lindstaedt. *Comparative investigations into the accuracy behaviour of the new generation of terrestrial laser scanning systems.* HafenCity University Hamburg, Department Geomatics, 2007.

[4] Wolfgang Boehler, M Bordas Vicent, and Andreas Marbs. *Investigating Laser Scanner Accuracy.* Institute for Spatial Information and Surveying Technology, FH Mainz, University of Applied Sciences, 2003.

[5] Hilmar Ingensand, Adrian Ryf, and Thorsten Schulz. *Performances and experiences in terrestrial laserscanning.*

[6] Leica Geosystems AG. *Leica TS16 - Uživatelská příručka.* 2016.

[7] prof. Ing. Jiří Pospíšil CSc. Teorie fungování terestrických skenovacích systémů. fyzikální principy skenovacích systémů. bezpečnost práce. [cit. 2017-05-16]. Dostupné z: `http://k154.fsv.cvut.cz/vyuka/geodezie/lsk.php`.

[8] Leica Geosystems AG. *Leica MS50/TS50/TM50 - User Manual.* 2013.

[9] RIEGL LASER MEASUREMENT SYSTEMS GmbH. *3D TERRESTRIAL LASER SCANNER Z420i - Technical Data.* 2005.

[10] RIEGL LASER MEASUREMENT SYSTEMS GmbH. *3D TERRESTRIAL LASER SCANNER RIEGL VZ-2000 - Technical Data.* 2015.

[11] GIM International Dr Mathias Lemmens, editor-in-chief. Terrestrial laser scanners. [cit. 2017-05-08]. Dostupné z: `http://www.utdallas.edu/research/interface/Resources/LASERSCANNERS/productsurvey_v_pdfdocument_18.pdf`.

[12] MathWorks. Matlab documentation [online]. [cit. 2017-05-08]. Dostupné z: `https://www.mathworks.com/help/matlab/ref/var.html`.

[13] Peter Wasmeier. Matlab documentation [online]. [cit. 2017-05-08]. Dostupné z: `https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/9696-geodetic-transformationsl`.

[14] Ian Smith. Euramet [online]. [cit. 2017-05-08]. Dostupné z: `http://www.eurometros.org/gen_report.php?category=distributions&pkey=14&subform=yes`.

Seznam obrázků

2.1 Ukázka odrazného štítku . . . 3
2.2 Návrh rozvržení bodů prostorové sítě - pohled jihozápadní . . . 4
2.3 Návrh rozvržení bodů prostorové sítě - pohled severozápadní . . . 5
2.4 Speciální nástavec pro skenování z auta . . . 6
3.1 Náčrt rozložení a očíslování bodového pole . . . 8
3.2 Fotografie skutečného rozvržení bodů prostorové sítě - jihozápadní pohled . . . 9
3.3 Fotografie skutečného rozvržení bodů prostorové sítě - detail A . . . 9
3.4 Fotografie skutečného rozvržení bodů prostorové sítě - severozápadní pohled . . . 10
3.5 Fotografie skutečného rozvržení bodů prostorové sítě - východní pohled . . . 10
5.1 Ukázka grafického rozhraní programu . . . 15
5.2 Ukázka výběru dat pro další vyhodnocení . . . 18
5.3 Graf zobrazující rozložení odchylek od plochy pro přístroj Leica MS50 . . . 20
5.4 Graf zobrazující rozložení odchylek od válce pro přístroj Leica MS50 . . . 20
5.5 Graf zobrazující rozložení odchylek od plochy pro přístroj Riegl Z420i . . . 22
5.6 Graf zobrazující rozložení odchylek od válce pro přístroj Riegl Z420i . . . 22
5.7 Graf zobrazující rozložení odchylek od plochy pro přístroj Riegl VZ-2000 . . . 24
5.8 Graf zobrazující rozložení odchylek od válce pro přístroj Riegl VZ-2000 . . . 24
5.9 Speciální nástavec pro upnutí skeneru do trojnožky . . . 25

Seznam tabulek

2.1 Tabulka charakteristik přístroje Leica TS16 . . . 6
2.2 Tabulka charakteristik přístroje Leica TS16 . . . 7
2.3 Tabulka polohové směrodatné odchylky . . . 7
3.1 Tabulka hodnot použitých v kontrole měření v programu Easynet . . . 11
3.2 Tabulka vybraných hodnot z protokolu o vyrovnání . . . 11
3.3 Tabulka vyrovnaných souřadnic a jejich směrodatných odchylek . . . 12
4.1 Tabulka charakteristik přístroje Leica MS50 . . . 13
4.2 Tabulka charakteristik přístroje Riegel Z420i . . . 13
4.3 Tabulka charakteristik přístroje Riegel VZ-2000 . . . 14
4.4 Tabulka charakteristik přístroje Surphaser 25HSX . . . 14
5.1 Tabulka rozdílů určená z měření přístrojem Leica MS50 . . . 19
5.2 Tabulka hodnot z vyhodnocení skenů přístroje Leica MS50 . . . 19
5.3 Tabulka rozdílů určená z měření přístrojem Riegl Z420i . . . 21
5.4 Tabulka hodnot z vyhodnocení skenů přístrojem Riegl Z420i . . . 21
5.5 Tabulka přesnosti měření z kalibračního protokolu dodaného k přístroji Riegl Z420i 21
5.6 Tabulka rozdílů určená z měření přístrojem Riegl VZ-2000 . . . 23
5.7 Tabulka hodnot z vyhodnocení skenů přístrojem Riegl VZ-2000 . . . 23
5.8 Tabulka přesnosti měření z kalibračního protokolu dodaného k přístroji Riegl VZ-2000 . . . 23
6.1 Tabulka dokládající přesnost sítě kalibrační základny . . . 27
6.2 Tabulka odchylek získaných z měření . . . 28
6.3 Tabulka odchylek získaných z měření . . . 28

Seznam použitých zkratek

AVKZ	-	program pro automatické vyhodnocení kalibrační základny
CCD	-	elektronická součástka používaná pro snímání obrazové informace
ČSN EN ISO	-	Česká technická norma
GNSS	-	Globální družicový polohový systém
GUI	-	Grafické uživatelské rozhraní
spol. s r.o.	-	společnost s ručením omezeným

Seznam použitých symbolů

d	-	měřená šikmá délka
x, y, z	-	souřadnice bodu určeného prostorovou polární metodou
Δ_{max}	-	maximální rozdíl
ϵ_d	-	skutečná chyba šikmé délky
ϵ_P	-	skutečná polohová chyba
ϵ_x, ϵ_y, ϵ_z	-	skutečné chyby souřadnic
ϵ_ζ	-	skutečná chyba zenitového úhlu
ϵ_ω	-	skutečná chyba horizontálního úhlu
ζ	-	měřený zenitový úhel
ρ	-	odrazivost
σ_d	-	směrodatná odchylka šikmé délky
σ_{P1}, σ_{P2}	-	směrodatná polohová odchylka
$\sigma_{P\,max}$	-	požadovaná směrodatná polohová odchylka
σ_ζ	-	směrodatná odchylka zenitového úhlu
σ_ω	-	směrodatná odchylka horizontálního úhlu
ω	-	měřený horizontální úhel

Seznam použitých programů

- EasyNET (Adjust Solution)
- Matlab R2013a (MathWorks)
- program pro ovládání Surphaseru
- RiSCAN PRO (Riegel)
- Texmaker 4.3 (Pascal Brachet)

Seznam příloh

A Protokol z vyrovnání a následné transformace v programu EasyNET
B Výkres sítě kalibrační základny
C Protokol kalibrace výrobcem pro přístroj Riegl Z420i
D Protokol kalibrace výrobcem pro přístroj Riegl VZ-2000
E Protokoly z programu AVKZ pro Leica MS50
F Protokoly z programu AVKZ pro Riegl Z420i
G Protokoly z programu AVKZ pro Riegl VZ-2000
H Elektronická příloha

A Protokol z vyrovnání a následné transformace v programu EasyNET

EasyNET 3.4.3 Non-commercial (12.10.2015)
****
Kontakt: Ing. Pavel Třasák, Ph.D. (pavel.trasak@gmail.com)

Protokol C - Vyrovnání sítě
****
Vytvořeno: 29.3.2017 11:11:21

C-01 Základní informace o vyrovnání sítě

Vyloučení odlehlých hodnot

Metoda robustního odhadu:	Huber
Hladina významnosti:	0.05
Počet vyloučených odlehlých hodnot:	1/195 [0.005]
Vodorovný směr:	0/65 [0.000]
Zenitový úhel:	1/65 [0.015]
Šikmá délka:	0/65 [0.000]
Šikmá délka (doplněk):	-
Směrník:	-
Převýšení:	-
Svislé provažování:	-

Vyrovnání sítě

Apriorní jednotková směrodatná odchylka:	1.000
Aposteriorní jednotková směrodatná odchylka:	0.680
Počet fixních bodů:	0
Počet vyrovnaných bodů:	34
Počet vyrovnaných orientačních posunů:	2
Počet vyrovnaných měření:	194
Vodorovný směr:	65
Zenitový úhel:	64
Šikmá délka:	65
Šikmá délka (doplněk):	0
Směrník:	0
Převýšení:	0
Svislé provažování (X + Y):	0 (0)
Počet nadbytečných měření:	94

C-02 Vyrovnané souřadnice (Aposteriorní přesnost)

Legenda:
A: Pořadové číslo
B: Číslo bodu
C: Souřadnice X [m]
D: Souřadnice Y [m]
E: Souřadnice Z [m]
F: Souřadnice X - Směrodatná odchylka [mm]
G: Souřadnice Y - Směrodatná odchylka [mm]
H: Souřadnice Z - Směrodatná odchylka [mm]

Data:

A	B	C[m]	D[m]	E[m]	F[mm]	G[mm]	H[mm]
1	1	-0.0001	22.5304	9.5482	0.13	0.69	0.12
2	2	-1.0133	34.7817	9.7475	0.18	0.70	0.17
3	3	-4.3789	52.3189	8.7232	0.25	0.70	0.24
4	4	-6.5411	85.8672	10.2619	0.36	0.70	0.47
5	5	-6.0005	106.8699	11.1778	0.41	0.70	0.48
6	6	-7.7658	20.1510	9.6791	0.26	0.64	0.11
7	7	-8.4805	20.1020	9.6723	0.27	0.63	0.11
8	8	-7.7669	20.1421	13.1892	0.25	0.62	0.17
9	9	-8.4347	20.0978	13.1788	0.27	0.62	0.17
10	10	-7.7284	20.1383	16.6803	0.24	0.60	0.25
11	11	-8.4272	20.0924	16.6715	0.26	0.59	0.25
12	12	-7.6723	20.1433	20.2403	0.23	0.57	0.33
13	13	-8.6141	20.0840	20.2250	0.27	0.57	0.33
14	14	-29.6686	12.5329	16.0116	0.62	0.32	0.21
15	15	-29.6761	12.5338	24.5476	0.58	0.30	0.34
16	16	-45.3976	15.9309	18.2519	0.65	0.32	0.26
17	17	-45.4200	15.9451	20.0407	0.65	0.32	0.27
18	18	-67.3858	-24.6656	21.1662	0.66	0.38	0.34
19	19	-67.1481	-26.8726	21.4958	0.65	0.39	0.34
20	20	-67.1395	-26.8889	23.0461	0.65	0.39	0.35

					protokol_vyrovnani		
21	21	-45.3317	-20.8521	20.2189	0.63	0.35	0.27
22	22	-45.3269	-20.8508	21.5256	0.63	0.35	0.28
23	23	-33.0850	-22.9585	13.0492	0.58	0.42	0.20
24	24	-33.0813	-22.9737	20.2325	0.57	0.41	0.27
25	25	-2.4868	-17.5556	9.4126	0.15	0.65	0.09
26	26	-2.4765	-17.1927	13.1556	0.14	0.65	0.20
27	27	-2.5143	-17.1940	16.3838	0.14	0.63	0.31
28	28	-2.5060	-17.1988	19.6308	0.14	0.58	0.40
29	29	3.5553	-30.8207	9.3018	0.19	0.69	0.14
30	30	2.8802	-4.4180	9.7362	0.13	0.17	0.06
31	31	6.9071	1.5887	10.8845	0.27	0.15	0.10
32	32	-6.1736	1.7813	10.1419	0.22	0.14	0.07
33	6001	-0.0001	-0.0001	7.8630	0.07	0.11	0.05
34	7001	-0.1066	-2.1762	9.4030	0.07	0.12	0.05

EasyNET 3.4.3 Non-commercial (12.10.2015)
****
Kontakt: Ing. Pavel Třasák, Ph.D. (pavel.trasak@gmail.com)

Protokol E - Transformace na bod a směrník

Vytvořeno: 29.3.2017 11:17:50

E-02 Základní informace o transformaci na bod a směrník

Základní informace

Bod:	6001
Cíl:	1
Směrník [gon]:	100.00000
Počet transformovaných bodů:	34
Počet fixních bodů:	0
Počet vyrovnaných bodů:	34

Parametry transformačního klíče

X [m]:	0.0001
Y [m]:	0.0001
Z [m]:	-7.8630
Rotace [gon]:	399.99990

E-03 Transformované souřadnice (Aposteriorní přesnost)

Legenda:

A: Pořadové číslo
B: Číslo bodu
C: Souřadnice X [m]
D: Souřadnice Y [m]
E: Souřadnice Z [m]
F: Souřadnice X - Směrodatná odchylka [mm]
G: Souřadnice Y - Směrodatná odchylka [mm]
H: Souřadnice Z - Směrodatná odchylka [mm]

Data:

A	B	C[m]	D[m]	E[m]	F[mm]	G[mm]	H[mm]
1	1	0.0000	22.5305	1.6852	0.13	0.69	0.12
2	2	-1.0131	34.7818	1.8845	0.18	0.70	0.17
3	3	-4.3787	52.3190	0.8601	0.25	0.70	0.24
4	4	-6.5408	85.8673	2.3989	0.36	0.70	0.47
5	5	-6.0002	106.8700	3.3148	0.41	0.70	0.48
6	6	-7.7657	20.1511	1.8161	0.26	0.64	0.11
7	7	-8.4804	20.1021	1.8093	0.27	0.63	0.11
8	8	-7.7668	20.1422	5.3262	0.25	0.62	0.17
9	9	-8.4345	20.0979	5.3158	0.27	0.62	0.17
10	10	-7.7283	20.1384	8.8173	0.24	0.60	0.25
11	11	-8.4270	20.0925	8.8085	0.26	0.59	0.25
12	12	-7.6722	20.1434	12.3773	0.23	0.57	0.33
13	13	-8.6140	20.0841	12.3620	0.27	0.57	0.33
14	14	-29.6684	12.5330	8.1486	0.62	0.32	0.21
15	15	-29.6760	12.5340	16.6846	0.58	0.30	0.34
16	16	-45.3975	15.9311	10.3889	0.65	0.32	0.26
17	17	-45.4199	15.9452	12.1777	0.65	0.32	0.27
18	18	-67.3857	-24.6654	13.3031	0.66	0.38	0.34
19	19	-67.1480	-26.8724	13.6328	0.65	0.39	0.34
20	20	-67.1395	-26.8887	15.1830	0.65	0.39	0.35
21	21	-45.3316	-20.8519	12.3558	0.63	0.35	0.27
22	22	-45.3268	-20.8507	13.6625	0.63	0.35	0.28
23	23	-33.0849	-22.9583	5.1862	0.58	0.42	0.20
24	24	-33.0812	-22.9736	12.3695	0.57	0.41	0.27
25	25	-2.4867	-17.5555	1.5496	0.15	0.65	0.09
26	26	-2.4764	-17.1926	5.2926	0.14	0.65	0.20
27	27	-2.5142	-17.1939	8.5207	0.14	0.63	0.31
28	28	-2.5059	-17.1987	11.7678	0.14	0.58	0.40
29	29	3.5554	-30.8207	1.4388	0.19	0.69	0.14
30	30	2.8803	-4.4179	1.8732	0.13	0.17	0.06
31	31	6.9073	1.5888	3.0214	0.27	0.15	0.10
32	32	-6.1735	1.7814	2.2788	0.22	0.14	0.07
33	6001	0.0000	0.0000	0.0000	0.07	0.11	0.05
34	7001	-0.1065	-2.1761	1.5399	0.07	0.12	0.05

B VÝKRES SÍTĚ

KALIBRAČNÍ ZÁKLADNY

Měřítko: 1:500

Měřítko elips: 20:1

C Protokol kalibrace výrobcem pro přístroj Riegl Z420i

RIEGL

Test Certificate

Model: LMS-Z420i Serial No: 9994771

Manufacturing date: 3/15/2005

Measurement Range:

① bright sunlight ② sunlight ③ overcast

④ dusk ⑤ night ⑥ artificial light

Target Reflectivity	Meas. distance [m] & amplitude	Attenuation factor max.	Calc. max. distance without attenuation *)	Specified max. distance	o.k.
ρ≥10%	r50,00 a 6	64	400 m	≥250 m	☑
ρ≥80%	r623,9 a 5	4	1240 m	≥800 m	☑

*) CalcDist = MeasDist * √AttFactor

Minimum Distance:

Target Reflectivity	Measured distance [m] & amplitude	Specified min. distance	o.k.
ρ≥50%	1,998m @ 49	2 m	☑

Measurement Accuracy *(incl. 20ppm distance depending error)* **:**

Target	Nominal Value	Measured Value	Spec. Accuracy	o.k.
White wall	14.282 m	14,289m	± 10 mm	☑
Target plate ρ≥80%	129.249 m	129,260m	± 13 mm	☑
Target plate ρ≥10%	131.325 m	131,325m	± 13 mm	☑
Plastic reflector	147.109 m	147,106m	± 13 mm	☑

Measurement rate:

Specified measurement rate	Measurement rate [pts./sec.] tested	o.k.
12.000 pts./sec. low scanning rate (mirror oscillating)	13888	☑
8.000 pts./sec. high scanning rate (mirror rotating)	8225	☑

1) not measured for SN

RIEGL

Test Certificate

Scanning rate:
Tamb=22°C +/-3°C

	Max. scanning rate [scans / sec.]	tested o.k.
Line Scan	20 Scans/sec.	☑
Frame Scan	15 °/sec.	☒

Interfaces:

	tested
- Parallel interface (ECP-standard)	☑
- Serial RS232 interface	☑
- TCP/IP interface (optionally)	☑
- others: **Debug**	☑

Power Supply: 22°C+/-3°C, after 10min. warm up

Operating Voltage [V]	Current consumption Scanner on @ default scan, Laser on PRR=24.000 Hz
12 V	6,3 A
15 V	5,2 A
18 V	4,3 A
24 V	3,2 A
28 V	2,7 A

Fuses	Rating	o.k.
Electronics	1,6A f	☑
Scanner	6,3A f	☑
Laser	1,0A f	☑

Laser safety and classification:

Parameters of laser beam measured	☑
Laser classification protocol	☑

Instrument labelling:

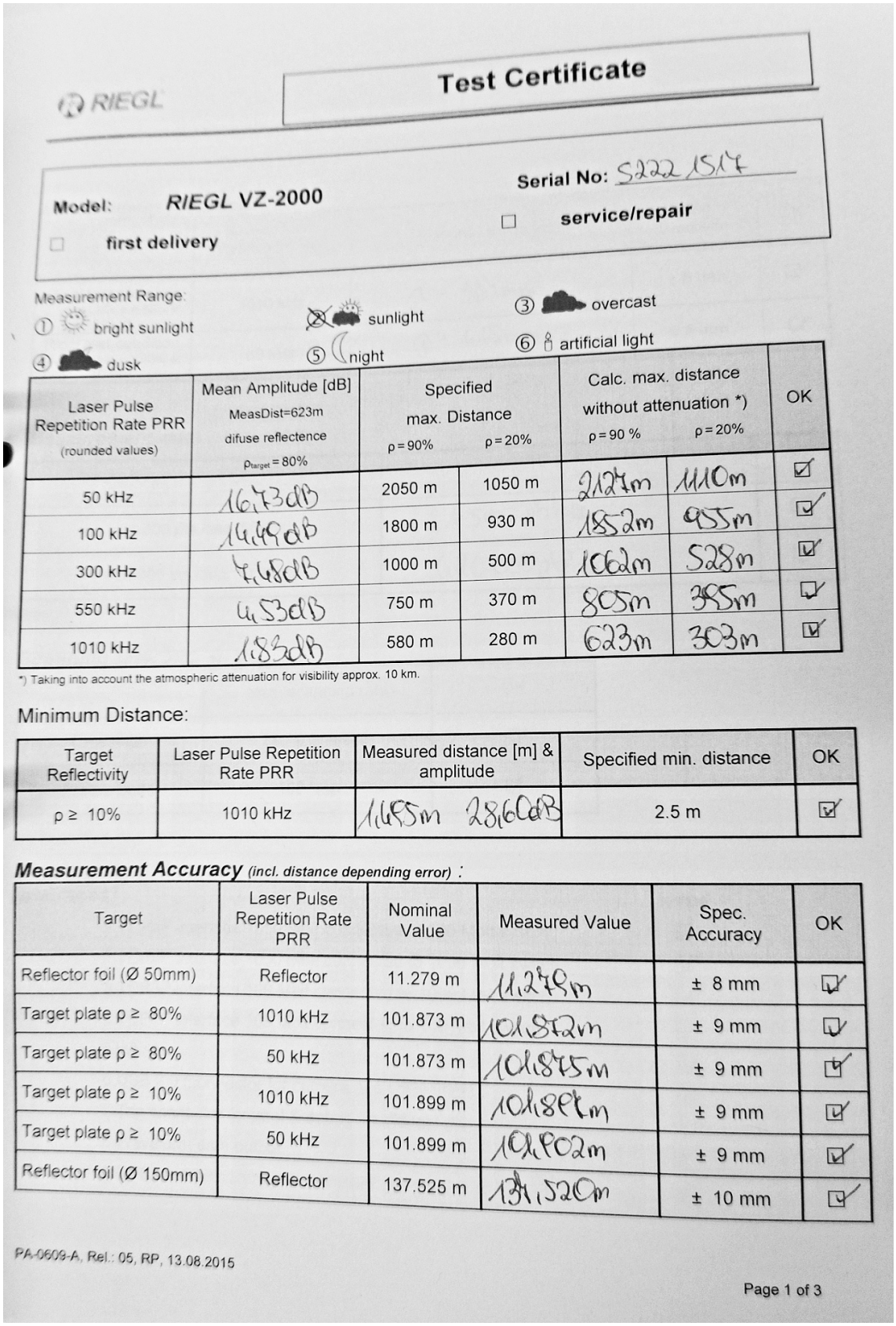
	attached		attached
Laser classification	☑	CE symbol	☑
type plate	☑	serial number	☑
company logos	☑	Warning	☑

(glass retroreflector as target)

Tests performed: 31.5.2005 R. Pfeifle
Date, Sign

Product Released: 26.2005 M. Wieser
Date, Sign

D Protokol kalibrace výrobcem pro přístroj Riegl VZ-2000



RIEGL

Test Certificate

Model: *RIEGL* VZ-2000 Serial No: S222 1514

☐ first delivery ☐ service/repair

Measurement Range:

① bright sunlight ☒ sunlight ③ overcast

④ dusk ⑤ night ⑥ artificial light

Laser Pulse Repetition Rate PRR (rounded values)	Mean Amplitude [dB] MeasDist=623m difuse reflectence ρ_{target} = 80%	Specified max. Distance ρ = 90%	ρ = 20%	Calc. max. distance without attenuation *) ρ = 90 %	ρ = 20%	OK
50 kHz	16,73dB	2050 m	1050 m	2127m	1110m	☑
100 kHz	14,49dB	1800 m	930 m	1852m	955m	☑
300 kHz	7,68dB	1000 m	500 m	1062m	528m	☑
550 kHz	4,53dB	750 m	370 m	805m	395m	☑
1010 kHz	1,83dB	580 m	280 m	623m	303m	☑

*) Taking into account the atmospheric attenuation for visibility approx. 10 km.

Minimum Distance:

Target Reflectivity	Laser Pulse Repetition Rate PRR	Measured distance [m] & amplitude	Specified min. distance	OK
ρ ≥ 10%	1010 kHz	1,695m 28,60dB	2.5 m	☑

Measurement Accuracy *(incl. distance depending error)* :

Target	Laser Pulse Repetition Rate PRR	Nominal Value	Measured Value	Spec. Accuracy	OK
Reflector foil (Ø 50mm)	Reflector	11.279 m	11,279m	± 8 mm	☑
Target plate ρ ≥ 80%	1010 kHz	101.873 m	101,872m	± 9 mm	☑
Target plate ρ ≥ 80%	50 kHz	101.873 m	101,875m	± 9 mm	☑
Target plate ρ ≥ 10%	1010 kHz	101.899 m	101,898m	± 9 mm	☑
Target plate ρ ≥ 10%	50 kHz	101.899 m	101,902m	± 9 mm	☑
Reflector foil (Ø 150mm)	Reflector	137.525 m	137,520m	± 10 mm	☑

PA-0609-A, Rel.: 05, RP, 13.08.2015

Page 1 of 3

RIEGL

Test Certificate

Measurement Precision:

Target	Laser Pulse Repetition Rate PRR	Measured Value [mm]	Spec. Precision	OK
Riegl test condition (Target plate ρ ≥ 80% at 100 m)	1010 kHz	σ = 3.67mm	± 5 mm	☑
Riegl test condition (Target plate ρ ≥ 80% at 100 m)	50 kHz	σ = 1.15mm	± 5 mm	☑

Measurement rate:

Specified measurement rate	Measurement rate [pts./sec.] tested	OK
21.000 pts./sec. 50kHz	21.500 pts/sec	☑
420.000 pts./sec. 1010kHz	420.000 pts/sec	☑

Scanning rate: 22°C +/- 3°C

	Max. scanning rate	OK
Line Scan	240 scans/sec.	☑
Frame Scan	150 °/sec.	☑

Interfaces:

	tested
1. TCP/IP interface 1000 Mbit connected to 100 Mbit switch	☑
2. TCP/IP interface 1000 Mbit connected to 1000 Mbit switch	☑
3. TCP/IP interface 100 Mbit connected to 1000 Mbit switch	☑
4. TCP/IP interface 100 Mbit connected to 100 Mbit switch	☑
5. WLAN	☑
6. USB 2.0 (connector for camera and USB-Stick)	☑
7. Trig connector (control & debug interface)	☑
8. Waveform data output	☐
9. GPS on TOP	☑

RIEGL

Test Certificate

Power Supply: 22°C +/- 3°C, after 10min. warm up

Operating Voltage [V]	Current consumption [A] Scanner on @ default scan, Laser on PRR=150 kHz
11 V	1,026 A
15 V	4,873 A
24 V	2,905 A
32 V	2,178 A

Fuses	Rating	OK
Power 1	10 AF	☑
Power 2	10 AF	☑
Batt. Power	10 AF	☑
Batt. Charge	10 AF	☑

Laser safety and classification:

Parameters of laser beam measured ☑ Laser classification protocol ☑

Parameter setting:

Parameters set to factory default values ☑

Instrument labelling:

	attached		attached
Laser classification	☑	Company logos	☑
Type plate with CE symbol	☑	_____	☐

Tests performed: 22.09.2015 Liewald
Date, Sign

Product Released: 22.9.2015
Date, Sign

E Protokoly z programu AVKZ pro Leica MS50

Rozdíl na bodech po transformaci.

Na bodu	X [m]	Y [m]	Z [m]
1	0.0008	0.0003	0.0004
2	0.0005	0.0006	0.0003
6	0.0014	-0.0005	0.0003
7	0.0011	-0.0000	0.0002
8	0.0005	0.0003	0.0000
9	0.0006	0.0000	-0.0001
10	0.0002	0.0000	0.0000
11	0.0004	-0.0000	-0.0001
12	0.0006	-0.0005	-0.0006
13	0.0008	0.0000	-0.0007
14	-0.0001	0.0001	-0.0001
15	0.0002	-0.0007	-0.0003
16	0.0003	-0.0004	0.0005
17	0.0007	-0.0006	-0.0002
18	0.0006	-0.0006	0.0001
19	-0.0017	0.0004	-0.0002
20	-0.0004	-0.0001	-0.0005
21	-0.0003	-0.0003	-0.0001
22	-0.0003	-0.0005	-0.0001
23	-0.0000	-0.0004	0.0002
24	0.0000	-0.0005	0.0006
25	-0.0008	-0.0006	0.0001
26	-0.0010	-0.0002	0.0000
27	-0.0007	-0.0000	-0.0001
28	-0.0005	0.0000	0.0000
29	-0.0011	-0.0000	0.0001
30	-0.0015	0.0038	0.0001
31	-0.0002	0.0010	0.0001
32	-0.0003	-0.0006	0.0001
6001	0.0010	0.0002	

Transformační klíč:

Parametr	Hodnota	Přesnost
delta_X	0.0010	0.0002 m
delta_Y	0.0002	0.0001 m
delta_Z	0.0007	0.0002 m
alfa	-0.0003	0.0004 gon
beta	0.0005	0.0004 gon
gama	-93.3724	0.0003 gon

Protokol kalibrace délky.
A ... Délka určená ze souřadnic základny
B ... Délka určená ze souřadnic skeneru
C ... Rozdíl délek

Z bodu	Na bod	A [m]	B [m]	C [m]
1	2	12.295	12.294	0.000
1	3	30.120	30.118	0.002
1	4	63.678	63.677	0.000
1	5	84.568	84.568	0.001
2	3	17.887	17.885	0.001
2	4	51.386	51.386	0.000
2	5	72.275	72.274	0.000
3	4	33.653	33.655	0.001
3	5	54.630	54.631	0.001
4	5	21.030	21.029	0.000

Výběrová směrodatná odchylka rozdílu 0.0005 m

Rozdíly, mezi zjištěnými úhly.
A ... Úhel určený ze souřadnic základny
B ... Úhel určený ze souřadnic skeneru
C ... Rozdíl úhů

Rozdíly, mezi zjištěnými horizontálními úhly.

Z bodu	Na bod	A [gon]	B [gon]	C [gon]
6	7	1.9977	1.9966	-0.0011
8	9	1.8667	1.8671	0.0004
10	11	1.9546	1.9545	-0.0002
12	13	2.6261	2.6243	-0.0019
18	19	1.8965	1.8987	0.0022

Výběrová směrodatná odchyla rozdílu 0.00155 gon

Rozdíly, mezi zjištěnými zenitovými úhly.

Z bodu	Na bod	A [gon]	B [gon]	C [gon]
16	17	2.3662	2.3671	0.0009
19	20	1.3646	1.3649	0.0003
21	22	1.6673	1.6673	0.0000

Výběrová směrodatná odchyla rozdílu 0.00045 gon

Hodnoty pro desku.

Počet bodů na rovině: 13463
Maximální odchylka od roviny: 0.0043 m
Jednotlivé odchylky jsou uvedeny v exportovaném grafu.
Hodnoty pro válec.
Počet bodů na válci: 2956
Maximální odchylka od válce: 0.1678 m
Poloměr proloženého válce: 0.1474 m
Jednotlivé odchylky jsou uvedeny v exportovaném grafu.
Hodnoty pro plochu.
Počet bodů na ploše: 29839

F Protokoly z programu AVKZ pro Riegl Z420i

Rozdíl na bodech po transformaci.

Na bodu	X [m]	Y [m]	Z [m]	Průměr cíle [mm]	
1	-0.0053	0.0047	0.0062		60
2	-0.0075	0.0068	0.0086		63
6	-0.0013	0.0015	0.0051		60
7	-0.0030	0.0058	0.0028		59
8	-0.0034	0.0044	0.0032		58
9	-0.0016	0.0018	0.0013		59
10	-0.0049	0.0025	0.0003		60
11	-0.0006	0.0008	-0.0010		59
12	-0.0050	0.0020	-0.0097		60
13	-0.0049	0.0035	-0.0066		59
14	0.2481	-0.0455	0.0023		47
15	-0.0060	0.0020	-0.0029		62
16	-0.0056	-0.0007	-0.0035		56
17	-0.0038	-0.0019	-0.0007		60
18	-0.0210	-0.0022	0.0032		60
19	-0.0179	0.0016	0.0010		59
20	-0.0199	-0.0010	-0.0007		72
21	-0.0213	0.0007	0.0001		58
22	-0.0141	0.0035	0.0008		57
23	-0.0152	0.0013	-0.0007		56
24	-0.0136	0.0001	-0.0034		56
25	-0.0103	0.0009	0.0027		58
26	-0.0100	0.0022	-0.0030		60
27	-0.0100	0.0025	-0.0018		60
28	-0.0110	0.0024	-0.0028		65
29	-0.0079	0.0018	0.0020		61
30	-0.0056	-0.0030	-0.0018		56
31	-0.0133	0.0026	-0.0016		59
32	-0.0042	-0.0012	0.0007		60
6001	0.0089	-0.0027			

Transformační klíč:

Parametr	Hodnota	Přesnost	
delta_X	0.0089	0.0065	m
delta_Y	-0.0027	0.0056	m
delta_Z	1.8619	0.0073	m
alfa	-0.0598	0.0172	gon
beta	-0.0343	0.0167	gon
gama	93.7549	0.0113	gon

Protokol kalibrace délky.
A ... Délka určená ze souřadnic základny
B ... Délka určená ze souřadnic skeneru
C ... Rozdíl délek

Z bodu	Na bod	A [m]	B [m]	C [m]
1	2	12.295	12.292	0.002
1	3	30.120	30.120	0.000
1	4	63.678	63.678	0.000
1	5	84.568	84.570	0.002
2	3	17.887	17.889	0.002
2	4	51.386	51.389	0.003
2	5	72.275	72.279	0.004
3	4	33.653	33.653	0.000
3	5	54.630	54.632	0.001
4	5	21.030	21.031	0.002

Výběrová směrodatná odchylka rozdílu 0.0014 m

Rozdíly, mezi zjištěnými úhly.
A ... Úhel určený ze souřadnic základny
B ... Úhel určený ze souřadnic skeneru
C ... Rozdíl úhů

Rozdíly, mezi zjištěnými horizontálními úhly.

Z bodu	Na bod	A [gon]	B [gon]	C [gon]
6	7	1.9977	1.9873	-0.0104
8	9	1.8667	1.8715	0.0048
10	11	1.9546	1.9540	-0.0006
12	13	2.6261	2.6220	-0.0042
18	19	1.8965	1.8947	-0.0017

Výběrová směrodatná odchyla rozdílu 0.00553 gon

Rozdíly, mezi zjištěnými zenitovými úhly.

Z bodu	Na bod	A [gon]	B [gon]	C [gon]
16	17	2.3662	2.3621	-0.0041
19	20	1.3646	1.3658	0.0012
21	22	1.6673	1.6659	-0.0014

Výběrová směrodatná odchyla rozdílu 0.00266 gon

Hodnoty pro desku.
Počet bodů na rovině: 9587

Maximální odchylka od roviny: 0.2056 m
Jednotlivé odchylky jsou uvedeny v exportovaném grafu.
Hodnoty pro válec.
Počet bodů na válci: 7761
Maximální odchylka od válce: 0.1588 m
Poloměr proloženého válce: 0.1603 m
Jednotlivé odchylky jsou uvedeny v exportovaném grafu.
Hodnoty pro plochu.
Počet bodů na ploše: 492492

G Protokoly z programu AVKZ pro Riegl VZ-2000

Rozdíl na bodech po transformaci.

Na bodu	X [m]	Y [m]	Z [m]	Průměr cíle [mm]	
1	-0.0040	0.0000		0.0023	56
2	-0.0008	-0.0020		0.0028	56
6	-0.0042	-0.0011		0.0005	49
7	-0.0010	-0.0001		-0.0004	50
8	-0.0038	-0.0009		-0.0014	48
9	-0.0038	-0.0006		0.0001	46
10	-0.0049	-0.0014		0.0017	46
11	-0.0039	-0.0002		0.0018	44
12	-0.0023	0.0002		-0.0023	44
13	-0.0012	0.0012		-0.0007	43
14	0.0001	0.0013		-0.0021	51
15	0.0011	0.0019		-0.0011	58
16	0.0013	-0.0011		-0.0005	57
17	0.0031	0.0013		0.0013	60
18	0.0002	-0.0019		0.0005	59
19	0.0018	-0.0007		-0.0000	55
20	-0.0020	-0.0038		-0.0007	59
21	-0.0002	0.0010		0.0027	58
22	0.0004	0.0001		0.0024	58
23	-0.0001	0.0015		-0.0021	56
24	-0.0004	0.0010		-0.0017	55
25	0.0045	-0.0003		-0.0010	51
26	0.0042	0.0012		-0.0001	49
27	0.0056	0.0009		0.0011	45
28	0.0044	0.0035		0.0021	43
29	0.0020	0.0004		0.0029	49
30	0.0039	-0.0034		-0.0030	57
31	-0.0015	-0.0021		-0.0016	59
32	0.0014	0.0040		-0.0035	54
6001	0.0009	0.0005			

Transformační klíč:

Parametr	Hodnota	Přesnost
delta_X	0.0009	0.0005 m
delta_Y	0.0005	0.0004 m
delta_Z	1.6492	0.0006 m
alfa	0.0027	0.0012 gon
beta	0.0251	0.0015 gon
gama	-192.3556	0.0009 gon

Protokol kalibrace délky.
A ... Délka určená ze souřadnic základny
B ... Délka určená ze souřadnic skeneru
C ... Rozdíl délek

Z bodu	Na bod	A [m]	B [m]	C [m]
1	2	12.295	12.298	0.003
1	3	30.120	30.123	0.003
1	4	63.678	63.685	0.007
1	5	84.568	84.574	0.006
2	3	17.887	17.886	0.000
2	4	51.386	51.390	0.004
2	5	72.275	72.277	0.002
3	4	33.653	33.657	0.004
3	5	54.630	54.633	0.002
4	5	21.030	21.028	0.002

Výběrová směrodatná odchylka rozdílu 0.0019 m

Rozdíly, mezi zjištěnými úhly.
A ... Úhel určený ze souřadnic základny
B ... Úhel určený ze souřadnic skeneru
C ... Rozdíl úhů

Rozdíly, mezi zjištěnými horizontálními úhly.

Z bodu	Na bod	A [gon]	B [gon]	C [gon]
6	7	1.9977	1.9914	-0.0062
8	9	1.8667	1.8660	-0.0008
10	11	1.9546	1.9504	-0.0042
12	13	2.6261	2.6219	-0.0043
18	19	1.8965	1.8955	-0.0010

Výběrová směrodatná odchyla rozdílu 0.00236 gon

Rozdíly, mezi zjištěnými zenitovými úhly.

Z bodu	Na bod	A [gon]	B [gon]	C [gon]
16	17	2.3662	2.3637	-0.0025
19	20	1.3646	1.3652	0.0006
21	22	1.6673	1.6677	0.0005

Výběrová směrodatná odchyla rozdílu 0.00174 gon

Hodnoty pro desku.
Počet bodů na rovině: 20097

Maximální odchylka od roviny: 0.0146 m
Jednotlivé odchylky jsou uvedeny v exportovaném grafu.
Hodnoty pro válec.
Počet bodů na válci: 17153
Maximální odchylka od válce: 0.1414 m
Poloměr proloženého válce: 0.1474 m
Jednotlivé odchylky jsou uvedeny v exportovaném grafu.
Hodnoty pro plochu.
Počet bodů na ploše: 863640

H Elektronická příloha

CD se zdrojovými soubory a výstupy z provedených kalibrací.