



Aladin Kaltak, BSc

# **Evaluierung zweier Mobile Mapping Systeme hinsichtlich Autobahnvermessung**

## **MASTERARBEIT**

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur

Masterstudium

Geodäsie

eingereicht an der

**Technischen Universität Graz**

### **Betreuer**

Dipl.-Ing. Dr.techn. Richard Ladstädter

Institut für Geodäsie

Graz, November 2020

## **EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG**

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit identisch.

---

Datum, Unterschrift

## Danksagung

Bei dieser Gelegenheit möchte ich mich von ganzem Herzen bei meinen Eltern für die größte und ehrlichste Unterstützung bedanken. Aus diesem Grund widme ich ihnen diese Arbeit.

Ein großer Dank gebührt auch meinem Betreuer, DI Dr. Richard Ladstädter für seine Betreuung und für die fachliche Beratung von Beginn meiner Masterarbeit an.

Ein weiteres Dankeschön richtet sich an Univ.-Prof. Dr.rer.nat. Dipl.-Forstwirt Mathias Schardt für das Ermöglichen dieser Masterarbeit durch die Unterstützung seitens des Forschungsinstituts JOANNEUM RESEARCH Digital.

Des Weiteren möchte ich mich bei meinem ersten Arbeitgeber, Herrn DI Gerald Fuxjäger (Geschäftsführer der Vermessung ADP Rinner ZT GmbH) bedanken, welcher jederzeit für fachliche Ratschläge und Diskussionen erreichbar war.

Graz, November 2020

# Zusammenfassung

Diese Arbeit beschäftigt sich mit der Genauigkeitsuntersuchung zweier Mobile-Mapping-Systeme (MMS) und wurde in vier Kapitel untergliedert.

Zuerst werden die Ziele und die Fragestellung der Masterarbeit definiert. Nachfolgend werden im ersten Kapitel die Grundlagen von MMS beschrieben. Zu diesen gehören die Nutzung der Systemkomponenten, die Beschreibung der eingebauten Sensoren, der Zusammenhang der Sensoren und der Einfluss von Sensorfehlern auf die georeferenzierten Daten.

Neben der Definition des Begriffs „Genauigkeit“ werden im zweiten Kapitel auch die Methoden zur Überprüfung und Abschätzung der Genauigkeit eines MMS erläutert.

Mit dem praktischen Ablauf der Masterarbeit befasst sich das dritte Kapitel. Hierbei werden zwei unterschiedliche MMS verwendet, nämlich ein System von Riegl und ein System von Leica. Vor Beschreibung der durchgeführten Untersuchungen werden die Systeme separat beschrieben und die technischen Spezifikationen verglichen. Es folgen die Darstellung der Abläufe für die Datenaufnahme, die Auswertung der erfassten Daten, sowie ein Vergleich der beiden Systeme.

Das vierte Kapitel beinhaltet ein Resümee. Mit Hilfe der erhobenen Werte und der daraus resultierenden Ergebnisse werden die Unterschiede zwischen den Systemen nochmals aufgezeigt und die jeweiligen Stärken und Schwächen diskutiert.

## Abstract

This thesis deals with the accuracy analysis of two Mobile Mapping Systems (MMS) and was divided into four chapters.

First, the goals and the research question of the master thesis are defined. In the following, the first chapter describes the basics of MMS. These include the use of the system components, the description of the built-in sensors, the connection of the sensors and the influence of sensor errors on the georeferenced data.

Besides the definition of the term "accuracy", the second chapter also explains the methods for checking and estimating the accuracy of an MMS.

The third chapter deals with the practical procedure of the master thesis. Two different MMS are used, namely a system from RiegI and a system from Leica. Before describing the performed investigations, the systems are described separately and the technical specifications are compared. This is followed by a description of the procedures for data acquisition, the evaluation of the acquired data, and a comparison of the two systems.

The fourth chapter contains a summary. With the help of the collected values and the resulting results, the differences between the systems are shown again and the respective strengths and weaknesses are discussed.

# Inhaltverzeichnis

<b>1</b>	<b>Mobile Mapping: Grundlagen</b>	<b>14</b>
1.1	Einführung und Definition	14
1.2	Systemkomponenten	15
1.2.1	Navigationssensorik	15
1.2.1.1	Attitudenwinkel	17
1.2.1.2	GNSS vs. INS	17
1.2.1.3	Möglichkeiten der Implementierung	18
1.2.1.4	Updates	18
1.2.1.5	Odometrie	19
1.2.2	Sensoren zur Umgebungserfassung	19
1.2.2.1	Laserscanner	19
1.2.2.2	Kameras	21
1.3	Kalibrierung und Synchronisation	22
1.3.1	Begriff "Kalibrierung"	22
1.3.2	Sensorkalibrierung	23
1.3.3	Plattformkalibrierung	23
1.3.4	Kalibriermethoden (Ansätze)	23
1.3.4.1	Laborkalibrierung	23
1.3.4.2	Feldkalibrierung	24
1.3.5	Synchronisation der Sensoren	25
1.4	Georeferenzierung	26
1.4.1	Definition	26
1.4.2	Direkte Georeferenzierung	27
1.4.3	Indirekte Georeferenzierung	27
1.4.4	Einflussfaktoren auf die Genauigkeit der georeferenzierten Daten	28
1.4.4.1	Navigationssensorik	28
1.4.4.2	INS	30
1.4.4.3	Odometrie	31
1.4.4.4	Sensoren zur Umgebungserfassung	31
1.4.4.5	Kalibrierung und Synchronisation	33
<b>2</b>	<b>Genauigkeitsuntersuchung von Mobile Mapping Systemen</b>	<b>34</b>
2.1	Erläuterung des Begriffs „Genauigkeit“	34
2.2	Verfahren zur Genauigkeitsabschätzung bei MMS	35
2.3	Andere Kriterien zum Systemvergleich	37

<b>3</b>	<b>Experimente und Evaluierung zweier Mobile Mapping Systeme</b>	<b>39</b>
3.1	Projektbeschreibung inkl. Anforderungen	39
3.2	Technische Systembeschreibung	40
3.2.1	Leica Pegasus:Two Ultimate Dualhead	40
3.2.2	Riegl VUX-SYS MLS	41
3.2.3	Technische Daten - Leica Pegasus: Two Ultimate Dualhead vs. Riegl VUX-1 SYS	44
3.3	Datenaufnahme	45
3.3.1	Festpunktfeld	45
3.3.2	Befahrung mittels Leica MMS	46
3.3.3	Passpunktmessung	47
3.3.4	Befahrung mittels Riegl VUX-SYS MLS	48
3.4	Georeferenzierung der aufgenommenen Daten	49
3.4.1	Leica MMS	49
3.4.2	Riegl MMS	50
3.5	Datenauswertung	51
3.5.1	Messung der Kontrollpunkte in ORBIT	51
3.5.2	Statistische Datenauswertung in Excel	55
3.5.2.1	Riegl – Bodenmarkierung (Bereich: km 190,050 - km 193,650)	56
3.5.2.2	Leica – Bodenmarkierung (Bereich: km 190,050 - km 193,650)	58
3.5.2.3	Riegl – Bodenmarkierung (Bereich: km 192,000 - km 193,600)	60
3.5.2.4	Riegl – Querprofile	62
3.5.2.5	Leica – Querprofile	69
3.5.3	Genauigkeitsvergleich – Riegl vs. Leica	76
3.5.3.1	Bodenmarkierung (Bereich: km 190,050 - km 193,650)	76
3.5.3.2	Bodenmarkierung (Bereich: km 192,000 - km 193,600)	76
3.5.3.3	Querprofile	77
3.5.3.4	Diskussion der Ergebnisse	78
3.5.4	Punktdichte und Intensität– Riegl vs. Leica	80
3.5.4.1	Punktdichte	80
3.5.4.2	Intensität	80
<b>4</b>	<b>Schlussfolgerungen</b>	<b>83</b>
<b>5</b>	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>87</b>
<b>6</b>	<b>Anhang</b>	<b>91</b>
6.1	Genauigkeitsberechnungen	91
6.1.1	Riegl	91
6.1.1.1	Bodenmarkierungen (Gesamt, Track A + Track B)	91
6.1.1.2	Plots	95

6.1.1.3	Querprofile.....	97
6.1.2	Leica.....	100
6.1.2.1	Bodenmarkierungen .....	100
6.1.2.2	Plots .....	104
6.1.2.3	Querprofile.....	105
6.2	Übersicht über Passpunkte und Kontrollpunkte.....	108

## Abkürzungsverzeichnis

<b>ALS</b>	<i>Airborne Laserscannig</i>
<b>APOS</b>	<i>Austrian Positioning Service</i>
<b>ASFINAG</b>	<i>Autobahnen- und Schnellstraßen-Finanzierungs-Aktiengesellschaft</i>
<b>AUPT</b>	<i>Attitude Update</i>
<b>BEV</b>	<i>Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen</i>
<b>CCD</b>	<i>Charge-coupled Device</i>
<b>CMOS</b>	<i>Complementary Metal Oxide Semiconductor</i>
<b>CP</b>	<i>Kontrollpunkt (eng. Checkpoint)</i>
<b>CUPT</b>	<i>Coordinate Update</i>
<b>DGNSS</b>	<i>Differentielle GNSS</i>
<b>DMI</b>	<i>Distance Measurement Indicator (Odometer)</i>
<b>FOV</b>	<i>Field of View</i>
<b>GAMS</b>	<i>GPS Azimuth Measurement Subsystem</i>
<b>GCP</b>	<i>Passpunkt (eng. Ground Control Point)</i>
<b>GNSS</b>	<i>Global Navigation Satellite System</i>
<b>GPS</b>	<i>Global Positioning System</i>
<b>Hz</b>	<i>Hertz (Messeinheit)</i>
<b>IMS</b>	<i>Inertial Measurement System</i>
<b>IMU</b>	<i>Inertial Measurement Unit</i>
<b>INS</b>	<i>Inertial Navigation System</i>
<b>JR</b>	<i>JOANNEUM RESEARCH Forschungsgesellschaft</i>
<b>LIDAR</b>	<i>Light Detection and Ranging</i>
<b>MLS</b>	<i>Mobile Laser Scannig</i>
<b>MM</b>	<i>Mobile Mapping</i>
<b>MMS</b>	<i>Mobile Mapping System</i>
<b>PC</b>	<i>Personal Computer</i>
<b>PKW</b>	<i>Personenkraftwagen</i>
<b>PPS</b>	<i>Pulse per Second</i>
<b>RGB</b>	<i>Red, Green, Blue color model</i>
<b>RMS</b>	<i>Root Mean Square</i>
<b>RTK</b>	<i>Real Time Kinematic</i>
<b>SPAN</b>	<i>Synchronized Position Attitude Navigation</i>
<b>TLS</b>	<i>Terrestrisches Laserscanning</i>
<b>TS</b>	<i>Total Station</i>
<b>VRS</b>	<i>Virtual Reference Station</i>
<b>VUPT</b>	<i>Velocity Update</i>
<b>WGS84</b>	<i>World Geodetic System</i>
<b>Z+F</b>	<i>Zoller+Fröhlich</i>
<b>ZUPT</b>	<i>Zero Velocity Update</i>

# Abbildungsverzeichnis

<b>Abbildung 1</b> - Idealisierte Darstellung des kinematischen Laserscannings nach Klingbeil & Kuhlmann (2018) .....	20
<b>Abbildung 2</b> - Beispiel für Referenzpunkt bei Leica Pegasus. Entnommen aus (Leica Geosystems, 2016) .....	24
<b>Abbildung 3</b> - Zielscheibe: A - Genau und präzise; B - Präzise, aber nicht genau; C - Weder genau noch präzise; D - Genau, aber nicht präzise (Minitab, 2020) .....	34
<b>Abbildung 4</b> - Projektbereich A09 km 189,5 – km 201,5 (Quelle: ASFINAG) .....	39
<b>Abbildung 5</b> - Leica Pegasus: Two Ultimate Dualhead (Foto: © Bergmann, 2018) .....	40
<b>Abbildung 6</b> - Schematische Darstellung von Leica Pegasus: Two Ultimate Dualhead (Leica Geosystems, 2020) .....	41
<b>Abbildung 7</b> - Schematische Darstellung von Systemkomponenten (Riegl, 2019) .....	42
<b>Abbildung 8</b> - Aufbau des Riegl Systems auf dem PKW (Foto: Skyability) .....	43
<b>Abbildung 9</b> - Testgebiet (km 190.050 – km 193.650), Knoten Graz-West – Knoten Kalsdorf (Quelle: Google Earth, Screenshot) .....	45
<b>Abbildung 10</b> - Überprüfung der bestehenden Vermarkung .....	46
<b>Abbildung 11</b> - Die Passpunktmessung .....	47
<b>Abbildung 12</b> - Riegl VUX-SYS MLS Installation auf dem Skyability-Fahrzeug (Foto: Skyability) .....	48
<b>Abbildung 13</b> - Einrichtung der Plattform beim Riegl MMS Aufnahme (Foto: Skyability) ....	49
<b>Abbildung 14</b> - Darstellung der Messtechniken in Orbit (Quelle: Screenshot) .....	52
<b>Abbildung 15</b> - Unterschiedliche Darstellung gleicher Nebelpunkte in beiden Punktwolken. Leica Punktwolke links, Riegl Punktwolke rechts. (Quelle: Screenshot) .....	53
<b>Abbildung 16</b> - Ein Beispiel für das Problem der Definition von Eckpunkten in Nebelpunkten (Quelle: Screenshot) .....	53
<b>Abbildung 17</b> - Funktionsweise des Flat Surface Intersection Werkzeugs (Schnittpunkt der flachen Oberfläche) .....	54
<b>Abbildung 18</b> - Abweichungen bei Bodenmarkierungen (Track A), Riegl MMS .....	56
<b>Abbildung 19</b> - Abweichungen bei Bodenmarkierungen (Track B), Riegl MMS .....	57
<b>Abbildung 20</b> - Abweichungen bei Bodenmarkierungen (Track A), Leica MMS .....	58
<b>Abbildung 21</b> - Abweichungen bei Bodenmarkierungen (Track B), Leica MMS .....	59
<b>Abbildung 22</b> - Abweichungen bei Bodenmarkierungen – Separater Bereich (Track A), Riegl MMS .....	60
<b>Abbildung 23</b> - Abweichungen bei Bodenmarkierungen – Separater Bereich (Track B), Riegl MMS .....	61
<b>Abbildung 24</b> - Abweichungen in Z Koordinate bei Profil 1, Riegl MMS .....	62
<b>Abbildung 25</b> - Abweichungen in Z Koordinate bei Profil 2, Riegl MMS .....	63
<b>Abbildung 26</b> - Abweichungen in Z Koordinate bei Profil 3, Riegl MMS .....	64
<b>Abbildung 27</b> - Abweichungen in Z Koordinate bei Profil 4, Riegl MMS .....	65
<b>Abbildung 28</b> - Abweichungen in Z Koordinate bei Profil 5, Riegl MMS .....	66
<b>Abbildung 29</b> - Abweichungen in Z Koordinate bei Profil 6, Riegl MMS .....	67
<b>Abbildung 30</b> - Abweichungen in Z Koordinate bei Profil 7, Riegl MMS .....	68
<b>Abbildung 31</b> - Abweichungen in Z Koordinate bei Profil 1, Leica MMS .....	69
<b>Abbildung 32</b> - Abweichungen in Z Koordinate bei Profil 2, Leica MMS .....	70
<b>Abbildung 33</b> - Abweichungen in Z Koordinate bei Profil 3, Leica MMS .....	71
<b>Abbildung 34</b> - Abweichungen in Z Koordinate bei Profil 4, Leica MMS .....	72
<b>Abbildung 35</b> - Abweichungen in Z Koordinate bei Profil 5, Leica MMS .....	73
<b>Abbildung 36</b> - Abweichungen in Z Koordinate bei Profil 6, Leica MMS .....	74
<b>Abbildung 37</b> - Abweichungen in Z Koordinate bei Profil 7, Leica MMS .....	75
<b>Abbildung 38</b> - Intensität bei der Riegl Punktwolke .....	81

<b>Abbildung 39</b> - Intensität bei der Pegasus Punktwolke .....	81
<b>Abbildung 40</b> - Histogramm bei Riegl MMS Punktwolke .....	82
<b>Abbildung 41</b> - Histogramm bei Leica MMS Punktwolke.....	82

## Tabellenverzeichnis

<b>Tabelle 1</b> - GNSS vs. INS nach (Hofmann-Wellenhop et.al., 2003) .....	18
<b>Tabelle 2</b> - Fehlereinflüsse auf GNSS-Messungen nach (Längauer, 2010) .....	28
<b>Tabelle 3</b> - Verschiedene Arten von IMU, ihre Genauigkeit und Verwendung nach (Schaer & Vallet, 2016).....	30
<b>Tabelle 4</b> - Unterschiede zwischen relativer und absoluter Genauigkeit .....	35
<b>Tabelle 5</b> - Kriterien zum Vergleich zweier Systeme .....	37
<b>Tabelle 6</b> - Daten über Hauptdimensionen und Gewicht für Riegl VUX-1 mit AP20 (Riegl, 2019) .....	42
<b>Tabelle 7</b> - Scannerdaten Leica (Z+F LIDAR Profiler, 2020) vs. Riegl (Riegl, 2019) .....	44
<b>Tabelle 8</b> - IMU Daten Leica (SPAN, 2020) vs. Riegl (Riegl, 2019).....	44
<b>Tabelle 9</b> - Allgemeine technische Daten, Leica vs. Riegl.....	44
<b>Tabelle 10</b> - Genauigkeitsanalyse für Bodenmarkierungen (Track A), Riegl MMS .....	56
<b>Tabelle 11</b> - Konfidenzintervall von 95% für berechneten Parameter bei Bodenmarkierungen (Track A), Riegl MMS.....	56
<b>Tabelle 12</b> - Genauigkeitsanalyse für Bodenmarkierungen (Track B), Riegl MMS .....	57
<b>Tabelle 13</b> - Konfidenzintervall von 95% für berechneten Parameter bei Bodenmarkierungen (Track B), Riegl MMS.....	57
<b>Tabelle 14</b> - Genauigkeitsanalyse für Bodenmarkierungen (Track A), Leica MMS.....	58
<b>Tabelle 15</b> - Konfidenzintervall von 95% für berechneten Parameter bei Bodenmarkierungen (Track A), Leica MMS .....	58
<b>Tabelle 16</b> - Genauigkeitsanalyse für Bodenmarkierungen (Track B), Leica MMS.....	59
<b>Tabelle 17</b> - Konfidenzintervall von 95% für berechneten Parameter bei Bodenmarkierungen (Track B), Leica MMS .....	59
<b>Tabelle 18</b> - Genauigkeitsanalyse für Bodenmarkierungen – Separater Bereich (Track A), Riegl MMS .....	60
<b>Tabelle 19</b> - Konfidenzintervall von 95% für berechneten Parameter bei Bodenmarkierungen – Separater Bereich (Track A), Riegl MMS .....	60
<b>Tabelle 20</b> - Genauigkeitsanalyse für Bodenmarkierungen – Separater Bereich (Track B), Riegl MMS .....	61
<b>Tabelle 21</b> - Konfidenzintervall von 95% für berechneten Parameter bei Bodenmarkierungen – Separater Bereich (Track B), Riegl MMS .....	61
<b>Tabelle 22</b> - Genauigkeitsanalyse für Profil 1, Riegl MMS .....	62
<b>Tabelle 23</b> - Konfidenzintervall von 95% für berechneten Parameter bei Profil 1, Riegl MMS .....	62
<b>Tabelle 24</b> - Genauigkeitsanalyse für Profil 2, Riegl MMS .....	63
<b>Tabelle 25</b> - Konfidenzintervall von 95% für berechneten Parameter bei Profil 2, Riegl MMS .....	63
<b>Tabelle 26</b> - Genauigkeitsanalyse für Profil 3, Riegl MMS .....	64
<b>Tabelle 27</b> - Konfidenzintervall von 95% für berechneten Parameter bei Profil 3, Riegl MMS .....	64
<b>Tabelle 28</b> - Genauigkeitsanalyse für Profil 4, Riegl MMS .....	65
<b>Tabelle 29</b> - Konfidenzintervall von 95% für berechneten Parameter bei Profil 4, Riegl MMS .....	65
<b>Tabelle 30</b> - Genauigkeitsanalyse für Profil 5, Riegl MMS .....	66

<b>Tabelle 31</b> - Konfidenzintervall von 95% für berechneten Parameter bei Profil 5, Riegl MMS .....	66
<b>Tabelle 32</b> - Genauigkeitsanalyse für Profil 6, Riegl MMS .....	67
<b>Tabelle 33</b> - Konfidenzintervall von 95% für berechneten Parameter bei Profil 6, Riegl MMS .....	67
<b>Tabelle 34</b> - Genauigkeitsanalyse für Profil 7, Riegl MMS .....	68
<b>Tabelle 35</b> - Konfidenzintervall von 95% für berechneten Parameter bei Profil 7, Riegl MMS .....	68
<b>Tabelle 36</b> - Genauigkeitsanalyse für Profil 1, Leica MMS .....	69
<b>Tabelle 37</b> - Konfidenzintervall von 95% für berechneten Parameter bei Profil 1, Leica MMS .....	69
<b>Tabelle 38</b> - Genauigkeitsanalyse für Profil 2, Leica MMS .....	70
<b>Tabelle 39</b> - Konfidenzintervall von 95% für berechneten Parameter bei Profil 2, Leica MMS .....	70
<b>Tabelle 40</b> - Genauigkeitsanalyse für Profil 3, Leica MMS .....	71
<b>Tabelle 41</b> - Konfidenzintervall von 95% für berechneten Parameter bei Profil 3, Leica MMS .....	71
<b>Tabelle 42</b> - Genauigkeitsanalyse für Profil 4, Leica MMS .....	72
<b>Tabelle 43</b> - Konfidenzintervall von 95% für berechneten Parameter bei Profil 4, Leica MMS .....	72
<b>Tabelle 44</b> - Genauigkeitsanalyse für Profil 5, Leica MMS .....	73
<b>Tabelle 45</b> - Konfidenzintervall von 95% für berechneten Parameter bei Profil 5, Leica MMS .....	73
<b>Tabelle 46</b> - Genauigkeitsanalyse für Profil 6, Leica MMS .....	74
<b>Tabelle 47</b> - Konfidenzintervall von 95% für berechneten Parameter bei Profil 6, Leica MMS .....	74
<b>Tabelle 48</b> - Genauigkeitsanalyse für Profil 7, Leica MMS .....	75
<b>Tabelle 49</b> - Konfidenzintervall von 95% für berechneten Parameter bei Profil 7, Leica MMS .....	75
<b>Tabelle 50</b> - <i>Genauigkeitsvergleich für Bodenmarkierung im Bereich: km 190,050 – km 193,650 für Track A, Riegl MMS vs. Leica MMS .....</i>	76
<b>Tabelle 51</b> - <i>Genauigkeitsvergleich für Bodenmarkierung im Bereich: km 190,050 – km 193,650 für Track A, Riegl MMS vs. Leica MMS .....</i>	76
<b>Tabelle 52</b> - <i>Genauigkeitsvergleich für Bodenmarkierung im Bereich: km 192,000 – km 193,600 zwischen beide Tracks bei Riegl MMS .....</i>	77
<b>Tabelle 53</b> - <i>Genauigkeitsvergleich für Querprofile im Bereich: km 190,050 – km 193,650, Riegl vs. Leica.....</i>	77
<b>Tabelle 54</b> - Punktdichte bei verschiedenen Oberflächen .....	80

## Einführung und Problemstellung

Anstoß zu dieser Masterarbeit war ein Projekt der Firma *Vermessung ADP Rinner ZT GmbH* für den Auftraggeber *ASFINAG*. Dieses Projekt umfasste die Erstellung der Planungsunterlagen zur geplanten Fahrspurverbreiterung der Autobahn A9 zwischen dem Knoten Graz-West (km 189,5) und der Anschlussstelle Wildon (km 201,5), mit einer Länge von 12 km.

Im klassischen Fall werden Bestandsaufnahmen von Autobahnen tachymetrisch durchgeführt, was sehr zeitaufwendig und kostenintensiv ist. Für das gegenständliche Projekt hätte diese Herangehensweise zur Folge gehabt, dass sämtliche Autobahnspuren sequenziell gesperrt hätten werden müssen. Der organisatorische und zeitliche Aufwand wäre dadurch enorm gestiegen und eine Staubildung wäre bei diesem verkehrsreichen Autobahnabschnitt unumgänglich gewesen. Auf Basis dieser Erkenntnisse wurde zur Datenerfassung für dieses Projekt ein Mobile-Mapping-System (MMS) herangezogen.

Die sehr hohen Anschaffungskosten eines MMS haben zur Folge, dass dieses System in Österreich bisher nicht weit verbreitet ist. Als eines der wenigen Unternehmen in Österreich, welches über ein solches Gerät verfügt, wurde JOANNEUM RESEARCH DIGITAL (JR) in das Projekt miteinbezogen. Der Autobahnabschnitt war 2018 von JR mit einem Leica-MMS aufgenommen worden. Die hierbei generierten Daten wurden für das gegenständliche Projekt übernommen.

Aus technischen Gründen (Kombination einer Vielzahl an Sensoren) besitzen MMS gewisse Fehler. Dementsprechend stellte sich die Frage, ob diese Fehlerabweichungen im geforderten Bereich von  $\pm 3$  cm in der Lage und  $\pm 1$  cm ( $1\sigma$ ) in der Höhe liegen, damit die Projektanforderungen seitens des Auftraggebers erfüllt werden können. Vor dem Hintergrund dieser Fragestellung wurde diese Masterarbeit ins Leben gerufen. Hierfür wurde ein zweites, auf dem Markt verfügbares Gerät verwendet, um einen Vergleich herzustellen. Das zweite Gerät des Herstellers Riegl befindet sich im gemeinsamen Besitz der Firmen Vermessung ADP Rinner ZT GmbH in Graz, Skyability GmbH in Eisenstadt und der Vermessung Angst ZT GmbH in Wien, wobei die Firma Skyability die Vermessung mit dem genannten System durchgeführt und die Daten zur Verfügung gestellt hat.

Zum Vergleich der Systeme wurde im Nachhinein ein Teilabschnitt des Projektbereichs von km 190,050 bis km 193,650 mit dem Riegl-MMS aufgenommen. Zur Georeferenzierung beider Systeme wurden Pass- und Kontrollpunkte tachymetrisch aufgenommen, wobei hierfür Bodenmarkierungen (Nebelpunkte, strichlierte Linien, usw.) verwendet wurden. Auf Basis der Passpunkte wurde eine indirekte Georeferenzierung durchgeführt und anhand der Kontrollpunkte die Genauigkeit dieser indirekten Georeferenzierung analysiert. Zusätzlich wurde ein Vergleich der Punktdichte und der LIDAR-Intensitätswerte durchgeführt.

Auf Basis der durchgeführten Analysen und der dabei gewonnenen Erkenntnisse wurden abschließend Schlussfolgerungen gezogen.

# 1 Mobile Mapping: Grundlagen

## 1.1 Einführung und Definition

In den letzten 30 Jahren haben sich MMS stetig weiterentwickelt. Dies geschah zunächst vor allem in akademischen Forschungseinrichtungen. Seit einigen Jahren gibt es mehrere Entwicklungen kommerzieller Anbieter aus dem Vermessungsbereich. Die meisten dieser Systeme werden für die Erfassung der Straßeninfrastruktur oder die Vermessung von Gebäudefassaden eingesetzt. Ihre Entwicklung wurde vor allem durch die Fortschritte bei der digitalen Bildgebung und den Technologien zur direkten Georeferenzierung vorangetrieben.

Die Forschungsgesellschaft JOANNEUM RESEARCH hat bereits im Jahr 2001 Forschungsaktivitäten im Pilotprojekt „Mobile Mapping“ durchgeführt. Es handelte sich hierbei um eine gemeinsame Initiative von Experten aus verschiedenen Bereichen. Dieses Team bestand aus Mitgliedern des damaligen Institutes für Digitale Bildverarbeitung der JOANNEUM RESEARCH, GPS- und Navigationsexperten des Instituts für Satellitengeodäsie der Österreichischen Akademie der Wissenschaften und des Instituts für Theoretische Geodäsie der Technischen Universität Graz. Die genannten Institutionen umfassen einen Großteil der notwendigen Expertise auf dem Gebiet der direkten Georeferenzierung und der Nahbereichsphotogrammetrie. Es wurden vier Demonstrationsanwendungen definiert: 3D-Modellierung von Städten, automatisierte Bauminventur, ökologische Präzisionslandwirtschaft und Optimierung der Schneeerzeugung (Urban et.al, 2001).

Vexcel Imaging mit ihrem Hauptsitz in Graz, haben für das Microsoft Virtual Earth Programm bereits 2007 MMS gebaut. Die auf maximale Erfassungseffizienz ausgelegte UltraCam Mustang befindet sich nun in der dritten Generation und seit ihrer Einführung im Jahr 2007 wurden mehr als 200 Systeme in Betrieb genommen (Vexcel Imaging GmbH, 2018).

In den letzten Jahren haben einige Unternehmen wie Leica, Riegl, Topcon etc. die Technologie in großem Maßstab übernommen, weiterentwickelt und auf dem Markt eingeführt. Heute sind diese Systeme gut etabliert und können als bewährt angesehen werden.

Um grundlegende Begriffe genauer zu verstehen, werden hier nun einige Definitionen angeführt.

(Schwarz & El-Sheimy, 1996) haben Mobile Mapping so definiert: *„Die Hauptaufgabe eines Mobile-Mapping-Systems ist nicht in erster Linie die Navigation, obwohl die Positionierung eine dominierende Rolle spielt. Tatsächlich zielt ein solches System auf die Positionierung einer beweglichen Plattform ab, die Sensoren zur Georeferenzierung bestimmter Objekte innerhalb der umgebenden Infrastruktur trägt. Aus diesem Grund werden Mobile-Mapping-Systeme auch als Bestandsaufnahme-system (eng. Inventory systems) bezeichnet. Mobile Mapping stellt eine heterogene Art der Sensorintegration dar, die sowohl aus Navigationssensoren als auch aus bildgebenden Sensoren besteht, die insgesamt zeitsynchronisiert und auf einer gemeinsamen Plattform montiert sind.“*

Eine zweite Definition kann man in (Li et.al, 2013) finden. Sie haben ein Mobile Mapping System als System, welches sich auf einer bewegten Plattform befindet und mit Sensoren zur

Navigation und zur Umgebungserfassung ausgestattet ist, definiert. Diese Plattform kann auf verschiedenen Fahrzeugen montiert werden, wie z.B. PKW, Flugzeug, Schiff etc. Zur Gruppe von Navigationssensoren gehören GPS (Global Positioning System) und INS (Inertial Navigation System). Diese Sensoren liefern die Informationen über Position (GPS) und Orientierung (INS) der bewegten Plattform. Digitalkameras, Laserscanner und/oder Radarsensoren bilden zusammen die Sensoren zur Umgebungserfassung. Diese Technologien bieten nicht nur eine hohe Flexibilität bei der Datenaufnahme, sondern auch die Möglichkeit einer großen Erfassung von Informationen mit geringerem zeitlichem Aufwand, sodass mit einer hohen Produktivität gerechnet werden kann.

Aus diesen Definitionen lässt sich ableiten, dass MMS Messsysteme sind, die zur Gruppe von Multi-Sensor-Systemen gehören. Ein Multi-Sensor-System ist ein integrales System, in dem mehrere Sensoren in einem System zusammengefasst werden.

Es gibt verschiedene Arten von Multi-Sensor-Systemen nach (Sternberg & Schwieger, 2014):

1. *Räumlich verteilt* (gleiche Sensoren erfassen dieselben Messgrößen an verschiedenen Orten)
2. *Redundant* (unterschiedliche Sensoren erfassen dieselben Messgrößen am selben Ort)
3. *Sich ergänzend* (unterschiedliche Sensoren erfassen unterschiedliche Messgrößen am selben Ort)

Das MMS nutzt die Art des **sich ergänzenden** Sensors. Alle Sensoren befinden sich auf einer gemeinsamen bewegten Plattform und müssen zeitlich synchronisiert sein. Zur Bestandsaufnahme können Helikopter und Flugzeuge, aber auch Oktokopter, Drohnen oder Modell-Helikopter verwendet werden. Für Innenbereichsaufnahmen bieten sich Trolleys oder Rucksäcke an. Eine gut geeignete und etablierte Form der mobilen Erfassung am Boden ist die Nutzung von dafür adaptierten Messfahrzeugen. Mobile Mapping folgt einem klaren Trend zur schnellen und effizienten Erfassung von Geodaten.

## 1.2 Systemkomponenten

Wie im vorigen Kapitel definiert, besteht ein MMS aus Navigationssensorik und Sensorik zur Umgebungserfassung auf einer gemeinsamen Plattform. Zusätzlich werden komplexe Softwaretools für die Prozessierung der Rohdaten bis hin zu den georeferenzierten Daten benötigt.

### 1.2.1 Navigationssensorik

Die Navigationssensoren im Mobile-Mapping-Bereich umfassen eine Gruppe von Sensoren, mit deren Hilfe die Trajektorie einer bewegten Plattform berechnet werden kann:

- GNSS – Globales Satellitennavigationssystem (absolute Position),
- INS – Inertiales Navigationssystem (relative Position und Orientierung),
- Odometrie – Weglängenmessung.

Wenn ein Navigationssystem mehr als einen Sensor gleichzeitig verwendet, wird das Verfahren als integrierte Navigation bezeichnet und die Bestimmung des Zustandsvektors (Position, Geschwindigkeit und Lage) des Fahrzeugs muss den Prinzipien der Sensorfusion folgen (Hofmann-Wellenhof et.al, 2003).

Um die Positionsbestimmung mittels GNSS durchführen zu können, muss der Empfänger die Signale von mindestens vier Satelliten zur selben Zeit empfangen können. Dabei werden die Pseudo-Signallaufzeiten gemessen und die derzeitige Position sowie der Uhrenfehler ermittelt. Die Daten über die Position der Satelliten sind in den empfangenen Navigationsnachrichten aufgezeichnet, daher kann in einem erdfesten und geozentrischen Koordinatensystem (z.B.: WGS84 bei GNSS) die Position des Empfängers genau berechnet werden (Hofmann, 2017).

Um eine relative Positionsbestimmung anhand von Akzelerometern und Kreiseln durchführen zu können, werden sogenannte Inertiale Navigationssysteme (INS) verwendet. Mehrere Akzelerometern und Kreiseln sind beim INS so ausgerichtet, dass in allen drei Raumrichtungen die Beschleunigung und Drehraten erfasst werden können (Lesjak, 2010). (Titterton & Weston, 2004) haben INS so definiert: „*Unter Inertialnavigation versteht man den Prozess der Bestimmung von Position, Geschwindigkeit, Attitude und Heading eines Fahrzeugs mittels Messdaten von inertialen Sensoren.*“

INS kommen immer dann zum Einsatz, wenn die satellitengestützte Positionierung an ihre Grenzen stößt. Zum Beispiel, wenn Mobile Mapping Systeme in städtischen Gebieten eingesetzt werden (Hofmann, 2017).

In der Literatur kann man drei Abkürzungen für inertielle Navigationssysteme finden (Längauer, 2010):

1. Inertial Measurement Unit – IMU
2. Inertial Measurement System – IMS
3. Inertial Navigation System – INS (derzeit Standard in MMS)

Den Unterschied zwischen IMU und INS beschreibt (Lesjak, 2010) wie folgt: „*Um Inertialnavigation betreiben zu können, benötigt man entweder eine inertielle Messeinheit (IMU) oder ein inertielle Navigationssystem (INS). Streng genommen ist eine IMU ein Messsystem bestehend aus mehreren Accelerometern und Gyros, um die Beschleunigungen und Drehraten in allen drei Raumrichtungen zu erfassen. Dazu verwendet man entweder jeweils drei Einachsinstrumente oder sogenannte Mehrachsinstrumente. Zusätzlich beinhaltet eine IMU die notwendige Elektronik und einen optionalen Mikroprozessor zur Kompensation etwaiger Sensorfehler. Ein INS erweitert die IMU um einen Mikroprozessor zur Echtzeitpositionierung wie auch zur Integration mit anderen Sensoren wie z. B. GNSS (Global Navigation Satellite System).*“

Die Integration von satellitengestützter Navigation und Inertialnavigation ist ein Beispiel für den komplementären Ansatz in der Sensorfusion. Typischerweise werden Strapdown-Inertialnavigationssysteme (INS) zusammen mit verschiedenen Arten von GNSS-Empfängern verwendet. Die Haupteinschränkung für die weitverbreitete Nutzung von GNSS/INS-Lösungen sind die immer noch hohen Kosten des INS (Hofmann-Wellenhof et.al, 2003).

### 1.2.1.1 Attitudenwinkel

Die Attitude, auch Raumlage genannt, gibt Auskunft über die Ausrichtung eines körperbezogenen Koordinatensystems relativ zum Navigationskoordinatensystem. Zu diesem Zweck werden drei Attituden-Winkel angegeben, wobei roll (r) dem Rotationswinkel um die x-Achse, pitch (p) dem Rotationswinkel um die y-Achse und yaw (y) dem Rotationswinkel um die z-Achse entspricht. Mithilfe dieses Achsensystems kann man auf die Ausrichtung eines Körpers im Verhältnis zum lokalen Horizontsystem Rückschlüsse ziehen. Um die direkte Bewegungsrichtung eines Körpers zu beschreiben, wird yaw auch heading genannt, verwendet (Moder, 2011).

Es existieren drei Möglichkeiten, um die Attitude eines Körpers darzustellen:

- Eulerwinkel
- Rotationsmatrizen
- Quaternionen

Die einfachste Möglichkeit, die Attitude festzulegen, ist mit Hilfe des Eulerwinkels über Drehmatrizen.

Die Hauptvorteile der GNSS/INS-Integration bestehen darin, dass GNSS dazu geeignet ist die langfristigen Drift-Effekte, die ein INS erfährt, zu begrenzen. Die Inertialnavigation ermöglicht es, GNSS-Ausfälle aufgrund von Signalblockaden, Störungen oder Spoofing zu überbrücken. Ein generelles Problem der komplementären Sensorfusion besteht jedoch darin, dass ungewöhnliche Ausfälle, die eines der Subsysteme betreffen, schwer zu erkennen und zu identifizieren sind. Ein INS kann z.B. kaum mögliche langfristige GNSS-Positionsverzerrungen aufdecken (Beyer & Wigger, 2001).

### 1.2.1.2 GNSS vs. INS

Während GNSS in der Regel eine gute, langfristig wiederholbare (und absolute) Genauigkeit bietet, wird die kurzfristige Leistung durch den hohen Rauschpegel insbesondere bei codebasierten Lösungen beeinträchtigt. Ein INS zeichnet sich durch ein komplementäres Verhalten aus: Die kurzzeitige wiederholbare Genauigkeit ist hoch, während niederfrequente Drift-Effekte, die durch Sensorfehler verursacht werden, die langfristige Leistung verschlechtern. Die Kalibrierung eines INS mit GNSS führt zu einer signifikanten Verbesserung des Langzeitverhaltens des INS. Die Verfügbarkeit von GNSS wird durch Signalhindernisse beeinträchtigt, die keine Auswirkungen auf die Inertialnavigation haben (Hofmann-Wellenhof et.al, 2003).

<b>Eigenschaften</b>	<b>GNSS</b>	<b>INS</b>
<b>Operation</b>	<i>Nicht-autonom</i>	<i>Autonom</i>
<b>Information</b>	<i>Absolut</i>	<i>Relativ</i>
<b>Ausgaberate</b>	<i>Typischerweise 1 Hz</i>	<i>50Hz oder mehr</i>
<b>Kurzzeitgenauigkeit</b>	<i>Niedrig</i>	<i>Hoch</i>
<b>Langzeitgenauigkeit</b>	<i>Hoch</i>	<i>Niedrig</i>

<b>Verfügbarkeit</b>	<i>Begrenzt</i>	<i>Unbegrenzt</i>
<b>Verwundbarkeit/ Anfälligkeit</b>	<i>Hoch</i>	<i>Keine</i>

**Tabelle 1** - GNSS vs. INS nach (Hofmann-Wellenhof et.al., 2003)

### 1.2.1.3 Möglichkeiten der Implementierung

Es werden drei Hauptoptionen für die Implementierung eines integrierten GNSS/INS unterschieden:

- ungekoppelte Integration,
- lose gekoppelte Integration und
- eng/fest gekoppelte Integration

Manchmal wird eine noch detaillierte Spezifikation vorgeschlagen (Hofmann-Wellenhof et.al., 2003). Zusätzlich gibt es noch die ultra-enge Koppelung. Dies ist die jüngste Integrationsart.

### 1.2.1.4 Updates

Abhängig von der Tiefe der Kopplung, kommen bestimmte Algorithmen zum Einsatz. Diese dienen einer Verbesserung der Positionslösungen, welche auch Updates genannt werden. Die Kopplung mehrerer Sensoren hat den Nutzen, dass eine gegenseitige Stützung der Sensormessung möglich ist. Abhängig von der Art der verwendeten Sensoren und Sensorkopplung, wird die Entscheidung für eine gegenseitige Stützung gefällt. Updates, welche nachfolgend noch beschrieben werden, hängen nicht nur von der Sensorfusion ab, sondern auch von externen Informationen (Moder, 2011).

Zu den bekanntesten Arten der Updates zählen:

- Zero Velocity Update (ZUPT)
- Coordinate Update (CUPT)
- Velocity Update (VUPT)
- Attitude Update (AUPT)

Unter ZUPT versteht man die Bestimmung bestimmter Sensorfehler während detektierter Stillstandsphasen des Fahrzeugs.

CUPT sind Updates, die aus Informationen über einer absoluten Position bestehen. Das sind Koordinaten in einem bestimmten Zeitpunkt. CUPT Updates kommen am besten zum Einsatz dort wo GNSS an der Grenze kommt, z.B. im Tunnelbereich.

VUPT sind Updates, die zusätzliche Geschwindigkeitsinformationen liefern. Diese Informationen kann man aus GNSS und Odometer ableiten.

AUPT sind Updates, die Attitude-Lösungen deutlich verbessern können. Um diesen Updates zu gewinnen, benötigt man mindestens drei GNSS-Empfänger.

Detaillierte Informationen sind in (Moder, 2011) zu finden.

### 1.2.1.5 Odometrie

GNSS ist nicht die einzige Möglichkeit zur Unterstützung der Inertialnavigation. Für spezielle Umgebungen können auch weitere Sensoren zur Unterstützung der Lösung hinzugezogen werden. Ein für Bodenfahrzeuge oft verwendeter Sensor ist ein Odometer (Radsensor). Dieses liefert eine weitere unabhängige Messung von Weg und Geschwindigkeit, wodurch die GNSS-INS-Navigationslösung zusätzlich unterstützt werden kann. Dies ist vor allem dann von Nutzen, wenn GNSS nicht verfügbar ist, z.B. bei der Fahrt durch einen Tunnel.

## 1.2.2 Sensoren zur Umgebungserfassung

Zu dieser Gruppe von Sensoren gehören z.B. Laserscanner und Kameras oder eine Kombination aus beiden.

### 1.2.2.1 Laserscanner

Moderne Vermessungsgeräte (wie z.B. 3D-Laserscanner) erfassen die Umgebung dreidimensional, indem der Scanner einen Laserstrahl aussendet und dessen horizontale und vertikale Richtung misst. Zusätzlich misst der Laserscanner die Entfernung zu einer Oberfläche, sowie über die zurückkehrende Lichtmenge deren Reflektivität. Aus diesen Daten kann der Laserscanner die dreidimensionalen Koordinaten und einen Intensitätswert eines einzelnen Oberflächenpunktes ableiten. Aus der Kombination aller Einzelpunkte entsteht eine sogenannte „Punktwolke“. Die Punktwolke ist ein digitaler Abdruck der Realität. Zum 3D-Laserscanning gehören auch das Airborne Laserscanning (ALS) und das Terrestrische Laserscanning (TLS). ALS und TLS werden zunehmend durch mobiles Laserscanning (MLS) ergänzt (Leica Geosystems, 2018).

Die reflektorlose Distanzmessung bei Laserscannern basiert sowohl auf dem *Impulslaufzeitverfahren* (z.B. Riegl VUX-1UAV) als auch auf dem *Phasenvergleichsverfahren* (z.B. Z+F Profiler 9012).

Beim Impulslaufzeitverfahren sendet der Sender einen Laserimpuls zum Zielobjekt aus. Dieser wird am Objekt reflektiert um vom Gerät (jetzt dem Empfänger), erfasst zu werden. Das Gerät misst die Laufzeit des Laserstrahls. Aus dieser Zeitmessung kann die Strecke zwischen Messgerät und Zielobjekt ermittelt werden. Diese Strecke ist von der Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichts und der Zeitmessung abhängig. Das Impulslaufzeitverfahren eignet sich besonders für große Messentfernungen.

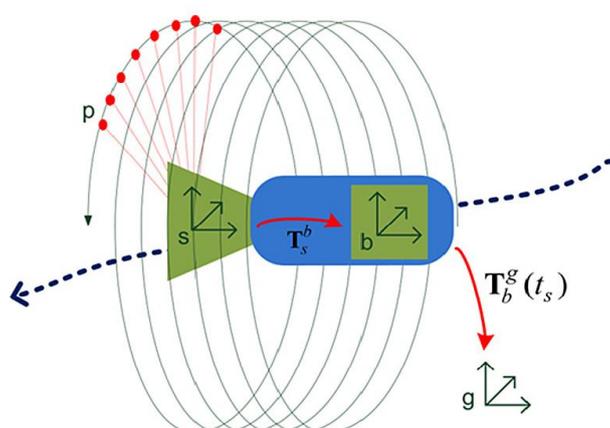
Beim Phasenvergleichsverfahren bestimmt man die Strecke über die empfangene Trägerwelle des Laserstrahls. Hierbei wird die Strecke aus den ganzzahligen Schwingungen und dem resultierenden Wellenreststück zusammengesetzt. Diese Strecke ist stark von der Dichte der Atmosphäre abhängig. Das Phasenvergleichsverfahren eignet sich besonders für kleine Messentfernungen (bis 200m).

Mehr über diese Verfahren findet man in (Kuhlmann & Holst, 2017).

### **Kinematischer Einsatz von Laserscannern**

Der kinematische Einsatz von Laserscannern stellt ein etabliertes Verfahren zur kinematischen Vermessung von Umgebungen dar. Im Vergleich mit der statischen Vermessung sind beim kinematischen Einsatz die geometrischen Messgrößen zusätzlich an die Zeit gekoppelt (Gräfe, 2017).

Der Vorteil vom Einsatz kinematischer Scanner im Straßenbereich liegt in der detaillierten und großräumigen Aufnahme von Straßenkorridoren. Die statischen Verfahren sind in diesem Bereich nicht wirtschaftlich, weil sie mit hohem zeitlichem und finanziellem Aufwand verbunden sind. Ausnahmen bei der Anwendung von statischen Verfahren sind Aufnahmen kürzerer Abschnitte, wie z.B. bei der Tunnel- oder Brückenvermessung.



**Abbildung 1** - Idealisierte Darstellung des kinematischen Laserscannings nach Klingbeil & Kuhlmann (2018)

Abbildung 1 zeigt ein idealisiertes Beispiel für ein kinematisches Laserscanning nach (Klingbeil & Kuhlmann, 2018). Der Laserscanner befindet sich auf einer mobilen (bewegten) Plattform, wobei der Laser um eine Achse rotiert und dabei eine schnelle Abfolge der Distanzmessung ausführt. Hierbei wird aufgrund der Bewegung der Plattform die Umgebung spiralförmig abgebildet (Klingbeil & Kuhlmann, 2018).

Hierbei handelt es sich um einen Spezialfall eines 3D-Laserscanners. Es besteht die Möglichkeit, den 3D-Laserscanner so zu betreiben, dass es nur zu einer vertikalen Strahlableitung um die Stehachse kommt, indem nur die Profilschans erfasst werden. Für diese Zwecke wurden spezielle Profils Scanner entwickelt. Diese werden auf fahrenden Plattformen verbaut. In Kombination mit der Vorwärtsbewegung ergibt sich eine vollständige 3D-Punktwolke. Profils Scanner sind vor allem für mittlere Genauigkeitsanforderungen konzipiert (typisch 5 - 20mm Distanzmessgenauigkeit bis 100 m). Hierzu zählen z.B. die Steuerung autonomer Fahrzeuge, Sicherheitssysteme oder Körperscanner (Luhmann, 2018).

Als Beispiel können Scanner wie VUX-1HA der Firma RIEGL Laser Measurement Systems GmbH oder die 2D-Scanner der Firma SICK AG genannt werden. Beispiele für 3D -Scanner sind der Scanner Z+F Profiler 5016 (Zoller + Fröhlich GmbH) und der FARO Focus 3D X330 (Hofmann, 2017).

## Anforderungen an Laserscanner für MMS - Anwendungen

Es lassen sich folgende, nach (Gräfe, 2017) zusätzliche Kriterien zur Auswahl geeigneter Laserscanner festlegen:

- *„Hohe Messgeschwindigkeit, d.h. hohe Wiederholungsfrequenz von regelmäßigen Abtastungsmustern. Im einfachsten Fall handelt es sich um Profilmessungen mit jeweils möglichst vielen Messpunkten.*
- *Auflösung und Messunsicherheit der Streckenmessung im mm-Bereich oder darunter*
- *Hohe Zuverlässigkeit der reflektorlosen Entfernungsmessung*
- *Robuste Signalauswertung, auch bei unterschiedlicher Reflektivität der Oberfläche*
- *Geringe Störanfälligkeit durch Umgebungseinflüsse, wie z.B. Sonnenlicht*
- *Stabilität der Sensorkalibrierung auch bei längeren Messzeiten*
- *Unempfindlichkeit gegenüber mechanischen Störungen durch die Bewegungen des Trägerfahrzeuges*
- *Begrenzte Leistung des Laserlichtes zur Gewährleistung der Augensicherheit*
- *Reichweite des Scanner mindestens 10 m*
- *Zuverlässige Ermittlung der Winkelstellung des Ablenkspiegels bei jeder Messung*
- *Synchronisierbarkeit in Bezug auf ein externes Zeitsignal“*

### 1.2.2.2 Kameras

Neben dem Laserscanner gehören auch Kameras zu den Sensoren, mit denen die Umgebung erfasst werden kann. Kameras liefern Bildinformationen, die radiometrisch und geometrisch in Form einer Pixelmatrix ausgewertet werden. Jeder einzelne Pixel beinhaltet einen Intensitäts- oder Helligkeitswert. Die Graustufen und somit die Auflösung eines Sensors wird über die Bitanzahl bestimmt. In der Regel beträgt diese 8 Bit, wodurch 256 Graustufen von schwarz bis weiß zur Verfügung stehen. Um eine ausreichend große Dynamik zu erreichen sind heute 10-12 Bit Standard.

Die üblichen Bildsensoren in digitalen Kameras sind CMOS- oder CCD-Sensoren. Je nach einfallender Wellenlänge werden die einzelnen Farben mittels RGB-Pixel dargestellt. Grundsätzlich unterscheiden sich die Sensoren nur in der spektralen Empfindlichkeit, der Größe und der Anzahl der Pixel. Zum Sensor muss auch ein Objektiv gewählt werden, dessen Leistungsfähigkeit (Auflösungsvermögen) an die Auflösung des Sensors angepasst ist. Die Brennweite des Objektivs bestimmt den Blickwinkel (Field of View, FOV), d.h. Weitwinkel, Normalwinkel oder Tele. Für Messkameras werden (fast) ausschließlich Objektive mit Fixbrennweite und Fixfokus/Fixblende eingesetzt, um eine stabile Kalibrierung zu erreichen.

Neben diesen Parametern müssen noch folgende Aspekte beachtet werden: Matrix- oder Zeilenkamera, Schwarzweiß- oder Farbkamera, Schnittstellen, Bildrate (maximale Anzahl der Bilder pro Sekunde), spektrale Empfindlichkeit sowie Objektivanschluss (Moritz et.al, 2013).

In Multisensorsystemen werden Kamera und Laserscanner kombiniert. Um die Kombination von Punktwolke und Bild zu ermöglichen, muss die Kamera im Koordinatensystem des Laserscanners kalibriert und orientiert sein.

In (Luhmann, 2018) wird ein Überblick der möglichen Kombinationen von Kamera und Laserscanner aufgezeigt:

- **Einfärben von Punktwolken:** Für jeden Scanpunkt sind 3D-Koordinaten verfügbar. Aus diesem Grund können diese mithilfe von Kollinearitätsgleichungen im Bild neu berechnet werden. Die entsprechenden Farbwerte werden abgerufen und 3D-Punkten zugewiesen.
- **Registrierung:** Die Bildinformationen können verwendet werden, um die 3D-Transformation von Punktwolken in ein übergeordnetes Koordinatensystem, während der Registrierung, zu unterstützen. (Erkennung von Zielmarken)
- **Monoplotting:** Das gewünschte Merkmal wird im Bild gemessen, und die 3D-Koordinaten des Merkmals werden durch Schneiden des Bildstrahls unter Verwendung eines aus der Punktwolke abgeleiteten Oberflächenmodells (Dreiecksvermaschung) bestimmt.
- **Orthophotos:** Projiziert man das Oberflächenmodell orthogonal auf die Referenzebene und füllt diese mit Farbwerten, so kann man aus dem orientierten Bild ein echtes Orthophoto erhalten.
- **Zentralprojektion:** Es ist möglich, aus dem Originalbildern ein Gesamtbild zu erzeugen, das die Eigenschaft der Zentralprojektion aufweist.
- **Panoramabild:** Stimmen Projektionszentrum und Rotationszentrum überein, so kann mithilfe von mehreren überlappenden Bildern ein direktes verzerrungsfreies Panoramabild berechnet werden.

Die äußere Orientierung von diesen Sensoren wird in jedem Fall durch die zuvor beschriebenen Navigationssensoren gewonnen. Das geht nur unter Berücksichtigung der Systemkalibrierung, d.h. Hebelarme und Boresight-Winkel aller Sensoren in Bezug auf die IMU.

## 1.3 Kalibrierung und Synchronisation

### 1.3.1 Begriff "Kalibrierung"

Die Qualität der Punktwolke ist unter anderem stark von der **Kalibrierung** des MMS abhängig (auf die anderen Einflüsse wird im Kapitel 1.5 eingegangen).

Der Zusammenhang zwischen angezeigtem und tatsächlichem Messwert wird **Kalibrierung** genannt. Bestimmt man signifikante, reproduzierbare Messabweichungen, so können diese unter anderem zur Verbesserung der Messgenauigkeit als Kalibrierparameter beitragen (Gottwald et.al, 2009).

Jeder Sensor eines MMS liefert einen unabhängigen Messwert in Bezug auf das jeweilige Sensorkoordinatensystem ohne feste Relation zum Plattformkoordinatensystem. Um feste Relationen zu gewinnen, müssen Lage und Orientierung der einzelnen Sensoren als sogenannte Hebelarme bzw. Boresight-Winkel entsprechend bestimmt werden.

Aus diesem Grund lässt sich die Kalibrierung eines MMS in die **Sensorkalibrierung** und die **Plattformkalibrierung** untergliedern.

### 1.3.2 Sensorkalibrierung

Die Sensorkalibrierung ist die Kalibrierung jedes einzelnen Sensors, der sich auf der bewegten Plattform befindet. Diese Bestimmung von internen systematischen Abweichungen aller Sensoren wird vom Hersteller bestimmt (**Laborkalibrierung**) (Klingbeil & Kuhlmann, 2018).

Bei jedem Sensor kommt es zu systematischen Messfehlern. Mithilfe einer Laborkalibrierung können diese Fehler bestimmt werden. Die Kalibrierwerte werden dann vor der weiteren Verarbeitung als Korrektur an die Messdaten angebracht. Zu diesen Fehlern gehören nach (Gräfe, 2017) z.B. **Nullpunktfehler**, **Maßstabsfehler**, **Nichtlinearitäten** oder **Temperaturabhängigkeiten**. Für mehrdimensionale Sensoren müssen komplexere Methoden verwendet werden, beispielsweise die Berücksichtigung von Kamera-Verzerrungsparametern (Gräfe, 2017).

Die Sensorkalibrierung erfolgt auf Herstellerseite. Auf Anwenderseite kann ein Feldprüfverfahren durchgeführt werden, um die Richtigkeit der Messung zu überprüfen. Im Fall eines nicht bestandenen Tests sollte das Messgerät einer Laborkalibrierung zugeführt werden (Sternberg & Schwieger, 2014).

### 1.3.3 Plattformkalibrierung

Für die Plattformkalibrierung ist zunächst die Bestimmung eines gemeinsamen Koordinatensystems für alle Sensoren des MMS notwendig. In diesem müssen sodann die relative Orientierung (Boresight-Winkel) und Positionierung (Hebelarme) aller Sensoren bezüglich eines Referenzsensors bestimmt werden. (Strübing & Neumann, 2013). Als Referenzsensor dient die IMU. Alle anderen Sensoren müssen bezüglich der IMU kalibriert sein.

In Bezug auf MMS gibt es keine standardisierte Methode zur Plattformkalibrierung. Eine Laborkalibrierung kann nur teilweise durchgeführt werden, da das GNSS/IMU-System „aktiv“ sein muss. In der Regel werden eine Feldkalibrierung z.B. durch einen Kalibrierflug (bei Luftbildkameras) oder eine Kalibrierfahrt unter Verwendung spezieller Targets für Kameras und LIDAR durchgeführt.

### 1.3.4 Kalibriermethoden (Ansätze)

(Heinz et.al, 2020) und (Lichti & Skaloud, 2010) geben einen Überblick über die Ansätze zur Laborkalibrierung und Feldkalibrierung von MMS.

#### 1.3.4.1 Laborkalibrierung

Im Labor werden die Hebelarme und Boresight-Winkel mithilfe von Zusatzsensorik durch direkte oder indirekte Messung bestimmt. Diese Zusatzsensorik kann eine Totalstation, ein Lasertracker etc. sein (Heinz et.al, 2020).

Ein Hebelarm ist nichts anderes als ein Exzentrizitätsvektor zwischen den Zentren zweier Sensoren. Wie in Kapitel 1.3.3. beschrieben sollten die Hebelarme aller verfügbarer Sensoren in Relation zur IMU bestimmt werden.

Hebelarme, die im Labor seitens des Herstellers bestimmt werden, sind:

- Hebelarm zwischen GNSS – Empfänger und IMU,
- Hebelarme zwischen Kameras und IMU und
- Hebelarm zwischen Hauptscanner und IMU.

Beim System Leica Pegasus wird die Kalibrierung beim jährlichen Service des Herstellers durchgeführt (Factory-Calibration). Hierfür wird ein Kalibrierzertifikat ausgestellt (Nachweis der Kalibrierung).

Im Gegensatz dazu muss beim Hersteller Riegl eine Feldkalibrierung der gesamten Plattform durchgeführt werden, da die Komponenten sehr flexibel montiert werden können.

#### 1.3.4.2 Feldkalibrierung

Bei der Feldkalibrierung der Systeme sind geometriebasierte Ansätze weit verbreitet. Diese nutzen die Bedingungsgleichungen, welche sich zwischen den geometrischen Objekten und Scanpunkten befinden. Es werden Objekte herangezogen, deren Form leicht zu parametrisieren ist. Neben den geometriebasierten Ansätzen verwendet man auch die ebenenbasierten Ansätze. Diese kommen vor allem in den Bereichen Airborne Laserscanning, schiffsgebundene Systeme, fahrzeuggebundene Systeme und Indoor-Systeme zum Einsatz (Heinz et.al, 2020).

Falls Zusatzsensorik vorhanden ist, können durch den Anwender folgende Hebelarme selbst bestimmt werden:

- Hebelarm zwischen dem zweiten GNSS – Empfänger und IMU,
- Hebelarm zwischen Odometer und IMU,
- Hebelarm zwischen dem zweiten LIDAR Scanner und IMU

Diese Bestimmungen erfolgen durch indirekte Messungen mit einer Totalstation. Es wird hierbei die Distanz zwischen den Zentren der Sensoren und dem Referenzpunkt des Gesamtsystems gemessen. Dieser Referenzpunkt liegt außerhalb des Systems auf der Hauptplattform und wird vom Hersteller bestimmt.



Abbildung 2 - Beispiel für Referenzpunkt bei Leica Pegasus. Entnommen aus (Leica Geosystems, 2016)

Die gemessenen Distanzen werden durch Software ins System eingebracht. Durch die Software werden die wahren (echten) Hebelarme zwischen IMU und den Zusatzsensoren bestimmt.

Für die Kalibrierung des zweiten Scanners wird eine spezielle Strecke (eng. Track) benötigt. Die Hauptvoraussetzung für diesen Track ist eine gute GNSS-Abdeckung. Im Kalibrierungsbereich sollten keine Glaswände, Bäume oder anderen Hindernisse (Fußgänger oder fahrende Autos) vorhanden sein. Im Postprocessing wird ein Ausgleich durchgeführt, in dem die Punktwolke des Hauptscanners als Referenz dient. Anhand der mit hoher Genauigkeit aufgenommenen Referenzobjekte und der Überlappung mit der Punktwolke des Hauptscanners berechnet die Software die Kalibrierparameter des Scanners und eine zugehörige Kalibrationsdatei. Diese werden dann später für die Erzeugung der Punktwolke verwendet. Neben der Kalibrationsdatei erstellt die Software auch eine Datei, welche die durchschnittlichen Residuen beinhaltet. Diese geben einen Hinweis auf die Qualität der Ergebnisse (Leica Geosystems, 2019).

### 1.3.5 Synchronisation der Sensoren

Die sogenannte Sensorfusion ist ein wichtiges und zentrales Element der heutigen Navigationssysteme. Um Position und Orientierung bestimmen zu können, werden hier die Messgrößen von mehreren Sensoren aufgezeichnet und mathematisch zusammengefasst. Somit nimmt auch die zeitliche Synchronisation von einzelnen Sensoren immer mehr an Wichtigkeit zu (Perry & Childs, 2009).

Die Synchronisation setzt sich mit der Fragestellung „Wie können Sensordaten zeitlich zueinander in Beziehung gesetzt werden“ auseinander. Demnach wird genau nach dem Zeitpunkt der Sensordaten-Gültigkeit gesucht. Hier wird eine Präzision der Synchronisation erwartet, welche von der Dynamik der Bewegungen des Objektes abhängig ist. Um die Synchronisation durchführen zu können, sollten Sensoren grundlegende Synchronisations-Funktionen besitzen. Falls jedoch der Sensor die aufgenommenen Daten nur über eine Schnittstelle abgeben kann, übernimmt der Controller des Messsystems die zeitliche Verknüpfung. Bei den heutigen Systemen arbeiten Controller, Sensor und die Schnittstellen mit sehr hohen Frequenzen, damit Latenzzeiten nur einen Einfluss in Präzisionsanwendungen haben, z.B. bei Airborne Laserscanning (Wieser, 2013).

(Gräfe, 2017) stellt in seiner Dissertation folgende Anforderungen an die Synchronisation der Sensoren:

- *„Die Erfassung der Daten für alle Sensoren inklusive der Sensoren zur Bestimmung der Trajektorie erfolgt in Bezug auf eine einheitliche Zeitbasis.*
- *Die Güte der zeitlichen Synchronisation soll so hoch sein, dass der räumliche Bezug der jeweiligen Sensormessung ohne signifikante Bewegungsunschärfe hergestellt werden kann.*
  - *Beispiel: Eine Unsicherheit in der Zeitzuordnung von 1 ms entspricht bei einer Messgeschwindigkeit von 20 m/s einer zurückgelegten Strecke von 2 cm.*
- *An die Verfügbarkeit, die Stabilität und die Zuverlässigkeit der zeitliche Synchronisation der Messungen sind höchste Anforderungen zu stellen.*
- *Die Definition der erforderlichen Genauigkeit für die zeitliche Zuordnung richtet sich im Wesentlichen nach*

- *der Auflösung der eingesetzten Sensoren,*
- *der angestrebten Messgenauigkeit und*
- *der vorgesehenen Bewegungsgeschwindigkeit.*

*Jeder Sensor verfügt über eine eigene, interne Uhr. Die Synchronisation der internen Uhr zur Systemzeit kann je nach Sensor auf zwei Arten erfolgen:*

- *Einspeisung eines Taktsignals in den Sensor*
- *Kennzeichnung der Messwerte mit einem Zeitstempel“*

Bei dieser Methode wird die interne Uhr eines Sensors direkt synchronisiert und wird daher wegen der Betriebssicherheit anderen Verfahren vorgezogen. Eignet sich ein Sensor nicht für die Einspeisung eines externen Taktsignals, so wird die softwaremäßige Kennzeichnung mit einem Zeitstempel eingesetzt. Beide Methoden werden bei außergewöhnlichen Fällen zur zeitlichen Homogenisierung miteinander eingesetzt. Das PPS (Puls- Pro- Sekunde) des GPS wird als Synchronisationstakt verwendet. Normale PC- Uhren oder PC-Betriebssysteme können hier nicht angewendet werden, da diese den hohen Anforderungen nicht entsprechen und nicht echtzeitfähig sind (Gräfe, 2017).

Nur so können die Messungen vom Plattformkoordinatensystem in das globale Koordinatensystem transformiert bzw. **georeferenziert** werden.

## 1.4 Georeferenzierung

### 1.4.1 Definition

Als eine der Hauptaufgaben bei der Verarbeitung von Mobile-Mapping-Daten wird die Georeferenzierung als das Verfahren der Transformation von hauptsächlich dreidimensionalen Koordinaten, die aus Messungen im sensorspezifisches Koordinatensystem (Sensorsystem) gewonnen werden, in einen Kartierungsrahmen (Mapping frame), in dem die Ergebnisse benötigt werden definiert (Hofmann-Wellenhof et.al., 2003).

Während der Aufnahme misst jeder Sensor spezifische Daten. In das Zielkoordinatensystem kommen diese spezifischen Daten durch mehrere Transformationen. Die Daten werden zuerst vorverarbeitet und dann Schritt für Schritt transformiert (Gräfe, 2017).

Wie im Kapitel 1.3 beschrieben, gehören die Berücksichtigung und das Anbringen der Sensorkalibrierung zur Vorverarbeitung. Ebenfalls benötigt man die Hebelarme und Boresight-Winkel jedes Sensors relativ zum Bezugspunkt auf der Plattform, für den dann die Trajektorie berechnet wird. Hierbei ist der Boresight-Winkel kritisch. Dieser beschreibt die Rotation zwischen Kamera/Laserscanner und IMU.

Für die Georeferenzierung werden verschiedene Koordinatensysteme verwendet:

Sensor → Plattform → Topozentrisch → Geozentrisch → Anwender

Zuerst werden die Messdaten von jedem einzelnen Sensorkoordinatensystem mit Ursprung im Zentrum des Sensors in das Plattformkoordinatensystem transformiert. Der neue Ursprung ist ein definierter Referenzpunkt auf der Plattform mit der X – Achse in Fahrtrichtung, Y nach rechts und Z nach oben. Vom Plattformkoordinatensystem werden die Messdaten weiter ins

topozentrische Koordinatensystem transformiert, wobei der neue Ursprung im lokalen Horizontsystem liegt. Hierbei ist die X – Achse nach Norden, die Y – Achse nach Westen und die Z - Achse nach oben ausgerichtet. Die nächste Transformation erfolgt zwischen dem topozentrischen und dem geozentrischen Koordinatensystem. Der Ursprung und die Achsen des Referenzellipsoids (WGS-84) sind jetzt der Ursprung und die Achsen des geozentrischen Koordinatensystems. Die letzte Transformation findet zwischen dem geozentrischen Koordinatensystem und dem Anwenderkoordinatensystem statt (Gräfe, 2017).

Bei der Georeferenzierung unterscheidet man zwischen zwei Arten:

1. Direkte Georeferenzierung
2. Indirekte Georeferenzierung

#### 1.4.2 Direkte Georeferenzierung

(Glira, 2012) definiert die **direkte Georeferenzierung** als Methode, welche die direkte Position und Orientierung des Messsystems, durch Einsatz aller eingebauten Sensoren, misst.

Bei den direkten Georeferenzierungslösungen werden die Integration von GNSS- und IMU-Sensordaten zur Positions- und Lagebestimmung eingesetzt. Eine wichtige Grundlage für MMS war nach (Hofmann, 2017) die „*Entwicklung der direkten Georeferenzierung mittels satellitengestützter Verfahren*“. Mithilfe von zusätzlichen IMU-Sensordaten lassen sich dann geringfügige GNSS-Signalstörungen annähernd kompensieren (Toth & Jutzi, 2015).

#### 1.4.3 Indirekte Georeferenzierung

Vor dem Aufkommen moderner Navigationssensorik (Integrierte Navigation) war die **indirekte Georeferenzierung** die einzige Methode der Georeferenzierung. Hier werden die Elemente der äußeren Orientierung mithilfe von Passpunkten in den Scans und Bildern bestimmt (Glira, 2012).

Durch diese Methode werden die Messdaten ins Koordinatensystem der Passpunkte transformiert. Somit übernehmen die Messdaten die Genauigkeit der Passpunkte. Die Passpunkte werden zusätzlich verwendet, um die Qualitätskontrolle der direkten Georeferenzierung zu ermöglichen. Eine Qualitätskontrolle der direkten Georeferenzierung erfolgt durch Messung von Passpunkten in den direkt georeferenzierten Daten. Hierbei übernehmen die Passpunkte eine entscheidende Rolle, da sie die Qualitätskontrolle in dieser Art und Weise erst ermöglichen. Die Bestimmung der Korrektur systematischer Fehler ist ebenfalls ein wichtiger Anwendungsfall von Passpunkten. Dementsprechend tragen Passpunkte zur Verbesserung der Zuverlässigkeit und Genauigkeit einer direkten Georeferenzierung deutlich bei (Glira, 2012).

Wenn mehr Passpunkte verwendet werden als für das Projekt erforderlich sind, können einige der Punkte als Kontrollpunkte zur besseren Beurteilung der Genauigkeit angewandt werden. Kontrollpunkte (eng. Checkpoints – CP) werden zur Bewertung der absoluten Genauigkeit des Modells angewandt. Die Kontrollpunkte werden verwendet, um die Lage eines

georeferenzierten Objekts mit seiner wahren Lage zu vergleichen. Auf diese Weise können absolute Lagefehler bestimmt werden. Qualitätsberichte weisen die Differenzen zwischen ursprünglichen und berechneten Positionen (Restklaffen, oder „Residuen“ eng. Residual vector) der CPs auf und geben Auskunft über die absolute Genauigkeit der Modelle.

#### 1.4.4 Einflussfaktoren auf die Genauigkeit der georeferenzierten Daten

Dieses Unterkapitel liefert einen Überblick der wichtigsten Fehlereinflüsse auf die Genauigkeit der georeferenzierten Daten. Diese lassen sich grob wie folgt gliedern:

- 1) Fehler bei der Bestimmung der Trajektorie,
- 2) Messungenauigkeiten der einzelnen Sensoren,
- 3) (Rest-)fehler der Sensorkalibrierung,
- 4) (Rest-)fehler der Plattformkalibrierung,
- 5) Synchronisationsfehler zwischen den Sensoren,
- 6) Messfehler während der tachymetrischen Erfassung von Passpunkten,
- 7) Messfehler während der Messung von Passpunkten in der Punktwolke zum Zweck der Georeferenzierung

##### 1.4.4.1 Navigationssensorik

Die Qualität der berechneten Trajektorie (siehe Punkt 1 oben) hängt wesentlich von der Qualität der verwendeten Navigationssensorik, den bei der Messung zu erwartenden Fehlereinflüssen und der eingesetzten Methode zur Trajektorienbestimmung ab. Zunächst sollen die Fehlereinflüsse auf die primären Messgrößen (GNSS, Inertialmessungen und Odometrie) dargestellt werden. Wie im Kapitel 1.2.1.2 beschrieben, kann durch Fusionierung der Messungen unterschiedlicher Navigationssensoren die Genauigkeit und Robustheit der Trajektorienbestimmung gesteigert werden, sodass die Fehlereinflüsse eines einzelnen Sensors u.a. nicht mehr im vollen Umfang zu tragen kommen.

#### **GNSS - Messungen**

Viele Faktoren beeinflussen die Genauigkeit der GNSS-Position. Tabelle 2 zeigt die wichtigsten Fehlereinflüsse (Längauer, 2010):

<b>Satellitenfehler</b>	<i>Uhrenfehler</i>
	<i>Ephemeridenfehler</i>
<b>Ausbreitungsfehler</b>	<i>Ionosphärenfehler</i>
	<i>Troposphärenfehler</i>
<b>Empfängerfehler</b>	<i>Multipath</i>
	<i>Variation des Antennenphasenzentrums</i>
	<i>Uhrenfehler</i>

**Tabelle 2 - Fehlereinflüsse auf GNSS-Messungen nach (Längauer, 2010)**

(Hofmann, 2017) beschreibt, dass alle diese Faktoren aus einem „Gesamtfehler resultieren, der von der geometrischen Konstellation zwischen Satelliten und Empfänger abhängig ist.“

Die Genauigkeit bei GNSS-Empfängern mit Einzelpunktbestimmung (Single Point Positioning) liegt im Bereich von einigen Dezimetern. Aus diesem Grund ist diese Genauigkeit für die Auswertung von MM – Daten nicht ausreichend, da diese einen direkten Einfluss auf die Genauigkeit der erzeugten Punktwolke hat (Hofmann, 2017).

Um eine zentimetergenaue Position zu erreichen, ist es notwendig, das GNSS-Basissystem zu erweitern, damit die Messungen um alle diese oben erwähnten systematischen Fehler korrigiert werden können. Dies ist durch Postprocessing (Nachbearbeitung) von GNSS-Daten unter Verwendung von Referenzstationen im „Differential GNSS“-Ansatz (DGNSS) möglich.

Bei MM – Anwendungen werden rohe GNSS-Satellitenmessungen aufgezeichnet und erst im Nachhinein, d.h. nach beendeter Aufnahme, verarbeitet. Demzufolge kommen korrigierte GNSS-Positionen bei MM – Anwendungen in Echtzeit nicht zum Einsatz. Verglichen zur RTK-GNSS-Positionierung bedarf es beim Postprocessing keiner Echtzeitübertragung von differentiellen Korrekturmeldungen, was zu einer deutlich vereinfachten Hardwarekonfiguration führt (NovAtel Inc., 2015).

Das Postprocessing hat mehrere entscheidende Vorteile (Hutton, et al., 2016):

- Eine Höhere Genauigkeit kann durch Vorwärts- und Rückwärtszeitverarbeitung erreicht werden
- Anomalien in Daten können erkannt und korrigiert werden
- Es können fortschrittlichere, räumlich basierte und rechenintensivere Algorithmen eingesetzt werden
- Komplexe und kostenintensive Echtzeit-Datenverbindungen sind nicht erforderlich
- Regionale oder globale GNSS-Erweiterungsdienste sind über das Internet zugänglich

Es gibt verschiedene GNSS-Korrekturmethode, deren Anwendung sich anhand der Länge der Basislinie unterscheidet.

Da die Mobile Mapping Projekte nur in eher kleinräumigen Gebieten stattfinden (<100km), eignet sich für hochgenaue MM – Anwendungen nur der DGNSS Ansatz.

Dabei dienen genau eingemessene Bodenstationen als Basisstation (Referenzstation) und können die Positionsbestimmung des Rovers (Empfänger) signifikant verbessern.

Das Grundprinzip von DGNSS ist, dass zwei benachbarte Empfänger (Master und Rover) gleichzeitig GNSS Signale aufzeichnen. Durch die räumliche Nähe der beiden Empfänger sind die Einflüsse durch die Satellitenfehler und Signalausbreitungsfehler typischerweise stark korreliert. Dadurch können Fehlerquellen wie der Satellitenuhrfehler vollständig eliminiert werden. Die anderen Fehler, die in Tabelle 2 gezeigt sind, können auch reduziert werden. Um diese Fehlereinflüsse zu begrenzen sollte die Basislinie möglichst kurzgehalten werden. Die Entfernung zwischen den beiden Empfängern sollte maximal 10 km betragen. Liegen die Referenzstationen über 10 km vom Projektgebiet entfernt, so können sogenannte virtuellen Referenzstationen berechnet werden. Die VRS-Daten werden von den umgebenden Referenzstationen in die erforderlichen Koordinaten interpoliert, um die Korrekturdaten direkt im entsprechenden Projektbereich zu verwenden. Referenzstationen für Korrekturdaten

können sowohl individuell betrieben als auch in Form von einer Dienstleistung genutzt werden (Hofmann, 2017).

In Österreich stellt u.a. das Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen (BEV) mit dem Dienst APOS (Austrian Positioning Service) die Messdaten der Referenzstationen zur Verfügung. Wenn diese im Postprocessing verwendet werden kann eine Genauigkeit in der Lage von ca.  $\pm 1 - 2$  cm und eine Genauigkeit in der Höhe von ca.  $\pm 2 - 3$  cm erreicht werden.

#### 1.4.4.2 INS

Die Genauigkeit von einem INS hängt von vielen, sehr unterschiedlichen Faktoren ab. Wesentlich ist die Zunahme des Fehlers mit der Zeit (Drift) im Gegensatz zu GNSS-Messungen. Einen groben Überblick der Genauigkeitsklassen von diversen Herstellern geben (Schaer & Vallet, 2016) an.

<b>IMU-Grad</b>	<b>MEMS low cost</b>	<b>MEMS tactical</b>	<b>FOG tactical</b>	<b>FOG navigation</b>
<b>Winkeldrift</b>	<i>5-10°/h</i>	<i>1-3°/h</i>	<i>0.1-1°/h</i>	<i>&lt;0.01°/h</i>
<b>Positionsdrift nach 60 sek</b>	<i>1 - 10 m</i>	<i>20 - 80 cm</i>	<i>15 - 30 cm</i>	<i>10 – 15 cm</i>
<b>Positionsgenauigkeit GPS/INS</b>	<i>+/- 10 cm</i>	<i>+/- 5 – 10 cm</i>	<i>+/- 5 cm</i>	<i>+/- 5 cm</i>
<b>Winkelgenauigkeit GPS/INS</b>	<i>0.1 – 0.2°</i>	<i>0.05°</i>	<i>&lt; 0.02°</i>	<i>&lt; 0.005°</i>
<b>Typische Verwendung</b>	<i>Leisure (Freizeit)</i>	<i>kurzer Bereich ALS</i>	<i>ALS, MLS</i>	<i>MLS</i>
<b>Preis</b>	<i>50 – 1000 €</i>	<i>5000 – 10 000€</i>	<i>30 000 €</i>	<i>100 000 €</i>

**Tabelle 3** - Verschiedene Arten von IMU, ihre Genauigkeit und Verwendung nach (Schaer & Vallet, 2016)

Im Allgemeinen unterteilen sich die Fehler in zufällige und systematische Fehler. Die inertialen Sensoren haben folgende Fehlereinflüsse:

- Rauschen
- Hysterese
- Bias
- Nichtlinearität
- Skalierungsfaktor
- Quantisierungsfehler

Eine vollständige Beschreibung der oben erwähnten Fehler ist in (Moder, 2011) angegeben.

„Bei den Sensoren ist jedoch auch die Stabilität der systematischen Fehler über die Laufzeit sehr wichtig, d. h. wie sehr sich der Bias und der Skalenfaktor während der Fahrt verändern. Ein weiteres Kriterium sind die implementierenden Algorithmen. Ob der implementierte Algorithmus eine gute Qualität erzielt, hängt neben der Wahl des Algorithmus auch von den auftretenden Fahrzeugdynamiken ab. Je größer die Dynamiken sind, d. h. je größer die Beschleunigungen bzw. Winkelgeschwindigkeiten sind, desto besser müssen die implementierten Algorithmen sein, um dieselbe Genauigkeit zu erzielen. Zusätzlich benötigt man bei größeren Dynamiken höhere Aufzeichnungsraten, um die Dynamiken erfassen zu können.“ (Lesjak, 2010)

Andererseits ermöglichen hohe Querdynamiken dem System, die typischerweise korrelierten Systemfehler (Lagefehler, Geschwindigkeitsfehler und Sensoroffsets) zu trennen und somit besser zu schätzen. Das wird bei der sg. „*dynamischen Initialisierung*“ des INS ausgenutzt (am Beginn und Ende jeder Mission).

Zusätzlich ist der Einfluss der Attitude-Information auf die Georeferenzierung von Bildern bzw. Laser-Scans von Relevanz. Ein Beispiel hierfür wäre, wenn der Heading-Winkel fehlerbehaftet ist, sodass das INS „glaubt“, dass das Auto driftet, obwohl es geradlinig fährt. Dies hat zur Folge, dass die relative (innere) Geometrie der Punktwolke verfälscht wird.

#### 1.4.4.3 Odometrie

Wenn im Allgemeinen die Fehler der Odometrie betrachtet werden, führen Fehler in der Modellierung (falsche Schätzungen der Radgröße oder der Fahrzeuggröße), Unsicherheiten bei den Steuereingaben, Realitäten der Motorsteuerung (Fehler zwischen befohlener Raddrehung und wahrer Drehung), Fehler in der physikalischen Modellierung des Fahrzeugs (Radverdichtung, Bodenverdichtung, Radschlupf, Reifenbreite ungleich Null) usw. zu einem Fehler zwischen der Koppelnavigationsschätzung der Fahrzeugbewegung und ihrer wahren Bewegung (Dudek & Jenkin, 2008).

Bei den MMS-Anwendungen wird das Odometer (Radsensor) immer auf einem nicht angetriebenen Rad montiert. Somit gibt es in der Praxis keinen Schlupf. Dadurch erhält man auch eine sehr verlässliche Information ob das Fahrzeug stillsteht. Das wird für ein sog. „Zero-Velocity-Update“ (ZUPT) genutzt, um die durch die Sensor-Drift der IMU entstandenen Fehler bestmöglich zu schätzen, zu begrenzen bzw. zu eliminieren.

Die Information, ob das Fahrzeug stillsteht oder sich bewegt gewinnt dort an Bedeutung, wo die GNSS Signale nicht verfügbar sind (im Tunnel, im Stadtgebiet wo viele große Gebäude stehen, in Alleen, auf Waldwegen, usw.). In solchen Fällen leistet dieser Sensor einen wichtigen Beitrag zur Positionsbestimmung in der Längskomponente.

#### 1.4.4.4 Sensoren zur Umgebungserfassung

Da die Messkameras passive Sensoren sind und keine beweglichen Teile haben ist die photogrammetrische Messgenauigkeit im Wesentlichen durch die Auflösung des Bildsensors und des Objektivs gegeben bzw. durch die Qualität der Sensorkalibrierung und der Plattformkalibrierung. Mehr dazu in (Luhmann, 2018).

### **Laserscanner**

Die Genauigkeit der 3D-Position eines LIDAR-Punktes hängt von der Genauigkeit der *Entfernungsmessung* und der *Winkelmessung* des Laserscanners ab.

Folgende Faktoren beeinflussen die Genauigkeit der Entfernungsmessung des Laserscanners:

- *Trägerwellen*
- *Strahldurchmesser*
- *Spotgröße, Strahldivergenz*
- *Auftreffwinkel*
- *Reflexion*

Die Winkelmessgenauigkeit ist in den Spezifikationen mit angegeben. Weitere Fehlerquellen sind:

- *Refraktion*
- *Additionskonstante*
- *Maßstabsfehler aufgrund der tatsächlichen meteorologischen Verhältnisse*

Die Qualität der Winkelmessung eines Laserscanner hat sehr starken Einfluss auf die Genauigkeit von Punktwolke und bestimmt wesentlich die Leistungsfähigkeit des Laserscanners. Diese Informationen sind seitens der Hersteller nicht verfügbar. Ein Beispiel für die Fehlerabschätzung kann in der ersten geodätischen Hauptaufgabe dargestellt werden:

Vom Standpunkt aus wird eine Strecke und der Richtungswinkel gemessen, um die Koordinaten des neuen Punktes zu berechnen. Bei einer Länge von 50 m beeinflusst ein Winkelfehler von 0,1° die Punktlage um 8,7 cm.

$$Y_{Neu} = Y_{Stand} + s \cdot \sin \alpha; X_{Neu} = X_{Stand} + s \cdot \cos \alpha$$

$$s = 50 \text{ m}; \sigma_{\alpha} = 0,1^{\circ} = 0,1111 \text{ gon} = 0,001745 \text{ rad}$$

$$\frac{\partial f_Y}{\partial Y_{Stand}} = \frac{\partial f_X}{\partial X_{Stand}} = 1$$

$$\frac{\partial f_Y}{\partial s} = \sin \alpha$$

$$\frac{\partial f_X}{\partial s} = \cos \alpha$$

$$\frac{\partial f_Y}{\partial \alpha} = \frac{s \cdot \cos \alpha}{\rho}$$

$$\frac{\partial f_X}{\partial \alpha} = -\frac{s \cdot \sin \alpha}{\rho}$$

$$\sigma_{Y_{Neu}}^2 = \left(\frac{\partial f_Y}{\partial Y_{Stand}}\right)^2 \cdot \sigma_{Y_{Stand}}^2 + \left(\frac{\partial f_Y}{\partial s}\right)^2 \cdot \sigma_s^2 + \left(\frac{\partial f_Y}{\partial \alpha}\right)^2 \cdot \sigma_{\alpha}^2$$

$$\sigma_{X_{Neu}}^2 = \left(\frac{\partial f_X}{\partial X_{Stand}}\right)^2 \cdot \sigma_{X_{Stand}}^2 + \left(\frac{\partial f_X}{\partial s}\right)^2 \cdot \sigma_s^2 + \left(\frac{\partial f_X}{\partial \alpha}\right)^2 \cdot \sigma_{\alpha}^2$$

$$\text{Falls } \sigma_s^2 = \sigma_{Y_{Stand}}^2 = \sigma_{X_{Stand}}^2 = \alpha = 0$$

$$\sigma_{Y_{Neu}}^2 = \left( \frac{s \cdot \cos \alpha}{\rho} \right)^2 \cdot \sigma_\alpha^2$$

$$\sigma_{X_{Neu}}^2 = \left( -\frac{s \cdot \sin \alpha}{\rho} \right)^2 \cdot \sigma_\alpha^2$$

$$\rho = \frac{200 \text{ gon}}{\pi}$$

$$\sigma_{Y_{Neu}}^2 = \frac{2500 \text{ m}^2}{4053,85 \text{ gon}^2} \cdot 0,012 \text{ gon}^2 = 0,0076 \text{ m}^2 \Rightarrow \sigma_{Y_{Neu}} = 0,087 \text{ m} = 8,7 \text{ cm}$$

$$\sigma_{X_{Neu}}^2 = 0$$

Dieses Beispiel zeigt die Größenordnung des durch den Winkelfehler verursachten Querfehlers. Mehr über die Fehlereinflüsse bei Laserscannern kann man in (Kuhlmann & Holst, 2017), (Gordon, 2008), (Reshetyuk, 2009), (Gräfe, 2017) und (Kern, 2003) finden.

#### 1.4.4.5 Kalibrierung und Synchronisation

Nicht nur die Fehler bei Navigationssensoren und Sensoren zur Umgebungserfassung beeinflussen die Genauigkeit der georeferenzierten Daten, sondern auch die Fehler in Kalibrierung und Synchronisation können die Relativgenauigkeit der Daten verringern oder sie sogar mehr oder weniger stark deformieren bzw. die Konsistenz z.B. von Bild- und LIDAR-daten verschlechtern.

Wie gut die Sensoren kalibriert sein müssen zeigt ein Beispiel, dass eine kleine Verdrehung von Laserscanner/Kamera um 1° dazu führt, dass die Positionsabweichung fast 2% der Objektentfernung beträgt. Fassaden, die ca. 10 m vom Messfahrzeug entfernt sind, werden mit einer Systemabweichung nahe 20 cm verschoben sein (Klingbeil & Kuhlmann, 2018).

Fehler sowohl in der Sensorkalibrierung als auch in der Plattformkalibrierung gehören zu den systematischen Fehlern. Fehler in der Sensorkalibrierung verringern die Relativgenauigkeit. Fehler in der Plattformkalibrierung verringern die Konsistenz zwischen den Messdaten unterschiedlicher Sensoren (ähnlich wie Synchronisationsfehler). Ein einfaches Beispiel ist wenn zwei Laserscanner verwendet werden und bei einem (oder beiden) die Hebelarme/Boresichtwinkel nicht korrekt kalibriert sind. Folglich ergeben sich zwei (Teil-) Punktwolken die sich nicht konsistent überlagern bzw. ergänzen.

Die Synchronisationsfehler sind geschwindigkeitsabhängige und systematische Fehler, die sich zwischen georeferenzierten Daten und Laserscanner/Kamera auswirken. Kleinste Verzögerungen führen bereits zu großen Abweichungen in der Messung. So resultiert eine Verzögerung von 1 ms bei Schrittgeschwindigkeit in einer Abweichung von 1 mm. Erhöht man die Geschwindigkeit auf 100 km/h beträgt die Abweichung bereits knapp 3 cm (Klingbeil & Kuhlmann, 2018).

## 2 Genauigkeitsuntersuchung von Mobile Mapping Systemen

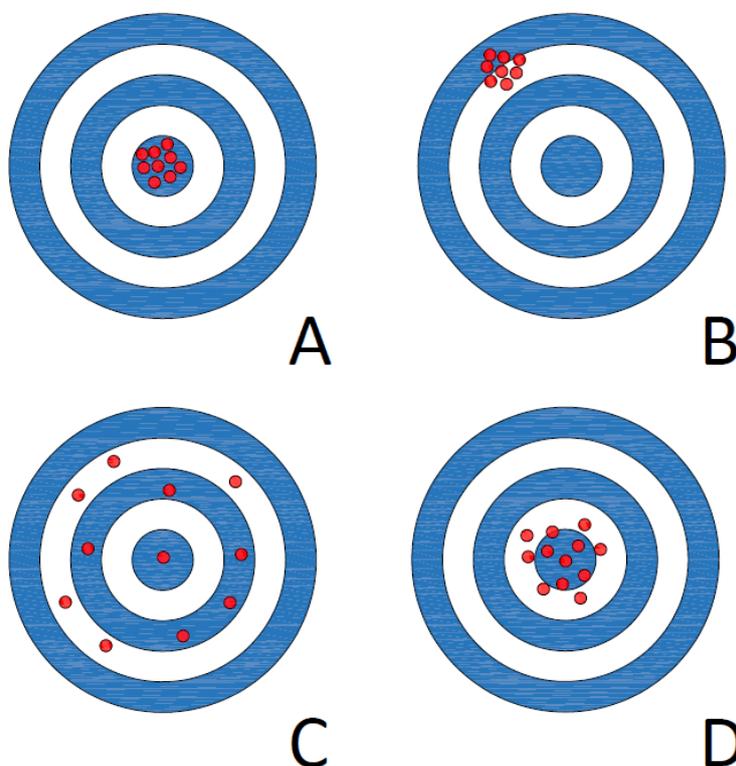
### 2.1 Erläuterung des Begriffs „Genauigkeit“

Die Genauigkeit kann als Maß der Richtigkeit einer Messung definiert werden. Mit anderen Worten werden Messwerte eines Messgeräts mit den tatsächlichen Werten verglichen. Je näher die Messwerte an den tatsächlichen Werten liegen, desto genauer ist das Messgerät. Oft wird der Begriff **Genauigkeit** mit den Begriffen **Präzision** und **Richtigkeit** verwechselt. Die Begriffe sind zwar verbunden, bedeuten aber nicht das gleiche.

Kommt es auf die Übereinstimmung von unabhängigen Messergebnissen bzw. wie eng Messwerte beieinander liegen an, so wird die **Präzision** als Maß herangezogen. Voraussetzung dafür sind gleichbleibende Bedingungen. Wenn der Mittelwert vom wahren Wert abweicht, so spricht man von **Richtigkeit**. Das gehört zu den systematischen Fehlern. Das bedeutet, eine hochpräzise Messung kann eine geringe Genauigkeit haben!

In der Geodäsie wird das i.A. als **zufälliger** bzw. **systematischer** Fehler bezeichnet. **Zufälliger Fehler** ist Fehler, der sich beim Wiederholen der Messung ändert. Die Präzision ist stark von zufälligem Fehler beeinflusst. **Systematische Fehler** ist ein Fehler, der sich beim Wiederholen der Messung nicht ändert und die beeinflussen die Richtigkeit einer Messung (Messungengenauigkeiten, die durch ein Messgerät oder eine Messtechnik verursacht werden).

Ein sehr schönes Beispiel, um die Unterschiede zwischen diesen Begriffen zu verstehen, ist die Zielscheibe, auf die mit unterschiedlichen Waffen geschossen wird.



**Abbildung 3 - Zielscheibe:** A - Genau und präzise; B - Präzise, aber nicht genau; C - Weder genau noch präzise; D - Genau, aber nicht präzise (Minitab, 2020)

Für *MMS* bedeuten diese allgemeinen Begriffserklärungen konkret, dass die Genauigkeit als Fehler im Vergleich zu GCPs und die Präzision als Wiederholbarkeit zwischen Durchgängen (Messfahrten) betrachtet werden kann.

Geht es um Genauigkeit, so muss zwischen **relativ** und **absolut** unterschieden werden.

RELATIV	ABSOLUT
Bezieht sich auf ein lokales System, wie die Genauigkeit eines Abstands zwischen zwei Punkten eines Gebäudes oder in einem Tunnel.	Bezieht sich auf ein eindeutiges, weltweit definiertes Bezugssystem, wie z.B. durch ein GNSS Referenzsystem definiert
- Typische Daten, die von der relativen Genauigkeit betroffen sind z.B.: <b>Abstand zwischen zwei Punkten eines Standortes von einem terrestrischen Laserscanner.</b>	- Typische Daten, die von absoluter Genauigkeit betroffen sind z.B.: <b>Die Koordinaten eines von einem GNSS-Empfänger aufgenommenen Punktes.</b>

**Tabelle 4 - Unterschiede zwischen relativer und absoluter Genauigkeit**

Diese Masterarbeit bezieht sich auf den Vergleich der *absoluten* Genauigkeit zweier MMS.

Durch die Verwendung von Passpunkten (GCPs) kann die absolute Genauigkeit durch die Methode der indirekten Georeferenzierung (siehe Kapitel 1.4) erhöht werden. Die Genauigkeit hängt von den genauen Werten der GCPs und ihrer Anzahl sowie ihrer Verteilung ab.

## 2.2 Verfahren zur Genauigkeitsabschätzung bei MMS

In der Literatur und Praxis kann man verschiedene Verfahren zur Genauigkeitsabschätzung finden. Ein Überblick über unterschiedliche Verfahren stellt (Hofmann, 2017) in Ihrer Arbeit vor:

Erste Verfahren zur Genauigkeitsabschätzung von MMS können wir bei Arbeiten von (Gräfe et.al, 2001) finden. Dort wurde die Genauigkeit von Trajektorien des Mobile Mapping Systems MoSES untersucht. Die Qualität der Trajektorie, die mit einer kommerziellen Software berechnet wurde, wurde hier untersucht. Es wurden GNSS-Bedingungen für Mitteleuropa untersucht, dabei konnte nur für 55% der gesamten gefahrenen Zeit ein GPS-Signal empfangen werden. Um eine Genauigkeitsuntersuchung durchzuführen, wurden Kontrollpunkte entlang der Strecke markiert und mit dem Stereokamerasystem erfasst. Die Ungenauigkeit der durch die photogrammetrische Messung entstandenen Koordinaten wurde dann im Stand oder bei langsamer Fahrt mit GNSS getestet. Hier liegen die Unterschiede laut Gräfe et. al, 2001 unter  $\pm 10$  cm für die Nord- und Ost-Werte und unter  $\pm 5$ cm für die Höhe. Auf einer Strecke von 5km wurden 46 CP gekennzeichnet, hier treten Ungenauigkeiten bei den Koordinaten bei  $\pm 0,3$  m für Nord- und Ost-Werte und  $\pm 0,5$ m in der Höhe auf. Die Ergebnisse zeigen, dass die berechneten RMS-Werte für die Trajektorie für diese Strecke mit  $\pm 0,2$ m aus kommerzieller Software zu positiv ausfallen.

(Haala et.al, 2008) machten eine Genauigkeitsuntersuchung mit dem MMS Street Mapper. Die Punktwolkenanalyse basiert auf einem 3D-Stadtmodell. Sie sind zu dem Schluss gekommen, dass unter besseren GNSS-Bedingungen für die dichte 3D-Punktwolke eine Genauigkeit von  $\pm 3$  cm erlangt werden kann, jedoch wird bei schlechteren Bedingungen die Genauigkeit auf etwa  $\pm 1$  m reduziert. Barber et.al., 2008 machte auch eine Studie zur Validierung des operationellen Street Mapper –Systems (Kremer & Hunter, 2007). Diese Studie basiert auf der Gesamtpunktwolke. Untersucht wurden die Genauigkeit und Präzision der Position für die Lage und die Höhe, dabei wurde die Genauigkeit der Daten mit der Hilfe von Checkpoints (CP) untersucht. Es wurden keine tachymetrischen Messungen durchgeführt, da diese mit einem höheren Aufwand verbunden sind. Um ein geodätisches Netz messen zu können wurden in den Testgebieten Punkte verteilt und mit Hilfe von RTK-GNSS vermessen. Höhenabweichungen konnten anhand von Punkten der Straßenoberfläche und Lageabweichungen anhand von den Eckpunkten der Fahrbahnmarkierungen angegeben werden. Die Präzision der Punktwolke konnte bestimmt werden indem die Strecke mehrmals abgefahren wurde. Von der Straßenoberfläche wurden Polygone unterschiedlicher Epochen ausgeschnitten und dabei der Abstand ausgerechnet. Bei diesem Verfahren kann nur die Höhe genau erfasst werden. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen zeigen einen RMS Fehler von  $\pm 0,03$  m auf, dabei liegt die Lagegenauigkeit bei diesem Verfahren mit dem Vergleich der Kontrollpunkte an der Fahrbahnmarkierung bei  $\pm 0,1$  m oder  $\pm 0,2$  m mit einem Konfidenzintervall von 95%. Allerdings kann die geringere Genauigkeit auch durch die notwendige Interaktion bei der Punktauswahl entstehen.

(Toschi, et al., 2015) haben die Genauigkeit des kommerziellen MMS RIEGL VMX-450 mit statistischen Methoden mit Hilfe von zwei verschiedenen Referenzdatensätzen untersucht. Ein photogrammetrisch erfasster Teil an einem Gebäude wurde als Referenz genommen und des Weiteren mit Hilfe von einem terrestrischen Laserscanning sehr dichte Punktwolken am ausgewählten Gebäude aufgenommen. Der vom Hersteller angegebene Wert der Präzision wurde von den Autoren durch einen Vergleich der beiden Punktwolken einer Epoche bestätigt. Ein nicht so exaktes Ergebnis lieferte die Untersuchung bei einem Vergleich von zwei Punktwolken zweier verschiedener Epochen. Der Grund für die höheren Werte könnten die Fehler in der Georeferenzierung und Veränderung der Oberfläche sein. Eines der besten Ergebnisse mit dem höchsten geometrischen Potential weist das System von (Toschi, et al., 2015) auf. Die Referenzdaten betragen bei einer mittleren Streuung auf offenen Plätzen unter 5,9 mm (Vergleich mit Photogrammetrie) und 3,6mm (Vergleich mit terrestrischem Laserscanning) und damit lag es in dem vom Hersteller angegebenen Bereich von 8mm ( $1\sigma$ ). Eine höhere Fehlerquote wird in engen Straßen mit hohen Gebäuden aufgezeigt, da hier das Auftreten von Abschattung der Satellitensignale zunimmt. Die Autoren können jedoch nicht alle entstandenen Ergebnisse zur Gänze erläutern. Auch finden sich häufig diagonale Streifen als Fehlermuster in den erhobenen Daten. Abschließend weist (Toschi, et al., 2015) keine schlussgebende Erklärung in seine Arbeit auf. Es wird vermutet, dass die Ausrichtung der Scanner nicht optimal war oder auch Kalibrierfehler der Grund für diese Fehlermuster sind.

Die Genauigkeitsanalyse auf Basis der TLS-Referenzpunktwolke ist in letzter Zeit sehr beliebt geworden. In diesem Fall bieten einige Softwarepakete Algorithmen, mit denen zwei Punktwolken direkt verglichen werden können. Die Problematik liegt jedoch in der richtigen Interpretation der Ergebnisse (Heinz et al, 2017).

Die Bewertung eines MMS kann üblicherweise auch mit Hilfe künstlicher oder natürlicher Kontrollpunkte erfolgen. Die Koordinaten dieser Kontrollpunkte werden aus der Punktwolke

extrahiert und mit Referenzwerten verglichen, die mit klassischen Messmethoden wie Tachymetrie, TLS, Nivellement oder GNSS aufgenommen werden. (Heinz et al., 2017)

(Heinz et.al, 2020) haben das MMS mit oben erwähnter Methode auf Basis von Kontrollpunkten evaluiert. Die Evaluierung erfolgte mit fünf Testfahrten, indem insgesamt 16 verschiedene Kontrollpunkte 148 Mal gescannt wurden. Danach wurden die Koordinatenmittelpunkte der Zielmarken geschätzt und mit den gegebenen Sollkoordinaten verglichen.

Im Rahmen dieser Masterarbeit wurden zwei MMS mittels der Methode von (Heinz et al., 2020) über Kontrollpunkte bewertet. Dazu wurden Mittelwert, Standardabweichung und ihre Konfidenzintervalle berechnet. Der **Mittelwert** ist der durchschnittliche Wert eines Datensatzes. Die **Standardabweichung** kann als durchschnittliche Entfernung aller gemessenen Werte von Mittelwert definiert sein. Das **Konfidenzintervall** ist ein Bereich von Werten, wo wahrscheinlich der Mittelwert oder Standardabweichung der Grundgesamtheit liegen. Der Student-t Test wird verwendet, um den Konfidenzintervall des Mittelwertes zu bestimmen. Der Chi-Quadrat Test wird verwendet, um den Konfidenzintervall der Standardabweichung zu bestimmen.

Der mathematische Hintergrund dieser Methode und Berechnungen kann in z.B. in (Frankić, 2010) nachgelesen werden.

### 2.3 Andere Kriterien zum Systemvergleich

Neben der Genauigkeit gibt es auch andere Kriterien zum Vergleich zweier Mobile Mapping Systeme. Diese Kriterien sind folgende:

Kriterium	Auflösung	Vollständigkeit	Erstellungsaufwand
Art	<i>Dichte</i>	<i>Straßen</i>	<i>Erfassung</i>
	<i>Homogenität</i>	<i>Gebäude</i>	<i>Auswertung</i>

**Tabelle 5** - Kriterien zum Vergleich zweier Systeme

#### Auflösung

Die Auflösung ist das Ergebnis der erzielten Punktdichte am Objekt. Sie definiert das kleinste Objekt, das noch „aufgelöst“ d.h. im Scan erkannt und rekonstruiert werden kann. Die erzielbare Scanauflösung hängt dabei von den Scannerparametern (Anzahl der Punkte pro Sekunde, Rotationsfrequenz) der Entfernung zum Objekt, der Ausrichtung des Objekts und von der Fahrgeschwindigkeit ab. Falls die Rotationsgeschwindigkeit des Scanners (angegeben in Hz) wählbar ist, kann man (bei konstanter Fahrgeschwindigkeit) den Abstand der Punkte innerhalb der Scanlinie bzw. den Abstand der Scanlinien untereinander beeinflussen.

## **Vollständigkeit**

Ein weiteres Kriterium zum Systemvergleich ist die Vollständigkeit. Egal wie man den Scanner auf der Plattform ausrichtet, es wird immer Flächen geben, die nicht erfasst werden können. Dadurch wird der Scan unvollständig. Durch die Verwendung von zwei Scannern kann man die Vollständigkeit erhöhen (100% sind nur theoretisch möglich, schon aufgrund von gegenseitigen Verdeckungen von Objekten). Unvollständigkeit ist auch bei den Bilddaten ein Thema: Wenn z.B. bei den seitlich blickenden Kameras zwischen aufeinanderfolgenden Aufnahmen keine Überlappung mehr existiert (wegen einem zu großem Trigger-Intervall) dann ist keine Vollständigkeit gegeben. Das wäre z.B. bei Inspektionsaufgaben problematisch.

Unvollständigkeit ist also eine systemimmanente Eigenschaft von 3D-Punktwolken und der Grad der Vollständigkeit wird damit neben der Auflösung zu einem entscheidenden Qualitätskriterium, das man als Auftraggeber prüfen sollte, falls man die 3D-Punktwolke unmittelbar nutzen will.

## **Erstellungsaufwand**

Der Erstellungsaufwand ist auch ein wichtiges Kriterium für den Vergleich zweier Systeme.

Im Fall von Mobile Mapping Systemen können wir den Erstellungsaufwand in zwei Gruppen gliedern:

- 1) Erstellungsaufwand während der Datenaufnahme,
- 2) Erstellungsaufwand der Datenprozessierung (Nachbearbeitung und Auswertung der aufgenommenen Daten)

Wenn MMS mit TLS verglichen wird, ist der zeitliche Aufwand für die Aufnahme beim MMS geringer als beim TLS. Zum Beispiel erfolgt bei der Autobahnvermessung die Aufnahme des Autobahnabschnittes mit MMS deutlich schneller als mit TLS. Hinzu kommt jedoch der zusätzliche Aufwand für die Messung der Pass- und Kontrollpunkte mittels Tachymetrie. Je größer die Genauigkeitsanforderung ist, desto größer ist dieser oben erwähnte zusätzliche Aufwand, weil ein dichteres Passpunktnetz gemessen werden muss.

Beim Vergleich zweier MMS macht es einen Unterschied, ob ein System mit einem oder zwei Laserscannern ausgestattet ist. Bei einem MMS mit Single-Scanner muss die zu vermessende Strecke mindestens zwei Mal befahren werden, beim Dual-Scanner genügt meistens eine Befahrung.

Der Nachteil beim MMS sind die zahlreichen manuellen Arbeitsschritte (Passpunktmessung, Qualitätskontrolle etc.) während der Datenprozessierung, die zeit-, kosten- und rechenintensiv sind. Dies gilt aufgrund der hohen Datenmenge, welche von der Projektgröße abhängig ist und sich im Bereich mehrerer Gigabyte bis Terabyte befinden kann. Als Richtwert gilt: Eine Stunde der Datenaufnahme führt zu einer Prozessierungszeit von ca. 3 Stunden. 1 GB aufgezeichnete Rohdaten ergeben nach der Verarbeitung 3-5 GB georeferenzierte Daten.

### 3 Experimente und Evaluierung zweier Mobile Mapping Systeme

#### 3.1 Projektbeschreibung inkl. Anforderungen

Der Testbereich dieser MA basiert auf einem Projekt zur Bestandsvermessung der Autobahn A9 zwischen dem Knoten Graz West und der Anschlussstelle Wildon. In diesem Projekt sollte eine Bestandsvermessung für eine spätere Fahrstreifenerweiterung durchgeführt werden. Die Vermessung umfasst einen Abschnitt zwischen km 189,500 und km 201,500 (Abbildung 4).

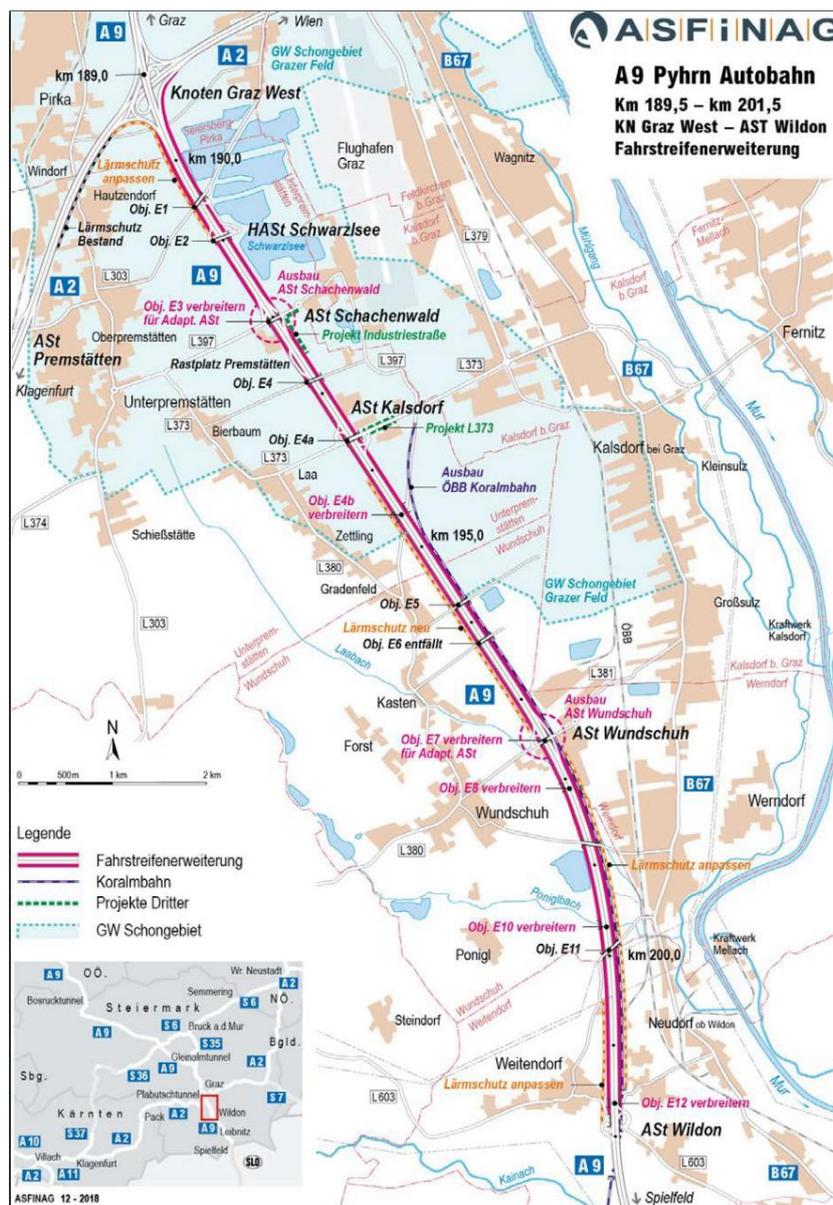


Abbildung 4 - Projektbereich A9 km 189,5– km 201,5 (Quelle: ASFINAG)

Die geforderte Genauigkeit dieses Projektes beträgt  $\pm 3$  cm in der Lage und  $\pm 1$  cm in der Höhe (Standardabweichung mit 1  $\sigma$ ).

## 3.2 Technische Systembeschreibung

### 3.2.1 Leica Pegasus:Two Ultimate Dualhead

Für den Bereich der Tunnel- und Autobahnvermessung hat das Unternehmen *Leica Geosystems* eine mobile Kartierungslösung entwickelt. Diese mobile Kartierungslösung ist eine technisch ausgereifte mobile Sensorplattform, die mit mehreren Sensoren ausgestattet ist. Die mobile Sensorplattform von Leica trägt den Namen *Leica PEGASUS: Two Ultimate Dualhead*, im Folgenden *Leica PEGASUS* genannt (Leica Geosystems, 2020).

Die Bezeichnung „Ultimate“ steht für die neueste Generation des PEGASUS Systems von Leica Geosystems. Neben PEGASUS bietet Leica auch die tragbare mobile Kartierungslösung für Indoor mapping, das sogenannte *Leica Pegasus: Backpack* an (wurde im Rahmen dieser Masterarbeit *nicht* verwendet).

Der Leica PEGASUS ist mit einem oder zwei Laserscannern in Kombination mit GNSS-Empfängern, IMU und einem Odometer ausgestattet. Zusätzlich können RGB-Bilddaten mit bis zu 8 fps erfasst werden. Es sind vier hochauflösende RGB-Kameras seitlich angeordnet. Weiters ist das MMS mit einer RGB-Panoramakamera ausgestattet. Dadurch entsteht ein 24MP 360x180° FOV Bild (Leica Geosystems, 2020).



**Abbildung 5** - *Leica Pegasus: Two Ultimate Dualhead* (Foto: © Bergmann, 2018)

Das MMS von JOANNEUM RESEARCH wurde vom Land Steiermark im Rahmen des Zukunftsfonds gefördert und ist die Dual – Scannervariante (Dualhead) aus zwei Z+F LIDAR Profiler 9012 mit jeweils +/- 1mm Messgenauigkeit, Rotation bis 200Hz, 1 Million Punkte pro Sekunde und Reichweite 130 m. Die beiden Profiler sind um ca. 45° gegenüber der Vertikalen geneigt und um 90° gegeneinander versetzt. Aufgrund dieser Ausrichtung können Scanabschattungen verringert werden und somit genügt eine Aufnahmefahrt pro Fahrtrichtung. Dabei können hochauflösende und vollständige 3D-Scans der Straßeninfrastruktur und der Fahrbahn erstellt werden. Die Sensorik zur präzisen Positionierung/Orientierung basiert auf einem Novatel SPAN<sup>1</sup> System, also einem kombinierten GNSS/IMU Navigationssystem:

- Novatel OEMv6 GNSS Empfänger unterstützt GPS, GLONASS, Galileo und Beidou Signale
- IMU-FSAS Inertialmesssystem (200Hz)

---

<sup>1</sup> SPAN ®: Synchronized Position Attitude Navigation

- Kistler Odometer (externer Radsensor) mit ca. 2mm Auflösung

Mit Hilfe der hochwertigen Navigationssensorik kann eine Georeferenzierung unter günstigen Bedingungen mit einer absoluten Genauigkeit von  $\pm 2$  cm durchgeführt werden. Die Rohdaten können 6-7 Stunden durchgehend aufgezeichnet werden, da sich ein 1 TB Onboard Speicher am Gerät befindet. Es werden bei einem Trigger – Intervall von 4-5 m in einer Stunde ca. 150GByte an Rohdaten gekennzeichnet (Ladstädter et al., 2019).

Eine schematische Darstellung des gesamten Systems, mit allen Sensoren ist auf folgenden zwei Abbildungen ersichtlich:



Abbildung 6 - Schematische Darstellung von Leica Pegasus: Two Ultimate Dualhead (Leica Geosystems, 2020)

### 3.2.2 Riegl VUX-SYS MLS

Das Unternehmen *RIEGL Laser Measurement Systems GmbH* mit Hauptsitz in Horn, Österreich, hat auch ein System für Tunnel-, Autobahn- und Umgebungsvermessung auf den Markt gebracht. Ihr Produkt trägt den Namen *RIEGL VUX-SYS*.

Der Riegl VUX-SYS MLS hat einen RIEGL LiDAR- Sensor (Serie VUX-1) und das System IMU/GNSS, sowie eine spezielle Steuereinheit. Aufgrund des integrierten VUX-1 und des dazugehörigen GPS/ GLONASS –Empfänger kann eine sehr gute Messgenauigkeit mit einem hohen Vermessungsniveau für die verschiedenen Anwendungen erzielt werden.

Mit dem VUX-1 können bis zu vier Digitalkameras gesteuert werden. Weiters hat dieses System den Vorteil rasch aufbaufähig zu sein, da sein niedriges Gewicht, die kleine kompakte Größe und die wenig benötigten Verbindungskabel dies schnell ermöglichen.

Dank des Software-Bundle RiPROCESS und dessen Software- Tools können die Scandaten georeferenziert, kalibriert und automatisch exportiert werden. Außerdem bietet RIEGL ein Systemkalibrierservice an.

Für *Riegl VUX-SYS* gibt es verschiedene Integrationsmöglichkeiten hinsichtlich der Kombination mit einer IMU:

- Riegl VUX-1 mit APX-20 UAV
- Riegl VUX-1 mit AP20

- Riegl VUX-1 mit AP60

Das System, welches im Rahmen dieser Masterarbeit genutzt wurde, besteht aus der zweiten Integrationsmöglichkeit *Riegl VUX-1 mit AP20*.

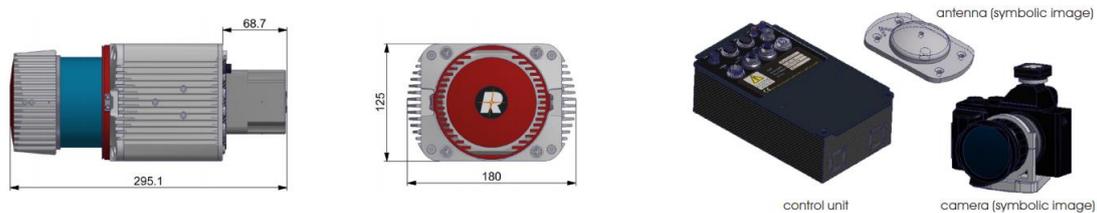
**Hauptdimensionen**

<i>VUX-1 mit IMU</i>	295 x 180 x 125 mm
<i>VUX-1 mit IMU und Kühlungsventilatorgerät</i>	295 x 209 x 128 mm
<i>Steuereinheit</i>	210 x 124 x 79 mm

**Gewicht**

<i>VUX-1 mit IMU</i>	ca. 4.2 kg
<i>Kühlungsventilatorgerät</i>	ca. 0.25 kg
<i>Steuergerät ca.</i>	ca. 0.9 kg
<i>Kamera(s)</i>	je nach ausgewähltem Kameratyp

**Tabelle 6 - Daten über Hauptdimensionen und Gewicht für Riegl VUX-1 mit AP20 (Riegl, 2019)**



**Abbildung 7 - Schematische Darstellung von Systemkomponenten (Riegl, 2019)**

Das *Riegl VUX-1 SYS* System kann auf verschiedenen Plattformen aufgebaut bzw. eingerichtet werden:

- Riegl VUX-1 SYS auf RiCOPTER (Unbemannt) – ULS
- Riegl VUX-1 SYS auf VP-1 (Airborne) – ALS
- Riegl VUX-1 SYS auf VMQ (Mobile) – MLS

In dieser Masterarbeit wurde die dritte Plattform verwendet. Folgende Abbildung zeigt den Aufbau des ganzen Systems auf einem Messfahrzeug.

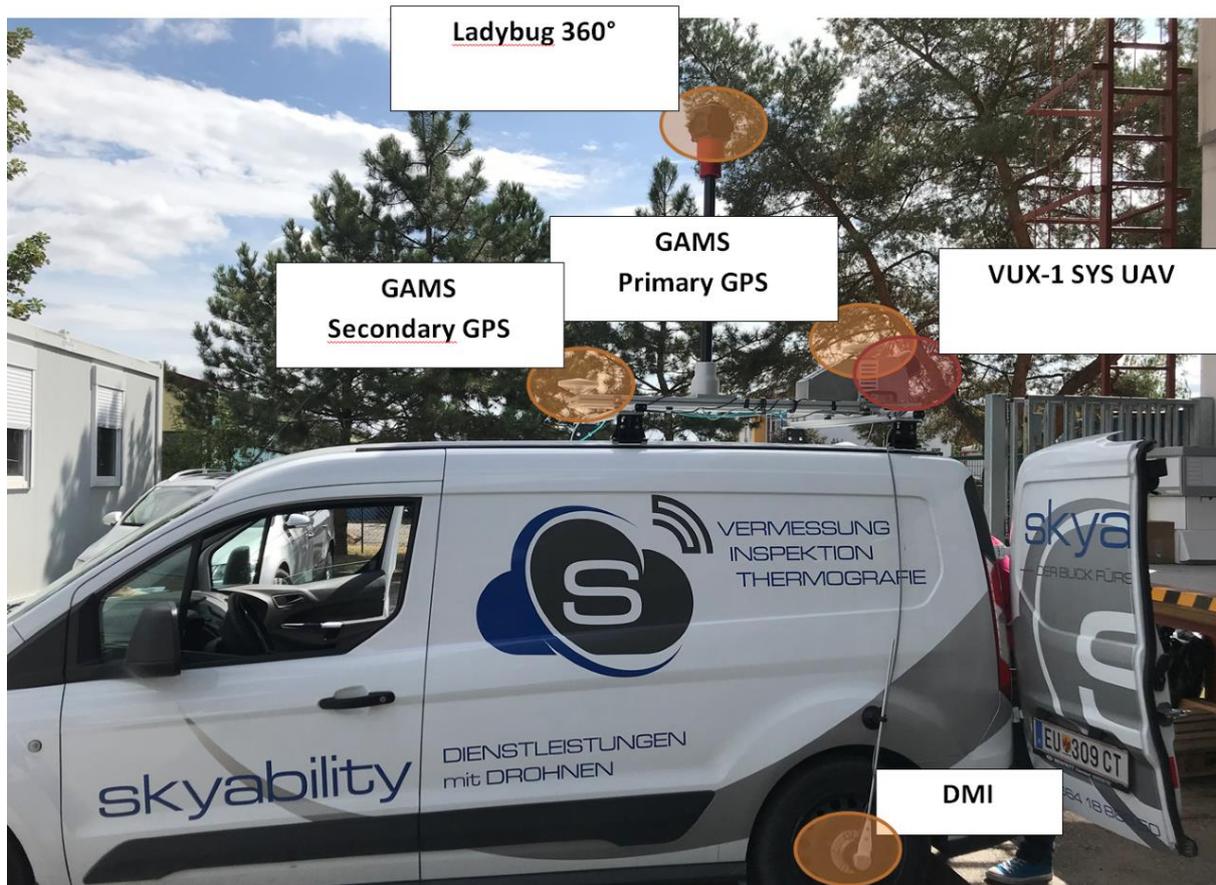


Abbildung 8 - Aufbau des Riegl Systems auf dem PKW (Foto: Skyability)

Folgende Komponenten bilden das aufgebaute System:

- VUX-1 SYS Steuereinheit
- GNSS-Antenne
- GPS Azimuth Measurement Subsystem (GAMS):
  - Primary & Secondary
- Distance Measurement Indicator (DMI) - Odometer
- Ladybug 360° Kamera
- Scanner VUX-1 UAV mit IMU Typ: AP20, IMU42
- Systembedienung über Laptop

### 3.2.3 Technische Daten - Leica Pegasus: Two Ultimate Dualhead vs. Riegl VUX-1 SYS

Parameter/System	Z+F LIDAR Profiler 9012	VUX-1UAV
Messmethode	Phasenmessung	Laufzeitmessung
Reichweite [m]	119	235 <sup>2</sup>
Blickfeld [°]	360	bis zu 330
Präzision [mm]	± 0.2 – 3.1 <sup>3</sup>	± 5
Messrate [Pkt/s]	bis zu 1 000 000	bis zu 500 000
Rotationsgeschwindigkeit	50 Hz bis 200 Hz	10-200 Hz
Wellenlänge	635 nm	nahes Infrarot
Strahldivergenz	< 0.5 mrad	0.5 mrad

**Tabelle 7** - Scannerdaten Leica (Z+F LIDAR Profiler, 2020) vs. Riegl (Riegl, 2019)

IMU & GNSS	SPAN IMU-FSAS	Applanix AP20
IMU Genauigkeit		
<i>Roll, Pitch</i>	0.004°	0.015°
<i>Heading</i>	0.013°	0.035°
IMU-Abtastrate	200 Hz	200 Hz
Positionsgenauigkeit (typ.)		
<i>Horizontal</i>	0.01 m	< 0.05 m
<i>Vertikal</i>	0.02 m	< 0.1 m
Geschwindigkeitsgenauigkeit		
<i>Horizontal</i>	0.02 m/s	0.01 m/s
<i>Vertikal</i>	0.01 m/s	0.01 m/s

**Tabelle 8** - IMU Daten Leica (SPAN, 2020) vs. Riegl (Riegl, 2019)

Allgemeine technische Daten	Leica	Riegl
Eingangsspannung der Stromversorgung	22 - 28 V DC (24 V DC typ.)	11 - 34 V DC
Leistungsaufnahme	< 6 mW	typ. 95 W
Luftfeuchtigkeit	nicht kondensierend	max. 80 % nicht kondensierend bei 31°C
Temperaturbereich	-10 °C - +45 °C (Betrieb) / -20 °C - +50 °C (Lagerung)	-10°C bis zu +40°C (Betrieb) / -20°C bis zu +50°C (Lagerung)

**Tabelle 9** - Allgemeine technische Daten, Leica vs. Riegl

<sup>2</sup> bei 1000 kHz und voller Leistung

<sup>3</sup> abhängig von Entfernung (10 - 50 m) und Reflektivität der Oberfläche

### 3.3 Datenaufnahme

Für das Untersuchungsgebiet (Testgebiet) dieser MA wurde der Abschnitt der Autobahn A09 bei Graz zwischen km 190,050 und km 193,650 ausgewählt.



**Abbildung 9** - Testgebiet (km 190.050 – km 193.650), Knoten Graz-West – Knoten Kalsdorf (Quelle: Google Earth, Screenshot)

#### 3.3.1 Festpunktfeld

Von 2013 – 2015 wurde zwischen km 189,5 und km 203,0 der A09, die Fahrbahn generalsaniert. Hierbei erfolgte eine Vermarkung von Polygonpunkten auf der gesamten Länge und darauffolgend ein Anschluss an das amtliche Festpunktfeld. Zur Vermarkung wurden Dübel verwendet, auf welche Steckzapfen inkl. Sollbruchstelle montiert wurden, welche als Aufnahmepunkt für Monitoringprismen dienen. Die Punkte wurden auf der Betonmittelwand, den Betonfundamenten von Verkehrsbeeinflussungsanlagen (VBA) oder Überkopfkonstruktionen (Gantries) und an Brückenpfeilern angebracht.

Im Sommer 2019 fand eine Kontrolle der bestehenden Vermarkung im Projektbereich von km 189,5 – 201,5, statt. Punkte, welche verloren gegangen waren, wurden neu stabilisiert und eingemessen.



**Abbildung 10** - Überprüfung der bestehenden Vermarkung

### 3.3.2 Befahrung mittels Leica MMS

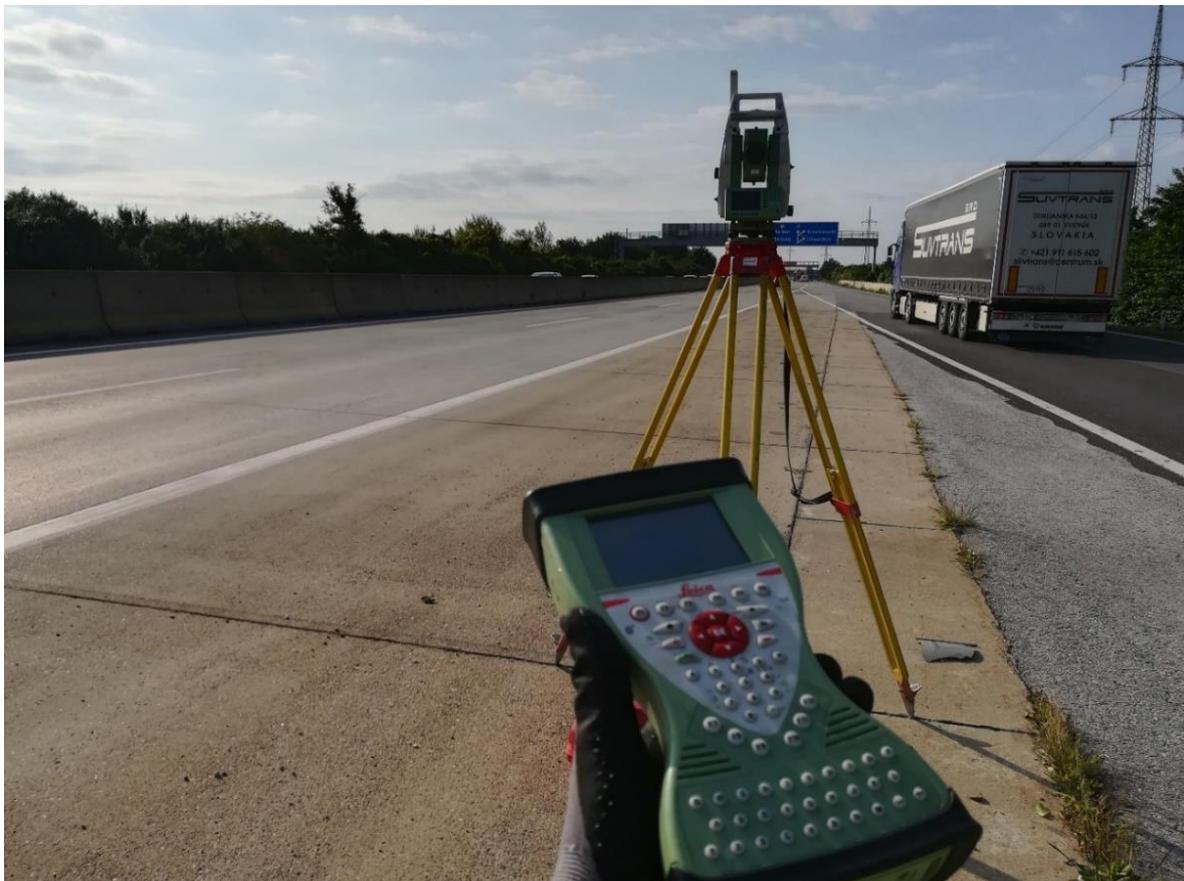
Im Sommer 2018 wurden mit dem PEGASUS System mehrere Autobahn- und Schnellstraßenabschnitte durch die JOANNEUM RESEARCH Forschungsgesellschaft GmbH befahren. Hinter diesen Fahrten steht das Forschungsprojekt „ALP.Lab“, welches zum Ziel hat, Daten zur Erforschung der autonomen Fahrzeugnavigation zu gewinnen. Nachdem beide Richtungsfahrbahnen mit 80 km/h befahren wurden, erhielt man als Endprodukt eine Laserscan-Punktwolke und Bilder des Projektbereichs. Mit Hilfe einer direkten GNSS-Georeferenzierung wurde eine absolute Genauigkeit im Sub-dm-Bereich erreicht.

Da die Aufnahmen mit Hilfe eines „Begleitschutzes“ der ASFINAG erfolgten, kann auf qualitativ hochwertige Scanaufnahmen zurückgegriffen werden, zumal Abschattungen von fremden Fahrzeugen auf den Aufnahmen deutlich verringert werden konnten. Da im Zeitraum von den Aufnahmen der JOANNEUM RESEARCH Forschungsgesellschaft GmbH (Juli 2018) bis zum Projektbeginn im Juli 2019 keine wesentlichen baulichen Veränderungen auf dieser Teilstrecke der A09 erfolgten, konnten die Daten von den Fahrten des „ALP.Lab“ Forschungsprojekts übernommen werden.

### 3.3.3 Passpunktmessung

Um die Genauigkeitsanforderungen des ASFINAG-Planungsprojektes zu erfüllen, war es notwendig die Passpunkte tachymetrisch im Festpunktfeld der A09 zu vermessen. Für die Passpunkte erwiesen sich die Bodenmarkierungen, unter anderem die halbkreisförmigen Nebelpunkte entlang der Fahrbahn, als sehr nützlich. Grund dafür ist eine sehr gute Identifizierung dieser Bodenmarkierungen in den Scandaten.

Die tachymetrische Erfassung der Passpunkte mittels Totalstation erfolgte im Sommer 2019 an 9 aufeinanderfolgenden Tagen. Als Totalstation diente eine Leica TS15 mit einer Winkelgenauigkeit von 5'' und einer Streckengenauigkeit 3mm + 1,5 ppm. Die Nebelpunkte wurden mit einem Abstand von ca. 35 m vom Pannestreifen aus vermessen. Dort, wo keine Nebelpunkte vorhanden waren, wurden die unterbrochenen Leitlinien, sowie die Sperrflächen der Auf- und Abfahrten verwendet. Querprofile für die zusätzliche Höhenkontrolle wurden reflektorlos vom Instrumentenstandpunkt aus quer zur Betonleitwand gemessen. Hierbei wurden ca. 10 Punkte pro Profil eingemessen. Im Vermessungsverlauf wurden die Polygonpunkte (siehe 3.3.1) überprüft. Jegliche Arbeiten im Fahrbahnbereich erfolgten in Abstimmung mit der zuständigen Autobahnmeisterei. Die Passpunkte wurden mit einer Genauigkeit von  $\pm 5.5$  mm in der Lage und  $\pm 3.0$  mm in der Höhe bestimmt. Eine genaue Passpunktübersicht, aus der ersichtlich ist wie die Passpunkte verteilt sind und welche von JR bzw. Skyability für die Georeferenzierung und später für die Genauigkeitsuntersuchung verwendet wurden, befindet sich im Anhang.



**Abbildung 11 - Die Passpunktmessung**

### 3.3.4 Befahrung mittels Riegl VUX-SYS MLS

Um einen aussagekräftigen Vergleich erstellen zu können, wurde die gleiche Teststrecke von km 190,05 bis km 193,65 mittels Riegl VUX SYS MLS abgefahren und gemessen. Die Befahrung wurde im November 2019 von der Firma Skyability durchgeführt.



**Abbildung 12** - Riegl VUX-SYS MLS Installation auf dem Skyability-Fahrzeug (Foto: Skyability)

Bei der Aufnahme mit dem Riegl-MMS wurde zweimal die selbe Strecke abgefahren. Bei der ersten Fahrt wurde die gesamte Plattform um -30 Grad gegenüber der Fahrtrichtung verschwenkt (siehe Abbildung 13). Bei der zweiten Fahrt wurde das Gleiche gemacht, dieses Mal jedoch mit +30 Grad gegenüber der Fahrtrichtung.

Da die Fahrten in der Nacht durchgeführt wurden, konnte lediglich die Punktwolke ohne Bilder zur Verfügung gestellt werden. Die Aufnahmen wurden kontinuierlich mit 80 km/h durchgeführt, wobei die Scannerfrequenz auf 550 kHz eingestellt und auf Begleitschutz verzichtet wurde.



**Abbildung 13** - Einrichtung der Plattform beim Riegl MMS Aufnahme (Foto: Skyability)

## 3.4 Georeferenzierung der aufgenommenen Daten

### 3.4.1 Leica MMS

Die Georeferenzierung der Leica MMS – Daten wurden von der JOANNEUM RESEARCH durchgeführt.

Die Georeferenzierung aller MMS – Daten basiert auf der Berechnung der gefahrenen Trajektorie. Im Rahmen des Forschungsprojekts ALP. Lab, im Jahr 2018, wurde die Fahrzeugtrajektorie durch eine DGNSS-Auswertung mit einem Leica-Software-Paket (Inertial Explorer) berechnet. Als Masterstation diente die Referenzstation Graz-Lustbühel. Mit Hilfe dieser Station und unter Verwendung der aufgezeichneten GNSS – Daten in Kombination der IMU und Odometer – Daten wurde die direkte Georeferenzierung durchgeführt. Die Genauigkeit der direkten Georeferenzierung entsprach nicht den Anforderungen des ASFINAG – Projekts. Aus diesem Grund musste auf die Methode der indirekten Georeferenzierung umgestiegen werden.

Als Grundlage für die indirekte Georeferenzierung dienten die gemessenen Passpunkte, welche vom Vermessungsbüro ADP Rinner ZT GmbH bereitgestellt wurden. Mit diesen Passpunkten wurden die MLS – Daten in das Zielsystem (MGI, Gauss-Krüger Koordinaten) transformiert. Für die Georeferenzierung der MMS-Daten hat das JOANNEUM RESEARCH die Software „Pegasus Manager“ verwendet.

Um die Methode durchführen zu können, werden drei Schritte benötigt. Der erste Schritt beinhaltet eine annähernde Transformation in das Ziel – Koordinatensystem. Danach erfolgt die Messung der verfügbaren Passpunkte, in den Scandaten. Der letzte Schritt ist die optimierte Georeferenzierung auf Basis der Passpunkte, mittels „Ausgleich durch zeitbasierten Ansatz“.

In diesem Ablauf ist der zweite Schritt am Wichtigsten, da die Art und Weise der Passpunktmessung in den Scandaten eine wichtige Rolle spielt. Die Pegasus Manager – Software bietet zwei Möglichkeiten der Passpunktmessung. Man unterscheidet zwischen automatisierter und manueller Passpunktmessung. Die automatisierte Passpunktmessung basiert auf einem vordefinierten Template (Vorlage). Das Template gibt die geometrische Form vor. Bei der Messung wird diese bestmöglich an die im Laserscan gut erkennbare Bodenmarkierung in Lage und Höhe eingepasst. Es bedarf nur der Angabe der Templates und der Layer mit den zugehörigen Passpunkten. Die weiteren Schritte laufen vollautomatisch ab. Es besteht ein großer Unterschied in der Messgenauigkeit zwischen der automatischen und manuellen Methode. Der menschliche Einfluss hat zur Folge, dass es zu ungenaueren Messergebnissen als bei der automatisierten Passpunktmessung kommt.

Zu einer manuellen Messung kommt es, wenn für gewisse Bodenmarkierungen kein Template zur Verfügung steht. Der Scanlinienabstand spielt eine große Rolle, wenn es sich um die Genauigkeit bei der manuellen Passpunktmessung handelt. Deshalb muss die Lageeinmessung z.B. von Eckpunkten sehr sorgfältig durchgeführt werden.

Nach der Passpunktmessung in den Scandaten erfolgt die Bestimmung der 3D-Klaffen (Soll-Ist-Vergleich zwischen tachymetrisch erfassten Passpunkten und den gleichen Passpunkten in Scandaten). Die festgestellten 3D-Klaffen dienen als Grundlage für die Transformation der Mobile-Mapping-Daten in das Zielsystem mittels Ausgleiches durch zeitbasierten Ansatz (adjustment by time). Es wird jedem Passpunkt ein Zeitpunkt, abhängig von seiner Lage bezüglich der Trajektorie zugewiesen. Abschließend werden die Korrekturen  $dX$ ,  $dY$ ,  $dZ$  linear bezüglich der Zeitachse interpoliert und an den Mobile-Mapping-Daten angebracht. Zusätzlich wurde eine Glättung der Residuen durchgeführt, um die zufälligen Messfehler im Scan zu verringern. Die Resultate sind die optimierte georeferenzierte Punktwolke und die korrigierten Bildpositionen.

Mehr über die Georeferenzierung der Leica MMS Daten kann man im unveröffentlichten Bericht von (Ladstädter, 2019) finden.

### 3.4.2 Riegl MMS

Die Georeferenzierung der Riegl-MMS Daten wurde durch die Firma Skyability mit der Software RiPRECISION durchgeführt. Als Masterstation wurde eine eigene Referenzstation verwendet. Diese war im Testgebiet installiert worden. Die Georeferenzierung der Riegl-MMS Daten wurde durch die Firma Skyability mit der Software RiPRECISION durchgeführt. Als Masterstation wurde eine eigene Referenzstation verwendet. Diese war im Testgebiet installiert worden. Bei der Georeferenzierung des Riegl-Scans wurden jedoch andere Passpunkte als bei der Georeferenzierung durch JOANNEUM RESEARCH verwendet. JOANNEUM RESEARCH verwendete die alle 50 Meter markierten Nebelpunkte, die per Template-Matching automatisiert messbar sind.

Im Gegensatz dazu wurden von Skyability Passflächen verwendet. Es wurden 10 Passflächen auf Brücken und Gantries definiert. Passflächen sind in der Riegl-Software RiPRECISION die übliche Lagerungsmöglichkeit und werden mittels 3 - 4 Punkten definiert. Für die Georeferenzierung werden in diesem Fall auch die Normalvektoren solcher Passflächen verwendet. Das ist eine elegante Methode, weil kein Einzelpunkt identifiziert werden muss. Der Nachteil ist, dass große, ebene Flächen (auch vertikale) verfügbar sein müssen, um eine Einpassung in 3D zu ermöglichen. Bei der Berechnung wurde die Genauigkeit der Passpunkte nicht berücksichtigt. Die Georeferenzierung wurde mittels RiPRECISION durchgeführt, d.h. es wird die Trajektorie anhand einer Stetigkeitsanforderung modifiziert. Die Modifizierung wurde in allen Freiheitsgraden vorgenommen.

Leider hat sich nachträglich herausgestellt, dass Skyability auch Punkte der Querprofile als Passinformation genutzt hat. Laut Protokoll wurden immer zwei Punkte (am Anfang und Ende des Profils) und ein weiterer auf der Betonleitwand verwendet (vertikale Ebene). Damit können die Profile nicht mehr als unabhängige Kontrollpunkte zur Evaluierung der Höhengenaugkeit verwendet werden.

Die Voraussetzungen für eine objektive Vergleichbarkeit der beiden Systeme sind daher leider nicht erfüllt. Im Bereich wo Skyability Passpunkte für Georeferenzierung verwendet hat (km 192.000 – km 193.600), konnte aber dennoch ein teilweiser Vergleich der Systeme durchgeführt werden.

### 3.5 Datenauswertung

Nach der Georeferenzierung beider MMS-Punktwolken, wurde mit der Datenauswertung begonnen, um oben den oben erwähnten Genauigkeitsvergleich der behandelten Systeme zu erstellen. Die Genauigkeitsabschätzung basierte auf der Messung von Kontrollpunkten in Punktwolken separat für beide Systeme und dem anschließenden Vergleich derselben Punkte mit Referenzpunkten, die auf tachymetrischen Weise (Totalstation) gemessen wurden.

Des Weiteren wurde ein SOLL-IST Vergleich erstellt und anhand der 3D Klaffen in den Punkten wurde nachfolgend eine statistische Auswertung bzw. Abschätzung durchgeführt. In dieser wurde überprüft, ob die verwendeten Systeme die vom Auftraggeber vorgegebenen Genauigkeitsanforderungen erfüllen können. Zu diesem Zweck wurden die entsprechenden statistischen Parameter bestimmt: Arithmetischer Mittelwert, Minimum, Maximum, Varianz sowie die Standardabweichung inklusive Konfidenzintervallen. Anhand dieser Parameter wurde abschließend eine Schlussfolgerung abgeleitet.

#### 3.5.1 Messung der Kontrollpunkte in ORBIT

Der erste Schritt im Zuge der Datenauswertung bestand darin, die Kontrollpunkte in den Punktwolken beider Systeme auszumessen. In der belgischen Software ORBIT GT 3DM Feature Extraction wurden die angegebenen Messungen durchgeführt.

Der Grund, warum für beide Systeme die gleiche Software verwendet wurde, bestand darin, dass die Objektivität in den Messungen gewahrt und ein realistischer Vergleich dargestellt werden sollte. In diesem Sinne wurden auch die gleichen Messwerkzeuge verwendet. Im Vergleich zur „PEGASUS MANAGER“ Software, bietet die ORBIT Software eine eigene

Palette an spezifischen Messwerkzeugen. Diese können dem nachfolgenden Bild entnommen werden:

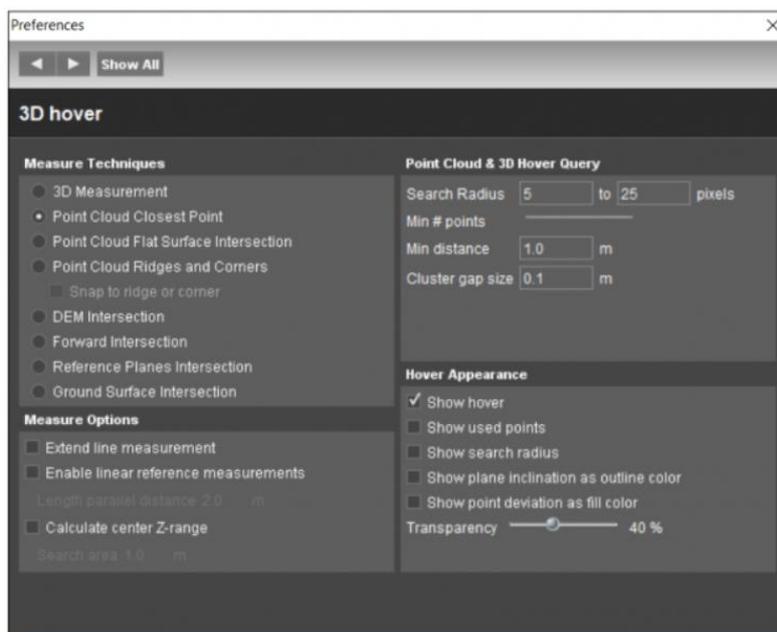


Abbildung 14 - Darstellung der Messtechniken in Orbit (Quelle: Screenshot)

In der Abbildung 14 ist zu sehen, dass ORBIT verschiedene Messtechniken anbietet, je nach der erforderlichen Genauigkeit und Verfügbarkeit der Daten sowie ihrer Qualität:

- Messungen mit Punktwolke
- Messungen mit Referenzflächen
- Messungen mit Vorwärtsschnittmessung

Da für die Zwecke dieser Masterarbeit nur Punktwolken zur Verfügung standen, wurden nur Werkzeuge verwendet, die auf der erstgenannten Messtechnik basieren.

### **Messungen mit Punktwolken**

Diese Technik bietet die drei folgenden Werkzeuge für eine Punktmessung:

1. Closest Point (Nächstgelegener Punkt)
2. Flat Surface Intersection (Schnittpunkt der flachen Oberfläche)
3. Ridge and Corners Intersection (Kreuzung von Grat und Ecken)

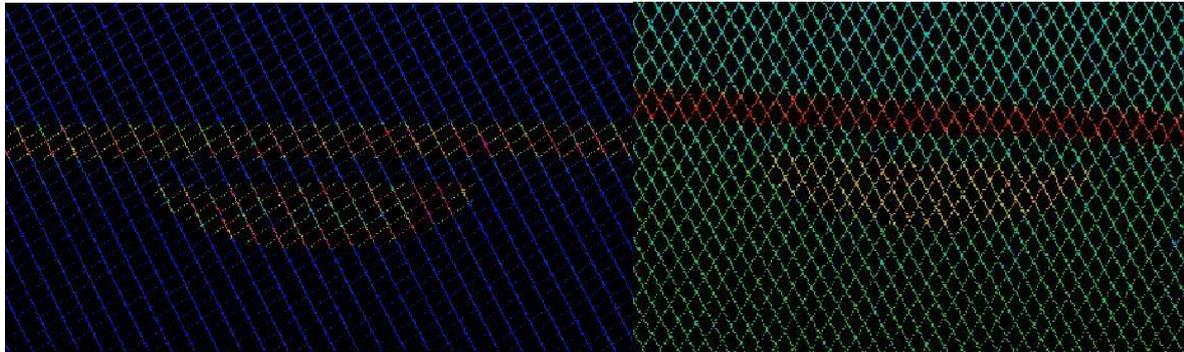
Die Messmethode **Closest Point** („Nächster Punkt“) arbeitet automatisch, in dem der nächstgelegene verfügbare Punkt der Punktwolke ausgewählt wird. Hierbei werden die Koordinaten des gemessenen Anfangspunktes berücksichtigt. Verwendet man Punktwolken mit hoher Dichte, so empfiehlt sich die Closest-Point-Technik.

Die **Flat Surface Intersection** („Schnittpunkt mit ebener Oberfläche“) interpoliert einen Punkt innerhalb eines Satzes vordefinierter Punktwolkenpunkte. Zu den einstellbaren Eigenschaften zählt man den Suchradius und die minimale Anzahl von Interpolationspunkten, welche in den Voreinstellungen konfiguriert werden können. Verwendet man eine Punktwolken mit geringerer Dichte, so empfiehlt sich die Flat Surface Intersection-Technik.

Die Technik **Ridge and Corners Intersection** („Kanten und Ecken Verschneidung“) basiert sich auf den gleichen Prinzipien wie die Interpolarisationsmethode der Flat Surface Intersection Technik. Hierbei wird die Position von Kanten, Graten und Ecken identifiziert, z.B. an Straßenrändern und Hausecken.

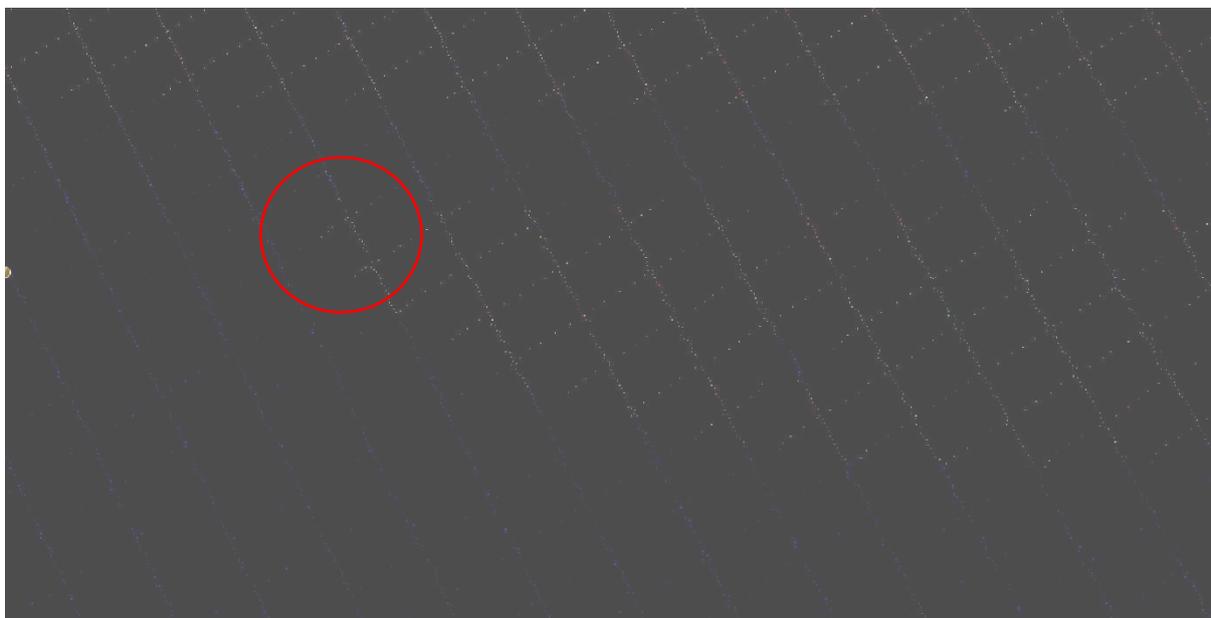
Mehr zu den Messwerkzeugen und Messtechniken findet man in (Orbit Support, 2020).

### **Unterschied in der Punktmessung in beiden Punktwolken**



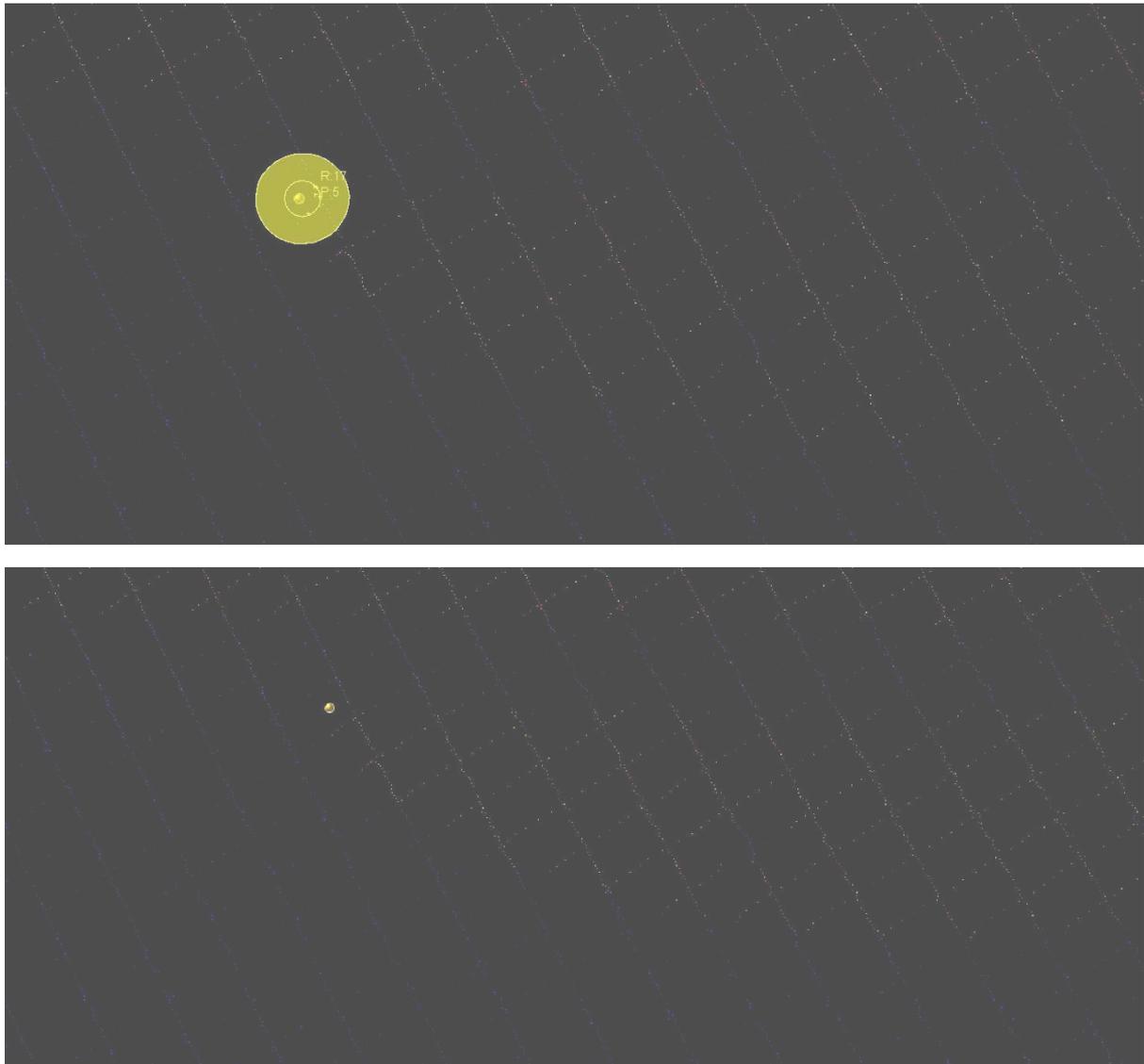
**Abbildung 15** - Unterschiedliche Darstellung gleicher Nebelpunkte in beiden Punktwolken. Leica Punktwolke links, Riegl Punktwolke rechts. (Quelle: Screenshot)

In Abbildung 15 ist der Unterschied zwischen Punktwolken in Bezug auf Intensität und Abstand zwischen den Scanlinien deutlich zu erkennen. Zusätzlich ergibt sich die Schwierigkeit, Kontrollpunkte in den Punktwolken zu identifizieren. Da Orbit nur manuelle Punktmessung bietet, war es sehr schwierig, die Eckpunkte dieser Nebelpunkte zu identifizieren und zu messen. Die besondere Schwierigkeit spiegelte sich in der Definition der Position des Punktes, im Bezug auf die X- und Y-Koordinaten wieder, wenn sich der Eckpunkt zwischen zwei Scanlinien befindet.



**Abbildung 16** - Ein Beispiel für das Problem der Definition von Eckpunkten in Nebelpunkten (Quelle: Screenshot)

In solchen Fällen wurde das Werkzeug **Flat Surface Intersection** verwendet. Nachfolgendes Bild zeigt, wie das Werkzeug funktioniert.



**Abbildung 17** - Funktionsweise des Flat Surface Intersection Werkzeugs (Schnittpunkt der flachen Oberfläche)

In Abbildung 17 ist ersichtlich, dass ein beliebiger Punkt gemessen werden kann, so z.B. auch der nicht von Scanpunkten erfasste Eckpunkt, dessen Lage nur geschätzt werden kann. Hier zeigt sich der große Vorteil der Messung mit einem geometrischen Template.

Entscheidend für die Höhengenaugigkeit ist die Anzahl der bei der Höheninterpolation verwendeten Einzelscanpunkte. Hierbei wurde ein Radius von minimal 10 Punkte definiert. Der Messwerkzeug hat minimal 10 Punkte für Höhebestimmung verwendet.

Ein Genauigkeitsvergleich wurde für zwei Punktgruppen durchgeführt: Bodenmarkierungen auf der Fahrbahn und Profilpunkte.

Bei den Bodenmarkierungen wurde die Analyse in allen drei Komponenten (X, Y, Z) durchgeführt, wohingegen bei den Querprofilen eine Analyse nur in einer Komponente, nämlich in der Höhe (Z) möglich war. Der Grund dafür ist, dass die Profilpunkte nicht markiert und daher im Scan nicht identifizierbar waren. Es kann aber angenommen werden, dass die Fahrbahnoberfläche aufgrund ihrer Ebenheit in einer kleinen Umgebung eine konstante Höhe aufweist.

Dadurch kann die Messoption ***Point drop to horizontal reference plane (Projektion auf horizontale Bezugsebene)*** verwendet werden. Das Prinzip dieser Messoption spiegelt sich darin wieder, dass die horizontale Referenzebene zuerst mit einem Klick definiert und dann der benötigte Punkt an einer definierten Position gemessen wird. Das Ergebnis dieser Messung ist die auf die Referenzebene projizierte Z-Koordinate, die durch Interpolation der benachbarten Messpunkte ermittelt wird.

### 3.5.2 Statistische Datenauswertung in Excel

Nach der Messung der Kontrollpunkte in den Punktwolken wurde die statistische Datenauswertung durchgeführt. Die statistische Datenauswertung erfolgte im Microsoft-Programm „Excel“. Der erste Schritt war die Berechnung von SOLL – IST und der Bestimmung von 3D-Klaffen.

Bei der Berechnung wurden die tachymetrischen Kontrollpunkte als SOLL und die manuell gemessenen Punkte in Punktwolken als IST betrachtet. Für diese Residuenvektoren wurden für jede Komponente dX, dY und dZ die statistischen Parameter Mittelwert, Varianz, Standardabweichung, Minimum und Maximum berechnet. Zusätzlich wurde das 95% Konfidenzintervall für diese Parameter bestimmt.

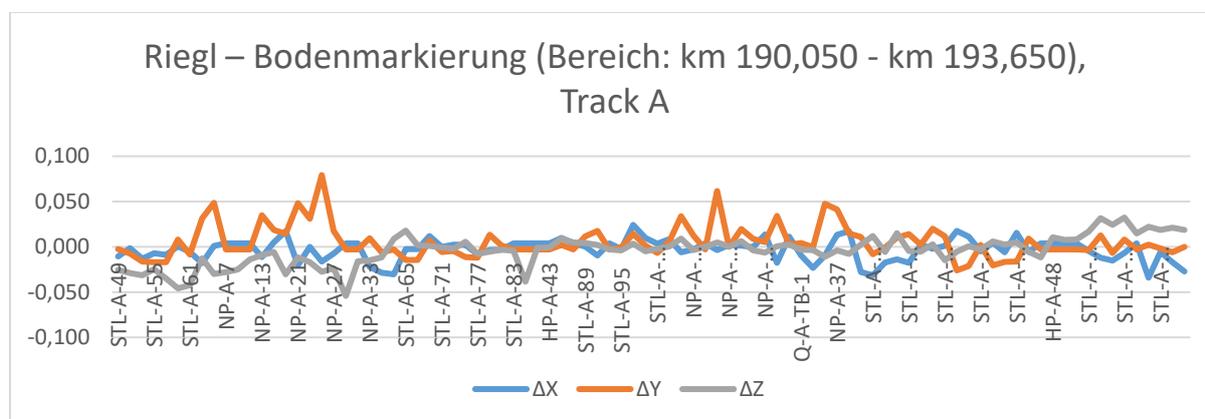
Wie im Kapitel 3.4.2 erwähnt, konnte wegen der Verwendung von verschiedenen Passpunktkonfigurationen für die Georeferenzierung keine objektive Vergleichbarkeit durchgeführt werden. Aus diesem Grund teilen sich die Berechnungen, separat für beide Systeme mit getrennter Betrachtung in beide Tracks, in:

1. Riegl – Bodenmarkierung (Bereich: km 190,050 - km 193,650), getrennt in Track A und Track B
2. Leica – Bodenmarkierung (Bereich: km 190,050 - km 193,650), getrennt in Track A und Track B
3. Riegl – Bodenmarkierung (Bereich: km 192,000 - km 193,600), getrennt in Track A und Track B
4. Riegl – Querprofile, insgesamt 7 Querprofilen mit getrennter Berechnung für jedes Profil (nur die Z Koordinate)
5. Leica – Querprofile, insgesamt 7 Querprofilen mit getrennter Berechnung für jedes Profil (nur die Z Koordinate)

Diese Ergebnisse wurden verglichen und daraus Schlussfolgerungen gezogen. Damit soll für beide Systeme die Frage beantwortet werden, ob sie die Genauigkeitsanforderungen für ASFINAG-Projekte erfüllen oder nicht (siehe auch Kapitel 4).

3.5.2.1 Riegl – Bodenmarkierung (Bereich: km 190,050 - km 193,650)

**Track A**



**Abbildung 18** - Abweichungen bei Bodenmarkierungen (Track A), Riegl MMS<sup>4</sup>

Es wurden insgesamt 90 Kontrollpunkte gemessen und für die Analyse verwendet. Die Ergebnisse sind in Tabelle 10 und Tabelle 11 dargestellt. Standardabweichungen über  $\pm 3\text{cm}$  in der Lage bzw.  $\pm 1\text{cm}$  in der Höhe werden im Folgenden in Rot dargestellt, Werte in Grün erfüllen die ASFINAG Anforderungen.

<b>Genauigkeitsanalyse</b>	$\Delta X$ [m]	$\Delta Y$ [m]	$\Delta Z$ [m]
<i>Min</i>	-0,034	-0,026	-0,054
<i>Max</i>	0,024	0,079	0,032
<i>Mittel</i>	0,009	0,013	0,012
<i>Standardabweichung</i>	$\pm 0,012$	$\pm 0,018$	$\pm 0,016$

**Tabelle 10** - Genauigkeitsanalyse für Bodenmarkierungen (Track A), Riegl MMS

<b>Konfidenzintervall CI – 95%</b>	$\Delta X$ [m]		$\Delta Y$ [m]		$\Delta Z$ [m]	
<i>Mittel</i> <sup>5</sup>	$\pm 0,003$		$\pm 0,004$		$\pm 0,003$	
<i>Stand.abweichung</i> <sup>6</sup>	0,010	0,014	0,016	0,021	0,014	0,019

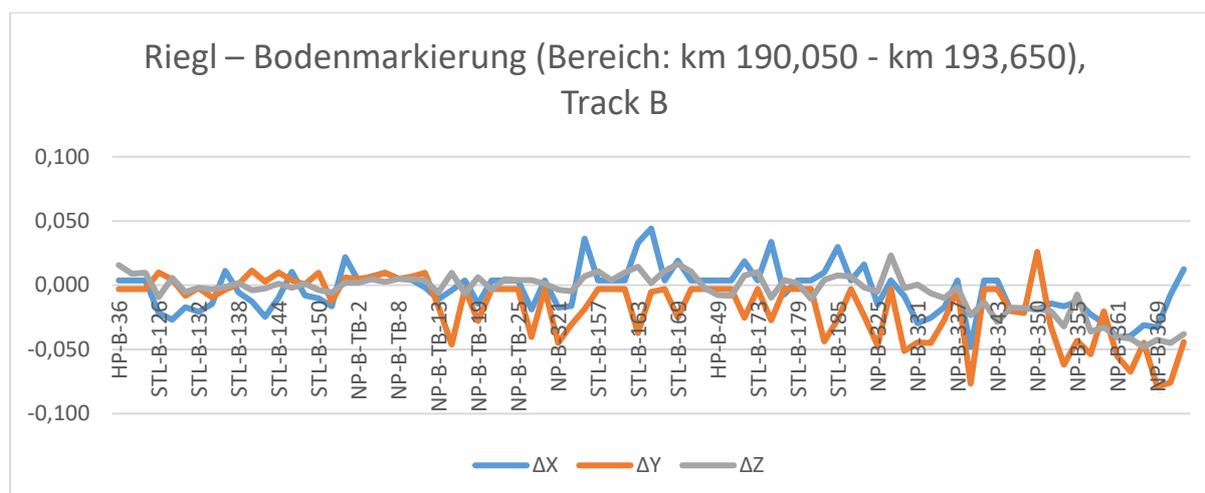
**Tabelle 11** - Konfidenzintervall von 95% für berechneten Parameter bei Bodenmarkierungen (Track A), Riegl MMS

<sup>4</sup> Anbei eine vergrößerte Ansicht des dargestellten Plots.

<sup>5</sup> Student-t Test

<sup>6</sup> Chi-Quadrat Test

**Track B**



**Abbildung 19** - Abweichungen bei Bodenmarkierungen (Track B), Riegl MMS<sup>7</sup>

Es wurden insgesamt 81 Kontrollpunkte gemessen und für die Analyse verwendet. Die Ergebnisse sind in Tabelle 12 und Tabelle 13 dargestellt:

<b>Genauigkeitsanalyse</b>	<b><math>\Delta X</math> [m]</b>	<b><math>\Delta Y</math> [m]</b>	<b><math>\Delta Z</math> [m]</b>
<i>Min</i>	-0,048	-0,079	-0,048
<i>Max</i>	0,044	0,026	0,023
<i>Mittel</i>	0,014	0,020	0,011
<i>Standardabweichung</i>	<b>± 0,018</b>	<b>± 0,031</b>	<b>± 0,015</b>

**Tabelle 12** - Genauigkeitsanalyse für Bodenmarkierungen (Track B), Riegl MMS

<b>Konfidenzintervall CI – 95%</b>	<b><math>\Delta X</math> [m]</b>		<b><math>\Delta Y</math> [m]</b>		<b><math>\Delta Z</math> [m]</b>	
<i>Mittel</i> <sup>8</sup>	± 0,004		± 0,007		± 0,003	
<i>Stand.abweichung</i> <sup>9</sup>	0,015	0,021	0,027	0,037	0,013	0,018

**Tabelle 13** - Konfidenzintervall von 95% für berechneten Parameter bei Bodenmarkierungen (Track B), Riegl MMS

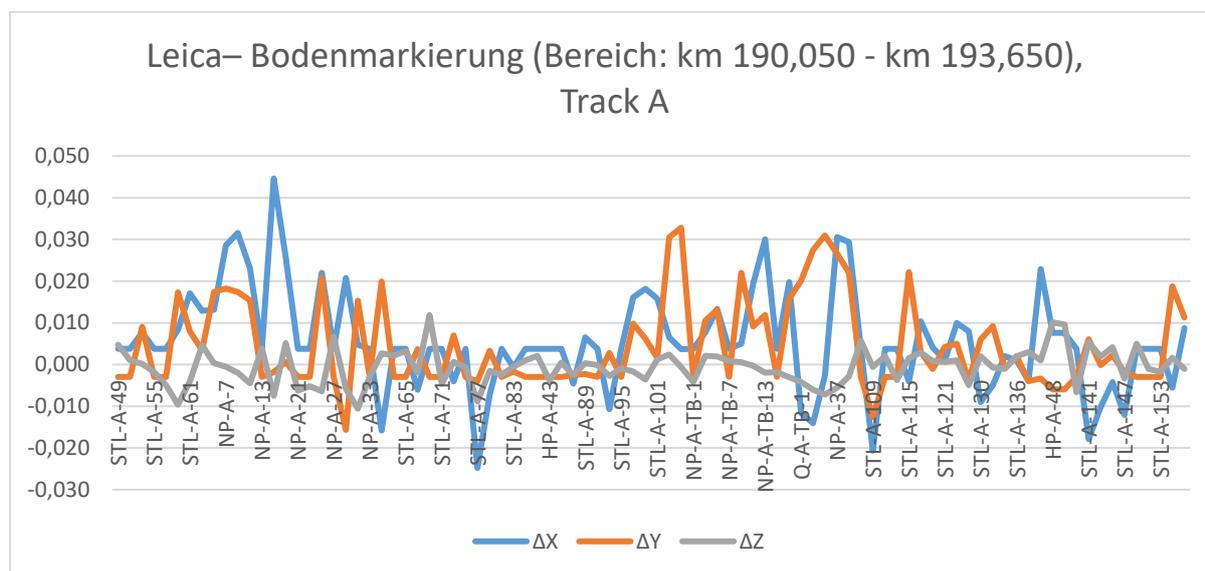
<sup>7</sup> Anbei eine vergrößerte Ansicht des dargestellten Plots.

<sup>8</sup> Student-t Test

<sup>9</sup> Chi-Quadrat Test

3.5.2.2 Leica – Bodenmarkierung (Bereich: km 190,050 - km 193,650)

**Track A**



**Abbildung 20** - Abweichungen bei Bodenmarkierungen (Track A), Leica MMS<sup>10</sup>

Es wurden insgesamt 90 Kontrollpunkte gemessen und für die Analyse verwendet. Die Ergebnisse sind in Tabelle 14 und Tabelle 15 dargestellt:

<b>Genauigkeitsanalyse</b>	<b>ΔX [m]</b>	<b>ΔY [m]</b>	<b>ΔZ [m]</b>
<i>Min</i>	-0,025	-0,016	-0,011
<i>Max</i>	0,045	0,033	0,012
<i>Mittel</i>	0,010	0,008	0,003
<i>Standardabweichung</i>	± 0,012	± 0,010	± 0,004

**Tabelle 14** - Genauigkeitsanalyse für Bodenmarkierungen (Track A), Leica MMS

<b>Konfidenzintervall CI – 95%</b>	<b>ΔX [m]</b>		<b>ΔY [m]</b>		<b>ΔZ [m]</b>	
<i>Mittel</i> <sup>11</sup>	± 0,003		± 0,002		± 0,001	
<i>Stand.abweichung</i> <sup>12</sup>	0,010	0,014	0,009	0,012	0,004	0,005

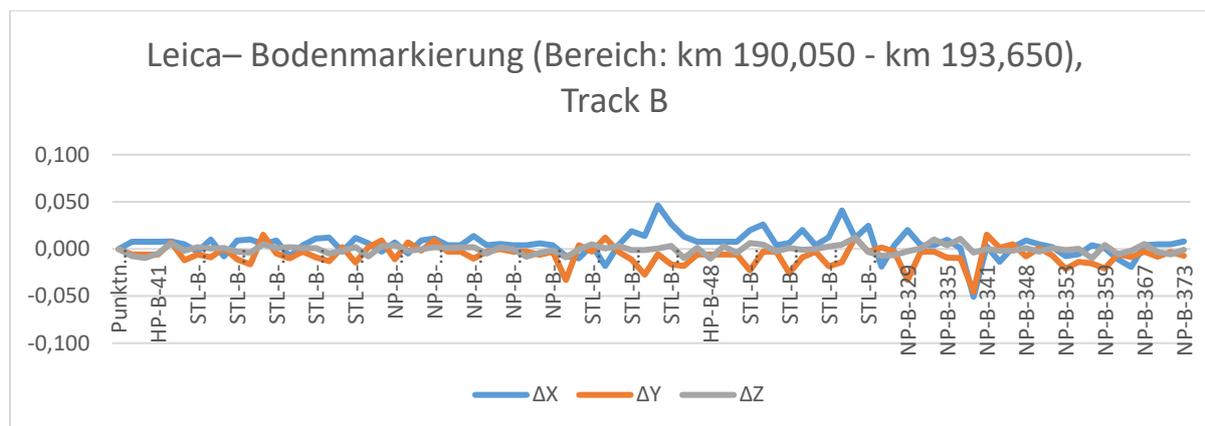
**Tabelle 15** - Konfidenzintervall von 95% für berechneten Parameter bei Bodenmarkierungen (Track A), Leica MMS

<sup>10</sup> Anbei eine vergrößerte Ansicht des dargestellten Plots.

<sup>11</sup> Student-t Test

<sup>12</sup> Chi-Quadrat Test

**Track B**



**Abbildung 21** - Abweichungen bei Bodenmarkierungen (Track B), Leica MMS<sup>13</sup>

Es wurden insgesamt 81 Kontrollpunkte gemessen und für die Analyse verwendet. Die Ergebnisse sind in Tabelle 16 und Tabelle 17 dargestellt:

<b>Genauigkeitsanalyse</b>	<b>ΔX [m]</b>	<b>ΔY [m]</b>	<b>ΔZ [m]</b>
<i>Min</i>	-0,051	-0,046	-0,010
<i>Max</i>	0,046	0,015	0,012
<i>Mittel</i>	0,010	0,009	0,004
<i>Standardabweichung</i>	± 0,013	± 0,010	± 0,005

**Tabelle 16** - Genauigkeitsanalyse für Bodenmarkierungen (Track B), Leica MMS

<b>Konfidenzintervall CI – 95%</b>	<b>ΔX [m]</b>		<b>ΔY [m]</b>		<b>ΔZ [m]</b>	
<i>Mittel</i> <sup>14</sup>	± 0,003		± 0,002		± 0,001	
<i>Stand.abweichung</i> <sup>15</sup>	0,011	0,015	0,009	0,012	0,004	0,005

**Tabelle 17** - Konfidenzintervall von 95% für berechneten Parameter bei Bodenmarkierungen (Track B), Leica MMS

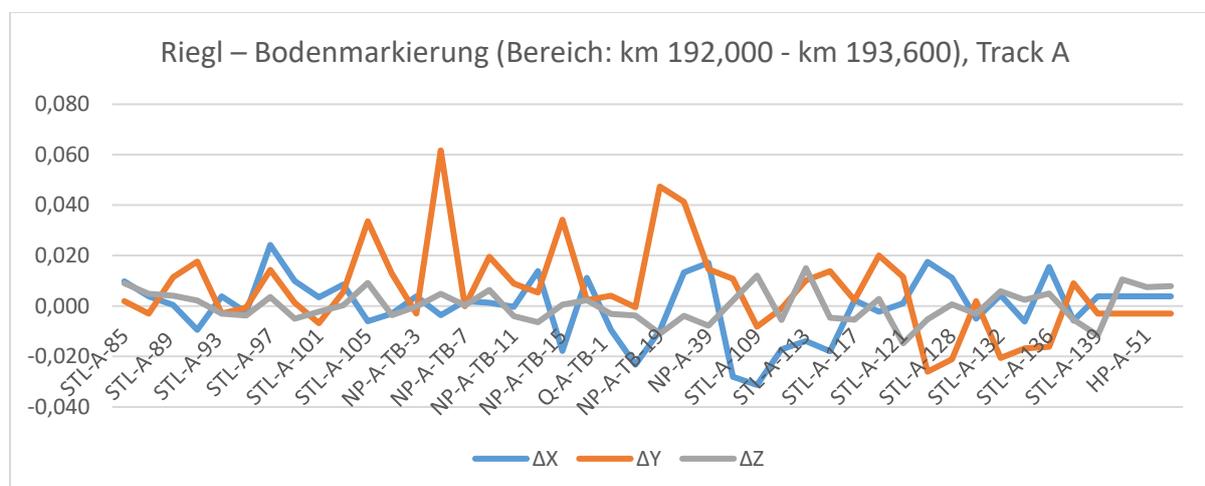
<sup>13</sup> Anbei eine vergrößerte Ansicht des dargestellten Plots.

<sup>14</sup> Student-t Test

<sup>15</sup> Chi-Quadrat Test

3.5.2.3 Riegl – Bodenmarkierung (Bereich: km 192,000 - km 193,600)

**Track A**



**Abbildung 22** - Abweichungen bei Bodenmarkierungen – Separater Bereich (Track A), Riegl MMS<sup>16</sup>

Es wurden insgesamt 44 Kontrollpunkte gemessen und für die Analyse verwendet. Die Ergebnisse sind in Tabelle 18 und Tabelle 19 dargestellt:

<b>Genauigkeitsanalyse</b>	<b>ΔX [m]</b>	<b>ΔY [m]</b>	<b>ΔZ [m]</b>
<i>Min</i>	-0,031	-0,026	-0,015
<i>Max</i>	0,024	0,062	0,015
<i>Mittel</i>	0,009	0,013	0,005
<i>Standardabweichung</i>	± 0,012	± 0,017	± 0,007

**Tabelle 18** - Genauigkeitsanalyse für Bodenmarkierungen – Separater Bereich (Track A), Riegl MMS

<b>Konfidenzintervall CI – 95%</b>	<b>ΔX [m]</b>		<b>ΔY [m]</b>		<b>ΔZ [m]</b>	
<i>Mittel</i> <sup>17</sup>	± 0,004		± 0,005		± 0,002	
<i>Stand.abweichung</i> <sup>18</sup>	0,010	0,015	0,014	0,022	0,005	0,008

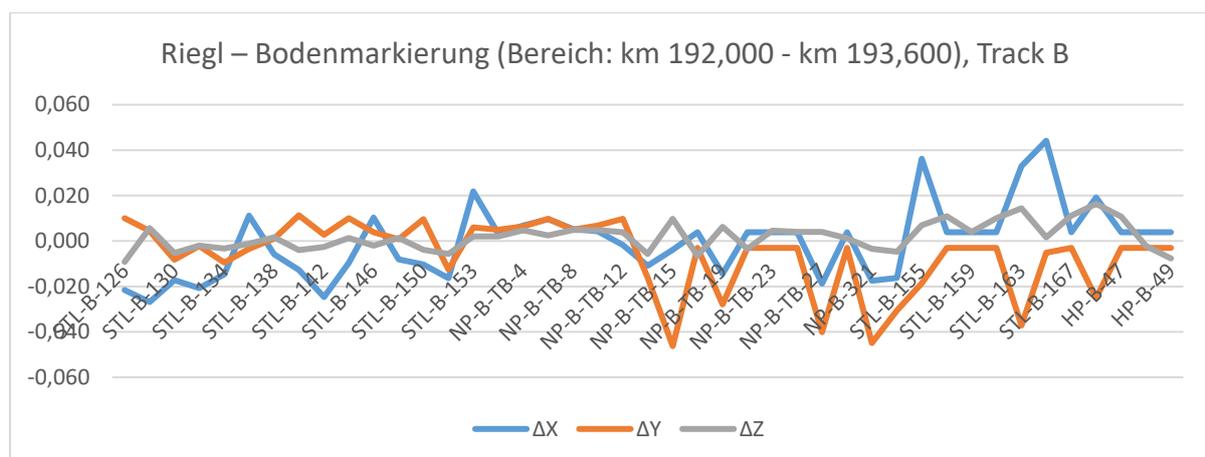
**Tabelle 19** - Konfidenzintervall von 95% für berechneten Parameter bei Bodenmarkierungen – Separater Bereich (Track A), Riegl MMS

<sup>16</sup> Anbei eine vergrößerte Ansicht des dargestellten Plots.

<sup>17</sup> Student-t Test

<sup>18</sup> Chi-Quadrat Test

**Track B**



**Abbildung 23** - Abweichungen bei Bodenmarkierungen – Separater Bereich (Track B), Riegl MMS<sup>19</sup>

Es wurden insgesamt 43 Kontrollpunkte gemessen und für die Analyse verwendet. Die Ergebnisse sind in Tabelle 20 und Tabelle 21 dargestellt:

<b>Genauigkeitsanalyse</b>	<b>ΔX [m]</b>	<b>ΔY [m]</b>	<b>ΔZ [m]</b>
<i>Min</i>	-0,027	-0,046	-0,009
<i>Max</i>	0,044	0,011	0,016
<i>Mittel</i>	0,012	0,011	0,005
<i>Standardabweichung</i>	± 0,016	± 0,015	± 0,006

**Tabelle 20** - Genauigkeitsanalyse für Bodenmarkierungen – Separater Bereich (Track B), Riegl MMS

<b>Konfidenzintervall CI – 95%</b>	<b>ΔX [m]</b>		<b>ΔY [m]</b>		<b>ΔZ [m]</b>	
<i>Mittel</i> <sup>20</sup>	± 0,005		± 0,005		± 0,002	
<i>Stand.abweichung</i> <sup>21</sup>	0,013	0,020	0,013	0,019	0,005	0,008

**Tabelle 21** - Konfidenzintervall von 95% für berechneten Parameter bei Bodenmarkierungen – Separater Bereich (Track B), Riegl MMS

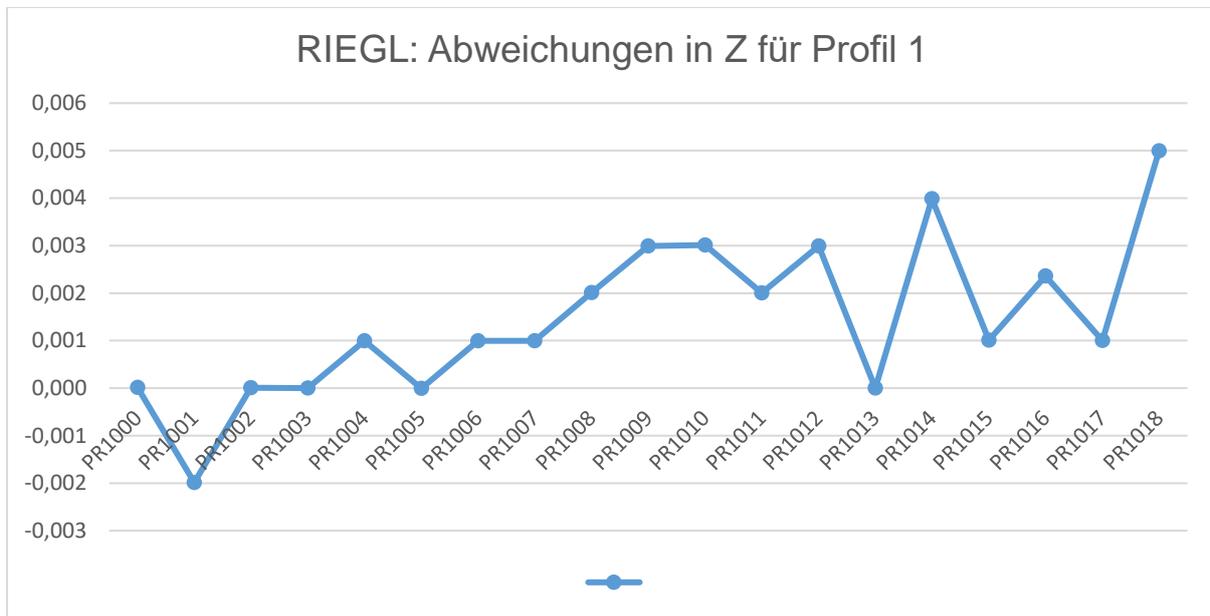
<sup>19</sup> Anbei eine vergrößerte Ansicht des dargestellten Plots.

<sup>20</sup> Student-t Test

<sup>21</sup> Chi-Quadrat Test

3.5.2.4 Riegl – Querprofile

**Profil 1**



**Abbildung 24** - Abweichungen in Z Koordinate bei Profil 1, Riegl MMS

Es wurden insgesamt 19 Kontrollpunkte gemessen und für die Analyse verwendet. Die Ergebnisse sind in Tabelle 22 und Tabelle 23 dargestellt:

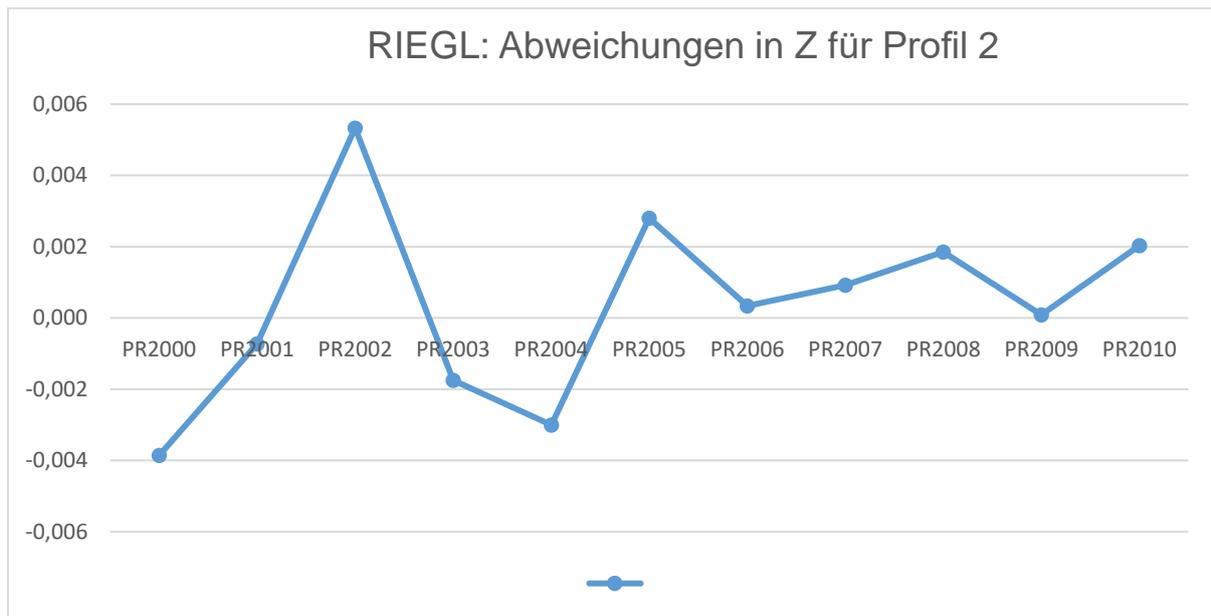
<b>Genauigkeitsanalyse</b>	<b><math>\Delta Z</math> [m]</b>
<i>Min</i>	-0,002
<i>Max</i>	0,005
<i>Mittel</i>	0,001
<i>Stand.abweichung</i>	$\pm 0,002$

**Tabelle 22** - Genauigkeitsanalyse für Profil 1, Riegl MMS

<b>Konfidenzintervall CI – 95%</b>	<b><math>\Delta Z</math> [m]</b>	
<i>Mittel</i>	$\pm 0,001$	
<i>Stand.abweichung</i>	0,001	0,002

**Tabelle 23** - Konfidenzintervall von 95% für berechneten Parameter bei Profil 1, Riegl MMS

**Profil 2**



**Abbildung 25** - Abweichungen in Z Koordinate bei Profil 2, Riegl MMS

Es wurden insgesamt 11 Kontrollpunkte gemessen und für die Analyse verwendet. Die Ergebnisse sind in Tabelle 24 und Tabelle 25 dargestellt:

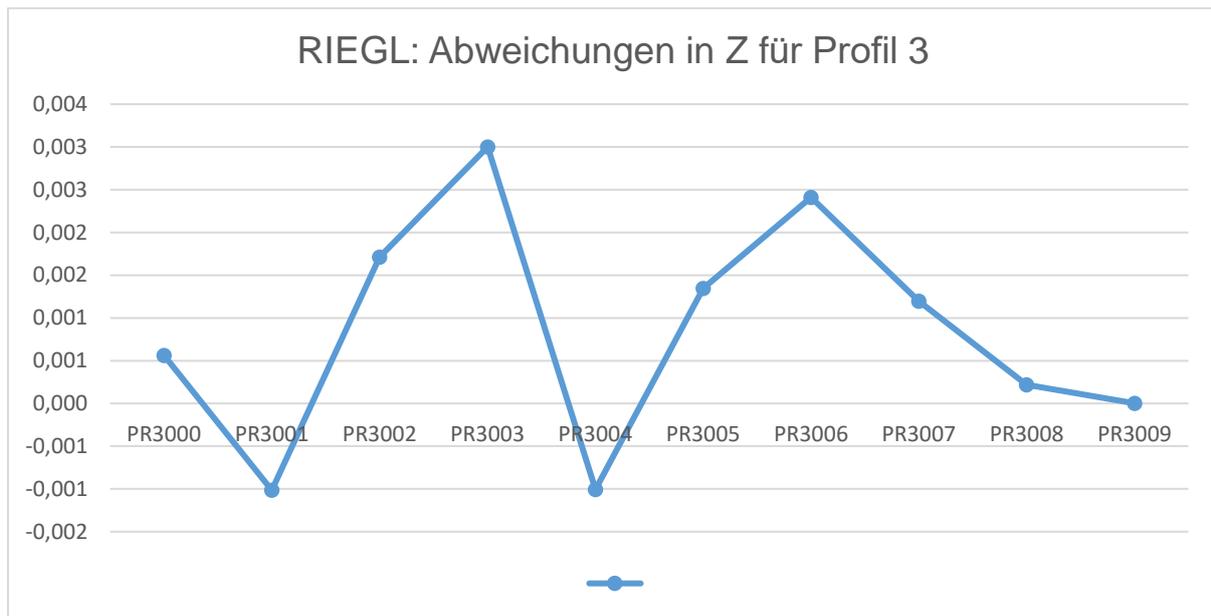
<b>Genauigkeitsanalyse</b>	<b><math>\Delta Z</math> [m]</b>
<i>Min</i>	-0,004
<i>Max</i>	0,005
<i>Mittel</i>	0,000
<i>Stand.abweichung</i>	$\pm 0,003$

**Tabelle 24** - Genauigkeitsanalyse für Profil 2, Riegl MMS

<b>Konfidenzintervall CI – 95%</b>	<b><math>\Delta Z</math> [m]</b>	
<i>Mittel</i>	$\pm 0,002$	
<i>Stand.abweichung</i>	0,002	0,005

**Tabelle 25** - Konfidenzintervall von 95% für berechneten Parameter bei Profil 2, Riegl MMS

**Profil 3**



**Abbildung 26** - Abweichungen in Z Koordinate bei Profil 3, Riegl MMS

Es wurden insgesamt 10 Kontrollpunkte gemessen und für die Analyse verwendet. Die Ergebnisse sind in Tabelle 26 und Tabelle 27 dargestellt:

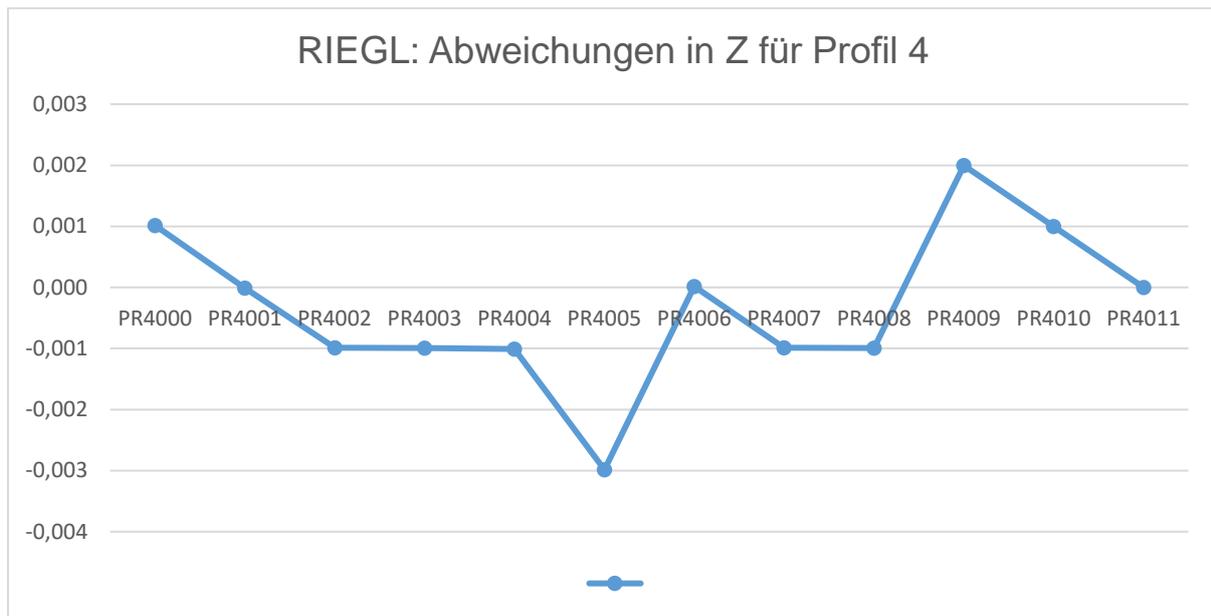
Genauigkeitsanalyse	$\Delta Z$ [m]
<i>Min</i>	-0,001
<i>Max</i>	0,003
<i>Mittel</i>	0,001
<i>Stand.abweichung</i>	$\pm 0,001$

**Tabelle 26** - Genauigkeitsanalyse für Profil 3, Riegl MMS

Konfidenzintervall CI – 95%	$\Delta Z$ [m]	
<i>Mittel</i>	$\pm 0,001$	
<i>Stand.abweichung</i>	0,001	0,002

**Tabelle 27** - Konfidenzintervall von 95% für berechneten Parameter bei Profil 3, Riegl MMS

**Profil 4**



**Abbildung 27** - Abweichungen in Z Koordinate bei Profil 4, Riegl MMS

Es wurden insgesamt 12 Kontrollpunkte gemessen und für die Analyse verwendet. Die Ergebnisse sind in Tabelle 28 und Tabelle 29 dargestellt:

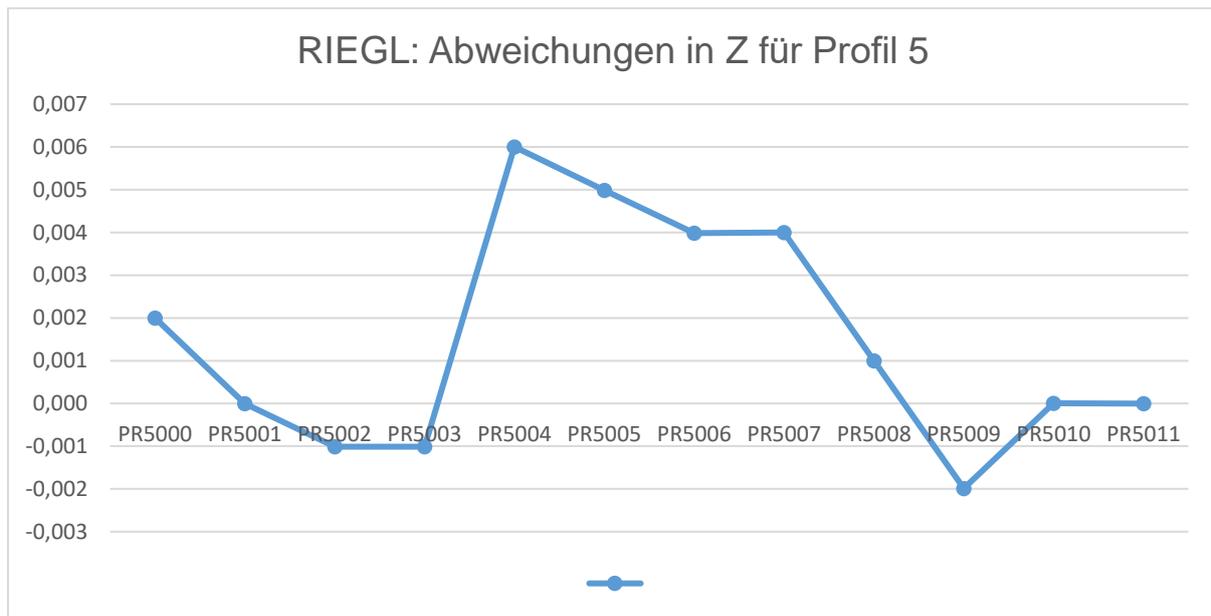
<b>Genauigkeitsanalyse</b>	<b><math>\Delta Z</math> [m]</b>
<i>Min</i>	-0,003
<i>Max</i>	0,002
<i>Mittel</i>	0,000
<i>Stand.abweichung</i>	$\pm 0,001$

**Tabelle 28** - Genauigkeitsanalyse für Profil 4, Riegl MMS

<b>Konfidenzintervall CI – 95%</b>	<b><math>\Delta Z</math> [m]</b>	
<i>Mittel</i>	$\pm 0,001$	
<i>Stand.abweichung</i>	0,001	0,002

**Tabelle 29** - Konfidenzintervall von 95% für berechneten Parameter bei Profil 4, Riegl MMS

**Profil 5**



**Abbildung 28** - Abweichungen in Z Koordinate bei Profil 5, Riegl MMS

Es wurden insgesamt 12 Kontrollpunkte gemessen und für die Analyse verwendet. Die Ergebnisse sind in Tabelle 30 und Tabelle 31 dargestellt:

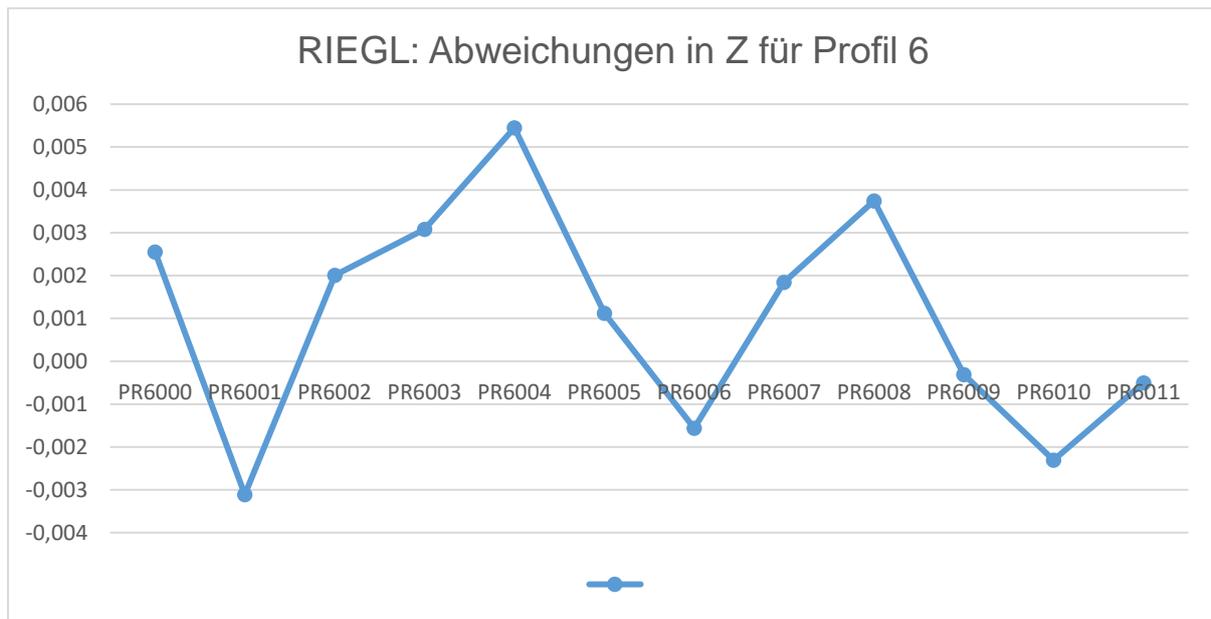
<b>Genauigkeitsanalyse</b>	<b><math>\Delta Z</math> [m]</b>
<i>Min</i>	-0,002
<i>Max</i>	0,006
<i>Mittel</i>	0,001
<i>Stand.abweichung</i>	$\pm 0,003$

**Tabelle 30** - Genauigkeitsanalyse für Profil 5, Riegl MMS

<b>Konfidenzintervall CI – 95%</b>	<b><math>\Delta Z</math> [m]</b>	
<i>Mittel</i>	$\pm 0,002$	
<i>Stand.abweichung</i>	0,002	0,004

**Tabelle 31** - Konfidenzintervall von 95% für berechneten Parameter bei Profil 5, Riegl MMS

**Profil 6**



**Abbildung 29** - Abweichungen in Z Koordinate bei Profil 6, Riegl MMS

Es wurden insgesamt 12 Kontrollpunkte gemessen und für die Analyse verwendet. Die Ergebnisse sind in Tabelle 32 und Tabelle 33 dargestellt:

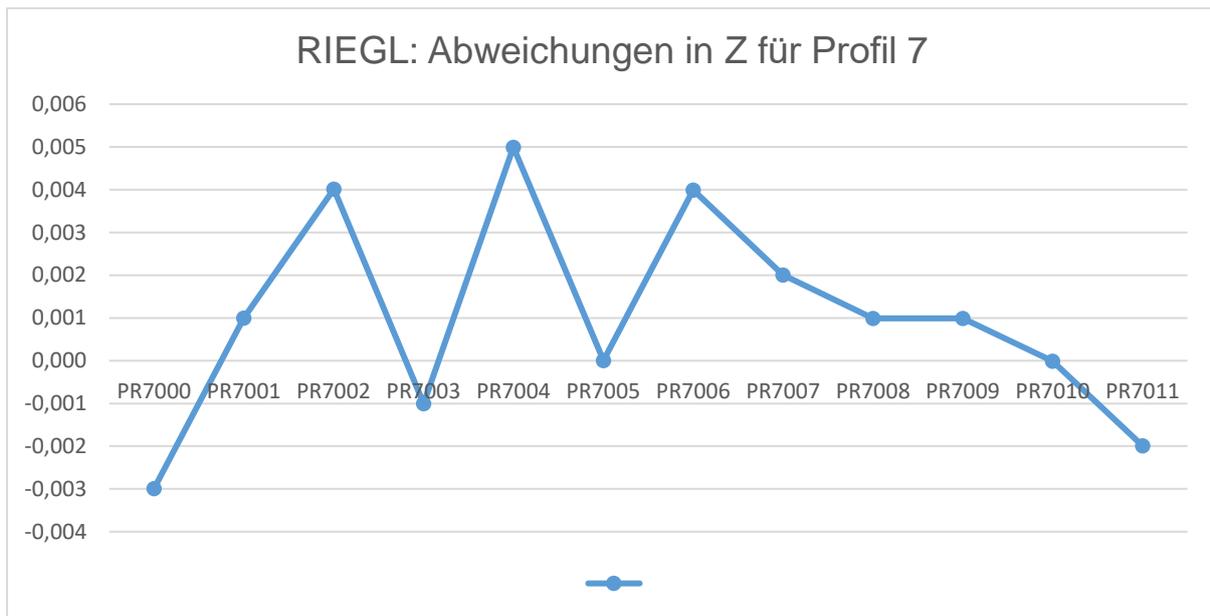
<b>Genauigkeitsanalyse</b>	<b><math>\Delta Z</math> [m]</b>
<i>Min</i>	-0,003
<i>Max</i>	0,005
<i>Mittel</i>	0,001
<i>Stand.abweichung</i>	$\pm 0,003$

**Tabelle 32** - Genauigkeitsanalyse für Profil 6, Riegl MMS

<b>Konfidenzintervall CI – 95%</b>	<b><math>\Delta Z</math> [m]</b>	
<i>Mittel</i>	$\pm 0,002$	
<i>Stand.abweichung</i>	0,002	0,004

**Tabelle 33** - Konfidenzintervall von 95% für berechneten Parameter bei Profil 6, Riegl MMS

**Profil 7**



**Abbildung 30** - Abweichungen in Z Koordinate bei Profil 7, Riegl MMS

Es wurden insgesamt 12 Kontrollpunkte gemessen und für die Analyse verwendet. Die Ergebnisse sind in Tabelle 34 und Tabelle 35 dargestellt:

Genauigkeitsanalyse	$\Delta Z$ [m]
<i>Min</i>	-0,003
<i>Max</i>	0,005
<i>Mittel</i>	0,001
<i>Stand.abweichung</i>	$\pm 0,002$

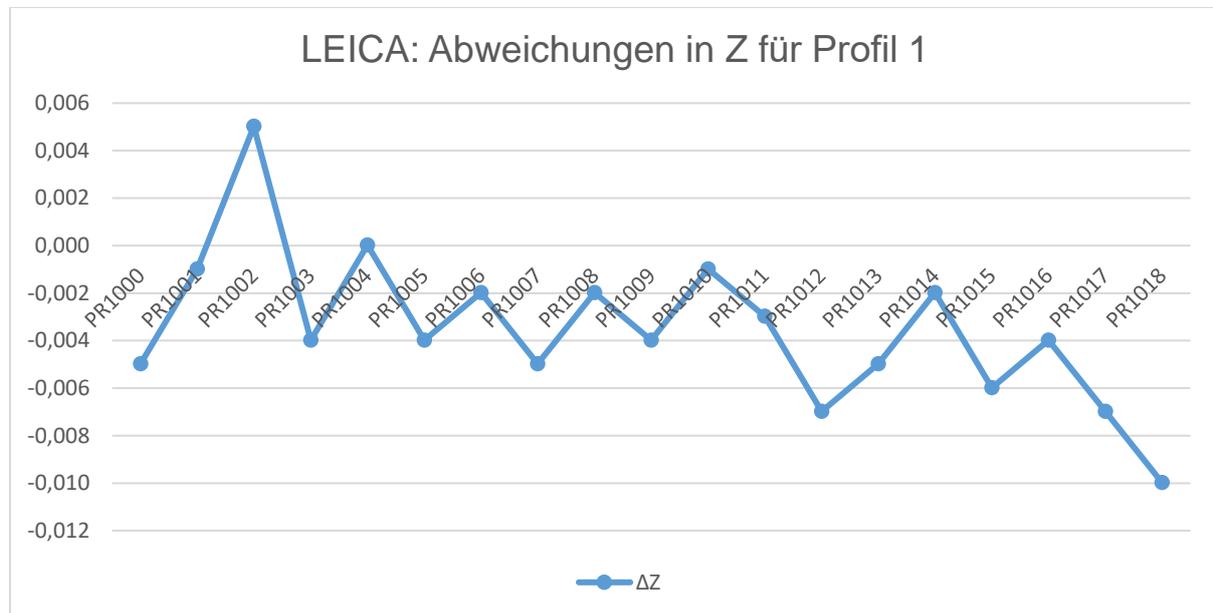
**Tabelle 34** - Genauigkeitsanalyse für Profil 7, Riegl MMS

Konfidenzintervall CI – 95%	$\Delta Z$ [m]	
<i>Mittel</i>	$\pm 0,002$	
<i>Stand.abweichung</i>	0,002	0,004

**Tabelle 35** - Konfidenzintervall von 95% für berechneten Parameter bei Profil 7, Riegl MMS

3.5.2.5 Leica – Querprofile

**Profil 1**



**Abbildung 31** - Abweichungen in Z Koordinate bei Profil 1, Leica MMS

Es wurden insgesamt 19 Kontrollpunkte gemessen und für die Analyse verwendet. Die Ergebnisse sind in Tabelle 36 und Tabelle 37 dargestellt:

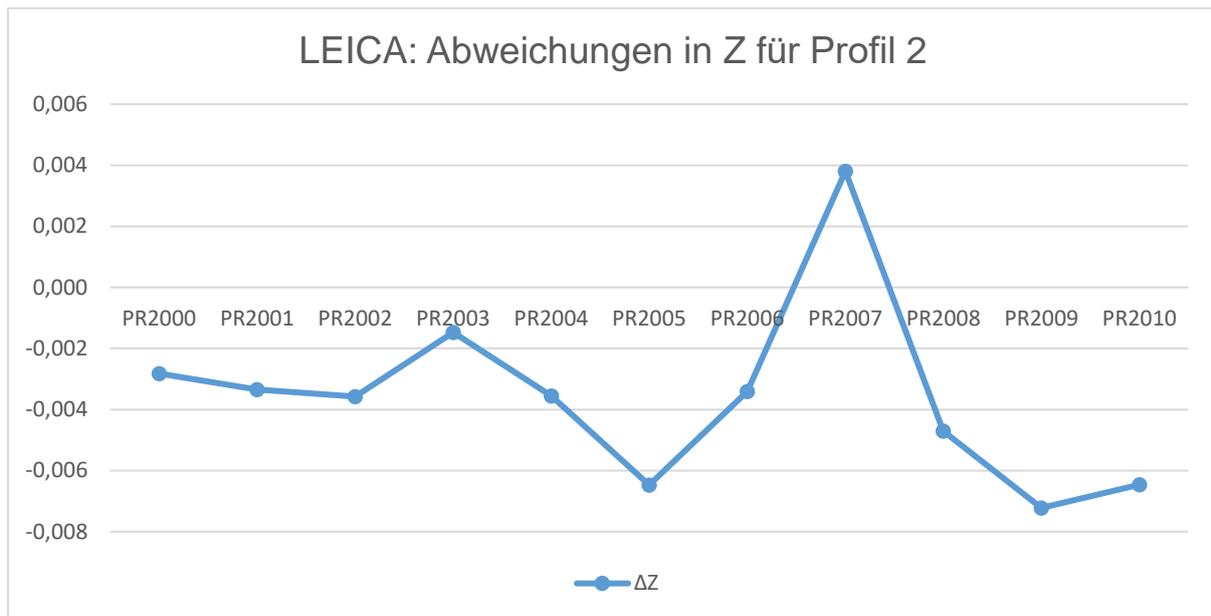
Genauigkeitsanalyse	ΔZ [m]
<i>Min</i>	-0,010
<i>Max</i>	0,005
<i>Mittel</i>	-0,004
<i>Stand.abweichung</i>	± 0,003

**Tabelle 36** - Genauigkeitsanalyse für Profil 1, Leica MMS

Konfidenzintervall CI – 95%	ΔZ [m]	
<i>Mittel</i>	± 0,002	
<i>Stand.abweichung</i>	0,002	0,005

**Tabelle 37** - Konfidenzintervall von 95% für berechneten Parameter bei Profil 1, Leica MMS

**Profil 2**



**Abbildung 32** - Abweichungen in Z Koordinate bei Profil 2, Leica MMS

Es wurden insgesamt 11 Kontrollpunkte gemessen und für die Analyse verwendet. Die Ergebnisse sind in Tabelle 38 und Tabelle 39 dargestellt:

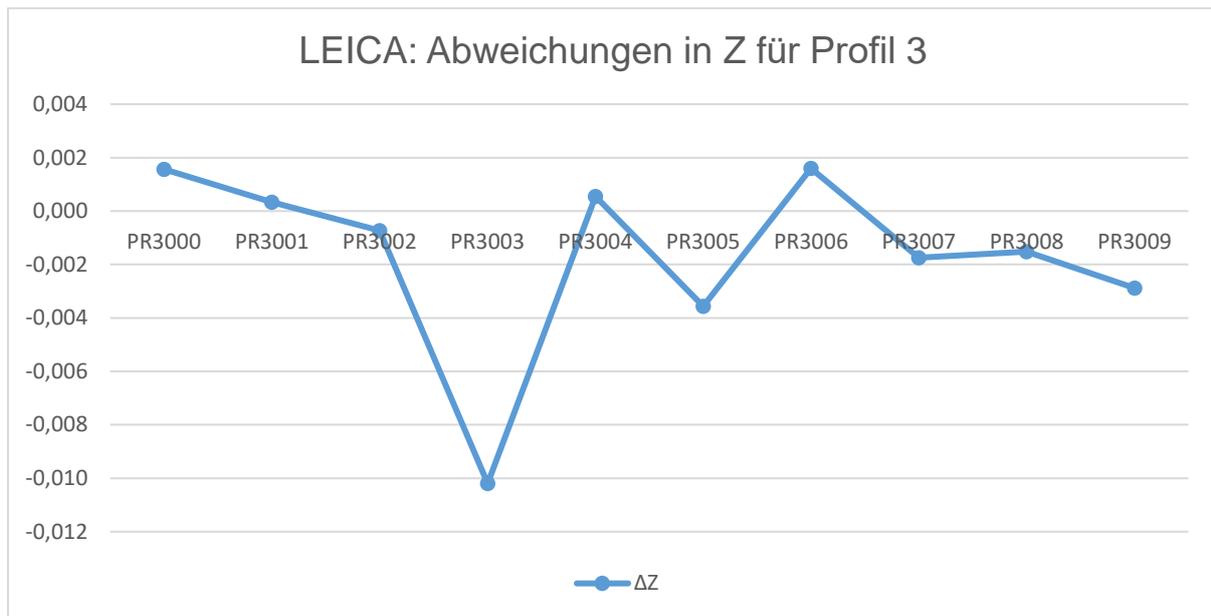
<b>Genauigkeitsanalyse</b>	<b>ΔZ [m]</b>
<i>Min</i>	-0,007
<i>Max</i>	0,004
<i>Mittel</i>	-0,004
<i>Stand.abweichung</i>	± 0,003

**Tabelle 38** - Genauigkeitsanalyse für Profil 2, Leica MMS

<b>Konfidenzintervall CI – 95%</b>	<b>ΔZ [m]</b>	
<i>Mittel</i>	± 0,002	
<i>Stand.abweichung</i>	0,002	0,005

**Tabelle 39** - Konfidenzintervall von 95% für berechneten Parameter bei Profil 2, Leica MMS

**Profil 3**



**Abbildung 33** - Abweichungen in Z Koordinate bei Profil 3, Leica MMS

Es wurden insgesamt 10 Kontrollpunkte gemessen und für die Analyse verwendet. Die Ergebnisse sind in Tabelle 40 und Tabelle 41 dargestellt:

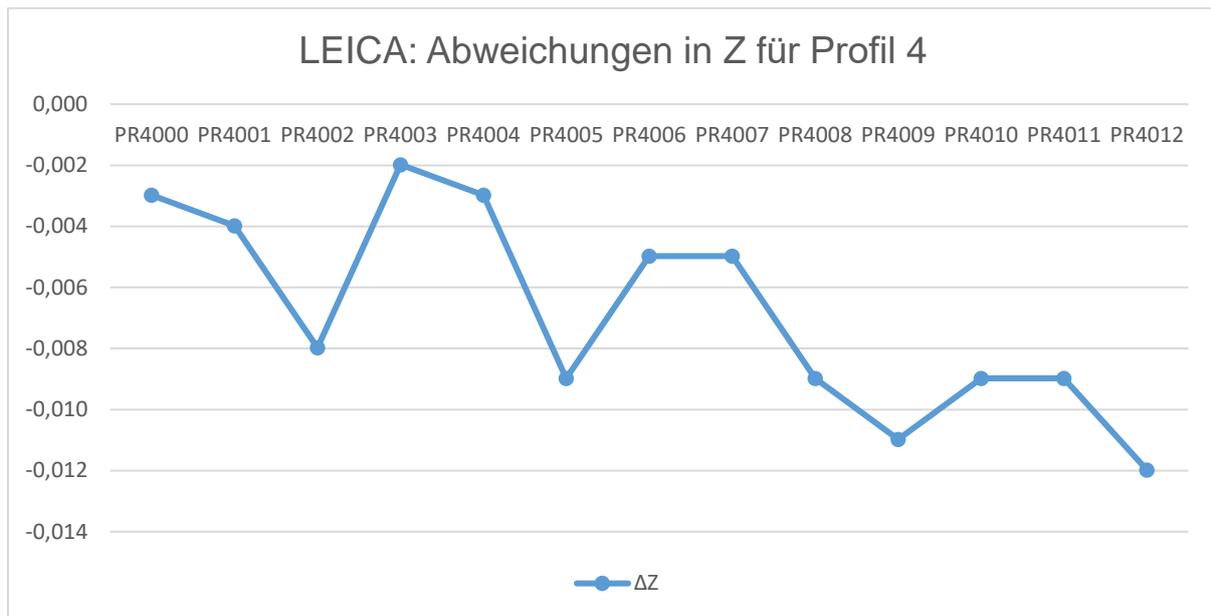
<b>Genauigkeitsanalyse</b>	<b>ΔZ [m]</b>
<i>Min</i>	-0,010
<i>Max</i>	0,002
<i>Mittel</i>	-0,002
<i>Stand.abweichung</i>	± 0,003

**Tabelle 40** - Genauigkeitsanalyse für Profil 3, Leica MMS

<b>Konfidenzintervall CI – 95%</b>	<b>ΔZ [m]</b>	
<i>Mittel</i>	± 0,002	
<i>Stand.abweichung</i>	0,002	0,006

**Tabelle 41** - Konfidenzintervall von 95% für berechneten Parameter bei Profil 3, Leica MMS

**Profil 4**



**Abbildung 34** - Abweichungen in Z Koordinate bei Profil 4, Leica MMS

Es wurden insgesamt 13 Kontrollpunkte gemessen und für die Analyse verwendet. Die Ergebnisse sind in Tabelle 42 und Tabelle 43 dargestellt:

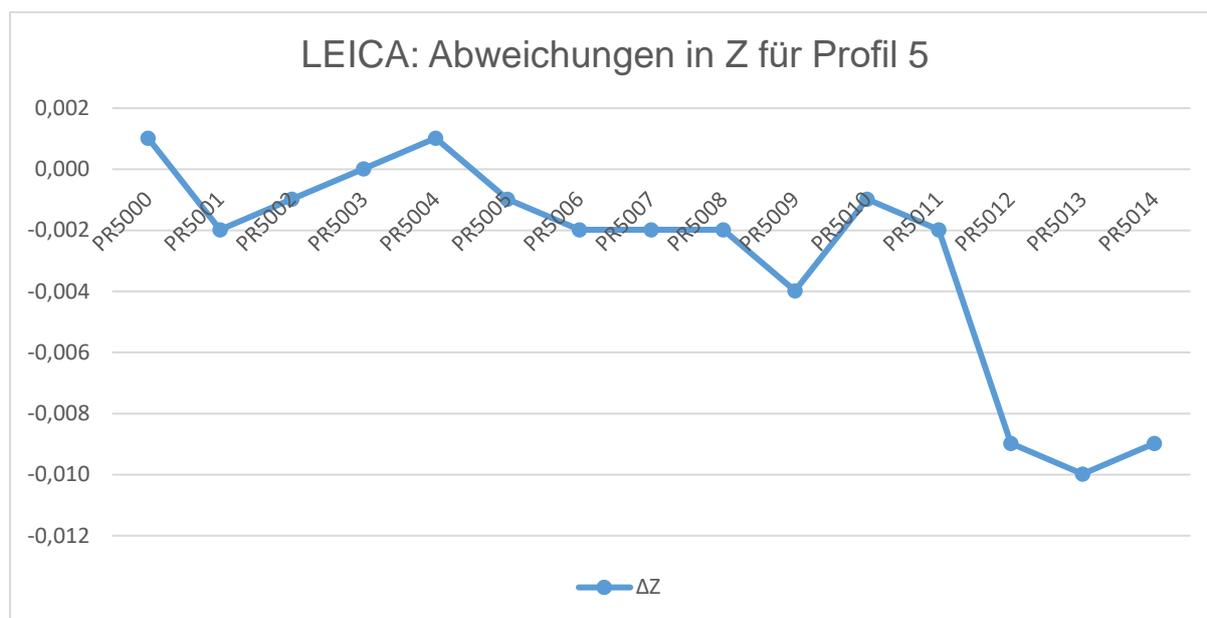
Genauigkeitsanalyse	ΔZ [m]
<i>Min</i>	-0,012
<i>Max</i>	-0,002
<i>Mittel</i>	-0,007
<i>Stand.abweichung</i>	± 0,003

**Tabelle 42** - Genauigkeitsanalyse für Profil 4, Leica MMS

Konfidenzintervall CI – 95%	ΔZ [m]	
<i>Mittel</i>	± 0,002	
<i>Stand.abweichung</i>	0,002	0,005

**Tabelle 43** - Konfidenzintervall von 95% für berechneten Parameter bei Profil 4, Leica MMS

**Profil 5**



**Abbildung 35 - Abweichungen in Z Koordinate bei Profil 5, Leica MMS**

Es wurden insgesamt 15 Kontrollpunkte gemessen und für die Analyse verwendet. Die Ergebnisse sind in Tabelle 44 und Tabelle 45 dargestellt:

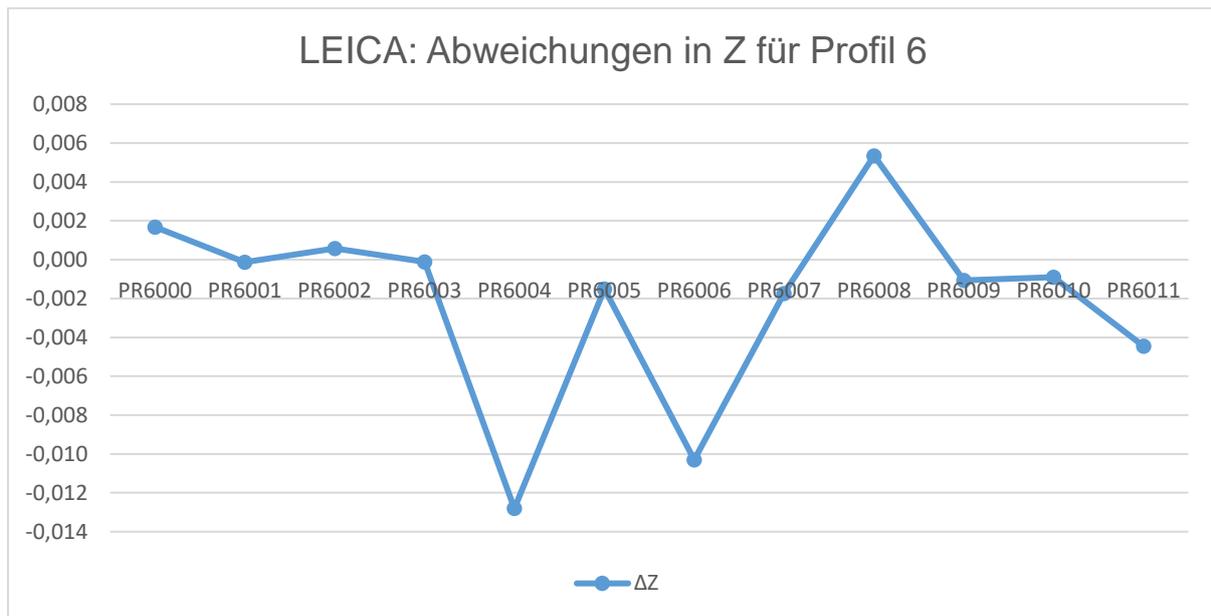
<b>Genauigkeitsanalyse</b>	<b>ΔZ [m]</b>
<i>Min</i>	-0,010
<i>Max</i>	0,001
<i>Mittel</i>	-0,003
<i>Stand.abweichung</i>	± 0,004

**Tabelle 44 - Genauigkeitsanalyse für Profil 5, Leica MMS**

<b>Konfidenzintervall CI – 95%</b>	<b>ΔZ [m]</b>	
<i>Mittel</i>	± 0,002	
<i>Stand.abweichung</i>	0,003	0,006

**Tabelle 45 - Konfidenzintervall von 95% für berechneten Parameter bei Profil 5, Leica MMS**

**Profil 6**



**Abbildung 36** - Abweichungen in Z Koordinate bei Profil 6, Leica MMS

Es wurden insgesamt 12 Kontrollpunkte gemessen und für die Analyse verwendet. Die Ergebnisse sind in Tabelle 46 und Tabelle 47 dargestellt:

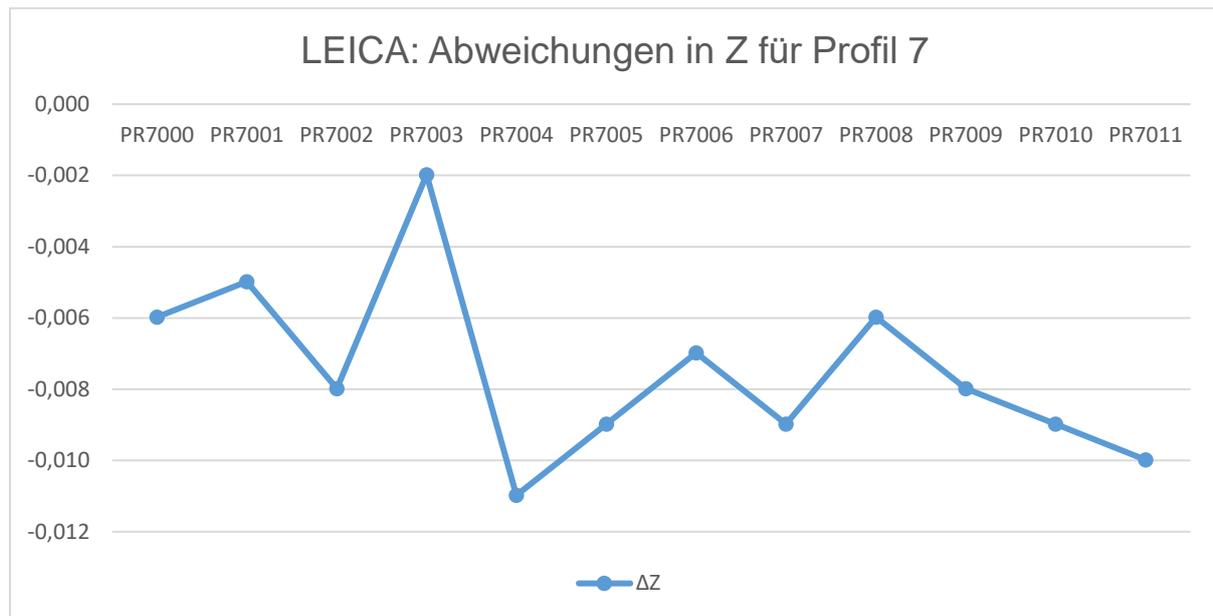
<b>Genauigkeitsanalyse</b>	<b>ΔZ [m]</b>
<i>Min</i>	-0,013
<i>Max</i>	0,005
<i>Mittel</i>	-0,002
<i>Stand.abweichung</i>	± 0,005

**Tabelle 46** - Genauigkeitsanalyse für Profil 6, Leica MMS

<b>Konfidenzintervall CI – 95%</b>	<b>ΔZ [m]</b>	
<i>Mittel</i>	± 0,003	
<i>Stand.abweichung</i>	0,004	0,008

**Tabelle 47** - Konfidenzintervall von 95% für berechneten Parameter bei Profil 6, Leica MMS

**Profil 7**



**Abbildung 37** - Abweichungen in Z Koordinate bei Profil 7, Leica MMS

Es wurden insgesamt 12 Kontrollpunkte gemessen und für die Analyse verwendet. Die Ergebnisse sind in Tabelle 48 und Tabelle 49 dargestellt:

Genauigkeitsanalyse	ΔZ [m]
<i>Min</i>	-0,011
<i>Max</i>	-0,002
<i>Mittel</i>	-0,007
<i>Stand.abweichung</i>	± 0,002

**Tabelle 48** - Genauigkeitsanalyse für Profil 7, Leica MMS

Konfidenzintervall CI – 95%	ΔZ [m]	
<i>Mittel</i>	± 0,002	
<i>Stand.abweichung</i>	0,002	0,004

**Tabelle 49** - Konfidenzintervall von 95% für berechneten Parameter bei Profil 7, Leica MMS

### 3.5.3 Genauigkeitsvergleich – Riegl vs. Leica

#### 3.5.3.1 Bodenmarkierung (Bereich: km 190,050 - km 193,650)

##### Track A

Vergleich	Riegl	Leica	Riegl	Leica	Riegl	Leica
	$\Delta X$ [m]		$\Delta Y$ [m]		$\Delta Z$ [m]	
<i>Min</i>	-0,034	-0,025	-0,026	-0,016	-0,054	-0,011
<i>Max</i>	0,024	0,045	0,079	0,033	0,032	0,012
<i>Mittel</i>	0,009	0,010	0,013	0,008	0,012	0,003
<i>Stand.abw.</i>	$\pm 0,012$	$\pm 0,012$	$\pm 0,018$	$\pm 0,010$	$\pm 0,016$	$\pm 0,004$

**Tabelle 50** - Genauigkeitsvergleich für Bodenmarkierung im Bereich: km 190,050 – km 193,650 für Track A, Riegl MMS vs. Leica MMS

##### Track B

Vergleich	Riegl	Leica	Riegl	Leica	Riegl	Leica
	$\Delta X$ [m]		$\Delta Y$ [m]		$\Delta Z$ [m]	
<i>Min</i>	-0,048	-0,051	-0,079	-0,046	-0,048	-0,010
<i>Max</i>	0,044	0,046	0,026	0,015	0,023	0,012
<i>Mittel</i>	0,014	0,010	0,020	0,009	0,011	0,004
<i>Stand.abw.</i>	$\pm 0,018$	$\pm 0,013$	$\pm 0,031$	$\pm 0,010$	$\pm 0,015$	$\pm 0,005$

**Tabelle 51** - Genauigkeitsvergleich für Bodenmarkierung im Bereich: km 190,050 – km 193,650 für Track A, Riegl MMS vs. Leica MMS

#### 3.5.3.2 Bodenmarkierung (Bereich: km 192,000 - km 193,600)

In diesem Bereich wurde nur für das Riegl-MMS eine neue Berechnung durchgeführt. Der Grund liegt in der Tatsache, dass nur in diesem Bereich Passpunkte für die Georeferenzierung verwendet wurden. Da das Leica-MMS im Bereich km 190,050 – km 193,650 die geforderte Genauigkeit sowohl in der Lage als auch in der Höhe erfüllt hat, wurde auf eine neue separate Berechnung im Bereich km 192,000 – km 193,600 verzichtet.

**Riegl - Track A vs. Track B**

Vergleich	Track A	Track B	Track A	Track B	Track A	Track B
	$\Delta X$ [m]		$\Delta Y$ [m]		$\Delta Z$ [m]	
<i>Min</i>	-0,031	-0,027	-0,026	-0,046	-0,015	-0,009
<i>Max</i>	0,024	0,044	0,062	0,011	0,015	0,016
<i>Mittel</i>	0,009	0,012	0,013	0,011	0,005	0,005
<i>Stand.abw.</i>	$\pm 0,012$	$\pm 0,016$	$\pm 0,017$	$\pm 0,015$	$\pm 0,007$	$\pm 0,006$

**Tabelle 52** - Genauigkeitsvergleich für Bodenmarkierung im Bereich: km 192,000 – km 193,600 zwischen beide Tracks bei Riegl MMS

3.5.3.3 Querprofile

Vergleich	Riegl	Leica	Riegl	Leica	Riegl	Leica
	Profil 1		Profil 2		Profil 3	
<i>Min</i>	-0,002	-0,010	-0,004	-0,007	-0,001	-0,010
<i>Max</i>	0,005	0,005	0,005	0,004	0,003	0,002
<i>Mittel</i>	0,001	-0,004	0,000	-0,004	0,001	-0,002
<i>Stand.abw.</i>	$\pm 0,002$	$\pm 0,003$	$\pm 0,003$	$\pm 0,003$	$\pm 0,001$	$\pm 0,003$

Vergleich	Riegl	Leica	Riegl	Leica	Riegl	Leica
	Profil 4		Profil 5		Profil 6	
<i>Min</i>	-0,003	-0,012	-0,002	-0,010	-0,003	-0,013
<i>Max</i>	0,002	-0,002	0,006	0,001	0,005	0,005
<i>Mittel</i>	0,000	-0,007	0,001	-0,003	0,001	-0,002
<i>Stand.abw.</i>	$\pm 0,001$	$\pm 0,003$	$\pm 0,003$	$\pm 0,004$	$\pm 0,003$	$\pm 0,005$

Vergleich	Riegl	Leica
	Profil 7	
<i>Min</i>	-0,003	-0,011
<i>Max</i>	0,005	-0,002
<i>Mittel</i>	0,001	-0,007
<i>Stand.abw.</i>	$\pm 0,002$	$\pm 0,002$

**Tabelle 53** - Genauigkeitsvergleich für Querprofile im Bereich: km 190,050 – km 193,650, Riegl vs. Leica

### 3.5.3.4 Diskussion der Ergebnisse

Betrachtet man die Ergebnisse der Genauigkeitsabschätzung des Riegl-MMS im Bereich km 190,050 – km 193,650, so kann man feststellen, dass sich die Z- und X-Komponenten sehr ähnlich sind. Im Gegensatz dazu, im Track B, steht die Y Komponente, welche sich deutlich unterscheidet. Demnach stellt sich die Frage, ob Ausreißer für eine Verfälschung der Y-Komponente verantwortlich sind. Ein darauffolgender Ausreißertest mit der Elimination derselben führte nach einer erneuten Berechnung zum Schluss, dass die Ausreißer nicht für die Verfälschung der Y-Komponente verantwortlich sind. Aus diesem Grund wurde dieser Ausreißertest in dieser Arbeit nicht dargestellt, sondern die primär berechneten Werte verwendet.

Weiters kann bei Betrachtung der Standardabweichungen und ihrer Konfidenzintervalle in Position und Höhe darauf geschlossen werden, dass das Riegl-MMS die erforderliche Genauigkeit in der Position, jedoch nicht in der Höhe erreicht. Die geforderte Positionsgenauigkeit betrug  $\pm 3$  cm und in der Höhe  $\pm 1$  cm ( $1\sigma$ ).

Da für das Riegl-MMS nur im Bereich km 192,000 – 193,600 Passpunkte für die Georeferenzierung verwendet wurden, wurde eine getrennte Analyse im diesem Bereich durchgeführt. Damit liegen die Standardabweichungen jetzt im eingeschränkten Bereich bei  $\pm 7$ mm bzw.  $\pm 6$ mm (Track A bzw. B), sowie im gesamten Testbereich bei  $\pm 16$ mm.

Die Standardabweichung  $\pm 1$ cm wurde im eingeschränkten Bereich erreicht, trotz teilweise recht großer Passpunktabstände. Außerhalb des Bereichs mit Passpunkten ist allerdings spätestens nach  $\sim 300$ m ein deutlicher Anstieg der Klaffen zu sehen (bis zu 5cm).

Durch die Berechnung wurden beim Riegl-MMS fünf Punkte als Ausreißer detektiert. Nachfolgend wurden diese Punkte in der Software CloudCompare kontrolliert. Da CloudCompare keine exakte Lagebestimmung zulässt, wurden nur die Höhen kontrolliert. In unmittelbarer Nähe der Referenzpunkte wurden zehn Punkte entlang der Scanlinien gemessen und dann das arithmetische Mittel berechnet (nur für die Höhen). Die Punkte mit geänderter Höhe sind:

1. STL-A-93
2. STL-B-153
3. NP-B-TB-17
4. NP-B-TB-27
5. STL-B-159

Der Grund für die fehlerhaften Messungen kann auf die „unsaubere“ Punktwolke zurückgeführt werden (Skyability hat die Befahrung ohne Begleitschutz durchgeführt). Dadurch entstanden viele Abschattungen durch Autos und Löcher im Datensatz. Es ist durchaus möglich, dass während der Messung von Kontrollpunkten in der Software Orbit, einer von diesen Punkten verwendet wurde.

Für das Leica-MMS erfüllen die ermittelten Standardabweichungen und ihre Konfidenzintervalle die erforderliche Genauigkeit sowohl in Position als auch in Höhe.

Bei der Profiluntersuchung wurden nur Punkte, welche entlang der Querprofile und an der horizontalen Oberfläche des Asphalts liegen, verwendet. In Kapitel 3.5.1 werden Art und Grund einer solchen Messung erläutert.

Vergleicht man die Ergebnisse beider Systeme bei dieser Untersuchung, so ist ersichtlich, dass das Riegl-MMS bei den Querprofilen bessere Ergebnisse bzw. niedrigere Standardabweichungen als das Leica-MMS geliefert hat.

Die Begründung liegt in der Art und Weise der indirekten Georeferenzierung. Wie in Kapitel 3.4.2 erläutert, verwendete Skyability nicht dieselben Passpunkte wie JOANNEUM RESEARCH bei der Georeferenzierung des Leica-MMS. Es wurden jeweils drei Punkte pro Querprofil als Passpunkte für die Georeferenzierung verwendet. Anhand dieser Tatsache ist zu erwarten, dass in diesen Bereichen geringe Abweichungen auftreten. Somit konnten die Querprofile nicht wie geplant zur Genauigkeitsabschätzung des Riegl-MMS verwendet werden.

Das Leica-MMS erfüllt auch in diesem Fall die geforderte Genauigkeit.

Durch Wegfall der Kontrollpunkte der Querprofile für die Genauigkeitsanalyse wird die Untersuchung, ob das Riegl-MMS die geforderte Genauigkeit erfüllen kann, erschwert. Der eingeschränkte Bereich hat aber bei Analyse der als Kontrollpunkte verwendeten Bodenmarkierungen gezeigt, dass trotz großer Passpunktabstände das Riegl-MMS die geforderte Genauigkeit erfüllt. Ein direkter Vergleich der beiden Systeme wie ursprünglich vorgesehen ist mit dem vorliegenden Datenmaterial leider nicht möglich.

### 3.5.4 Punktdichte und Intensität– Riegl vs. Leica

Zusätzlich zur Genauigkeitsabschätzung beider Systeme wurde ein Vergleich der Punktdichte in den Punktwolken beider Systeme und ihrer Intensitäten durchgeführt.

#### 3.5.4.1 Punktdichte

<b>Oberfläche</b>	<b>Riegl</b>	<b>Leica</b>
1 m <sup>2</sup>	507	1047
1345,17 m <sup>2</sup>	2 110 093	2 281 833
3708,35 m <sup>2</sup>	4 929 456	6 188 150

**Tabelle 54** - Punktdichte bei verschiedenen Oberflächen

Für diesen Vergleich wurde die Oberfläche des rechten Fahrstreifens verwendet, wo keine Lücken in den Punktwolken beider Systeme waren. Es wurden drei Größen genommen, wie in Tabelle 54 beschrieben. Danach wurden diese Teile der Punktwolke ausgeschnitten und alle Punkte, die sich innerhalb des gegebenen Bereichs befanden, aufgezählt. Das Ergebnis ist ebenfalls in Tabelle 54 gezeigt.

Basierend auf diesen Ergebnissen können unterschiedliche Punktdichten beider Systeme und innerhalb eines Systems auf unterschiedlichen Oberflächen beobachtet werden (sie haben keine konstante Dichte).

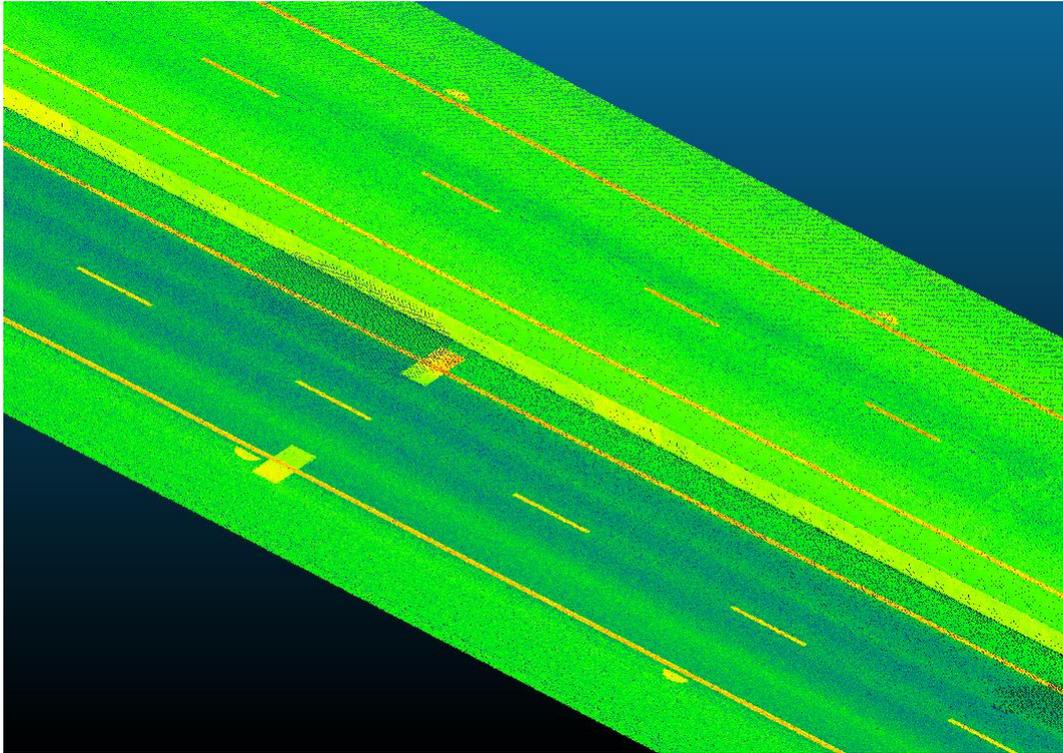
Der Grund für die unterschiedliche Dichte ist hauptsächlich die Lage relativ zur Trajektorie bzw. eine unterschiedlich eingestellte Rotationsfrequenz beider Systeme. Damit erhält man unterschiedliche Abstände der Scanlinien auf der Fläche. Natürlich sinkt auch die Dichte der Punkte innerhalb der Scanlinie mit dem Objektabstand.

Des Weiteren spielt die Anzahl der im System verwendeten Laserscanner und die Anzahl der Fahrten eine Rolle. Riegl war mit einem und Leica mit zwei Scannern ausgestattet. Aus diesem Grund wurde mit Riegl die gleiche Strecke zwei Mal und mit Leica einmal abgefahren.

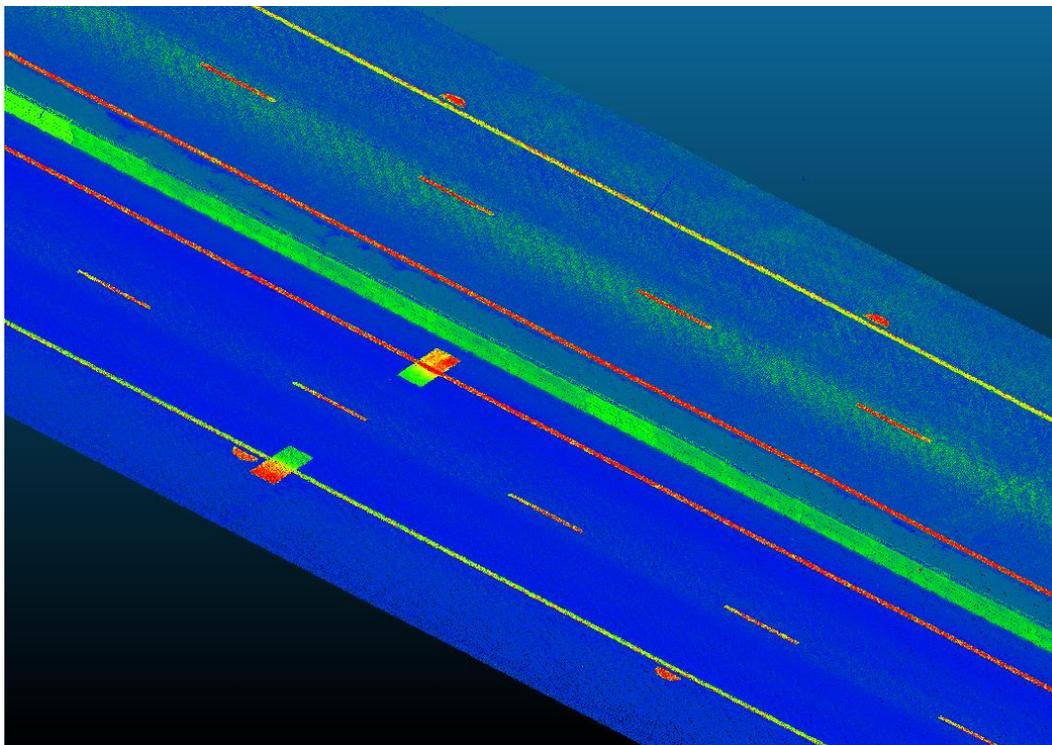
#### 3.5.4.2 Intensität

(Schill, 2018) beschreibt die Intensität wie folgt: „Zusätzlich zu der gemessenen Distanz wird auch ein Intensitätswert für jeden Messpunkt bestimmt. Dieser stellt ein Maß für den Anteil der rückgestrahlten Energie des Laserstrahls dar. Grundsätzlich nimmt die Energie quadratisch mit der Entfernung ab. Darüber hinaus existieren jedoch noch weitere Einflüsse, die die Intensität verringern, wie beispielsweise die Dämpfung aufgrund der Atmosphäre, schräge Auftreffwinkel auf dem Messobjekt, die Oberflächenbeschaffenheit und -farbe des Messobjektes. Der Intensitätswert ist somit nicht nur von der Entfernung, sondern auch von allen auf den Messprozess einwirkenden äußeren Größen abhängig. Inwiefern sich der Intensitätswert aufgrund der einwirkenden äußeren Größen verändert, hängt auch von dem eingesetzten Laser und seiner Wellenlänge ab.“

Die Abbildung 38 und Abbildung 39 zeigen deutliche Unterschiede, hauptsächlich in der farblichen Codierung, zwischen den Intensitäten beim Riegl MMS und den Leica MMS.

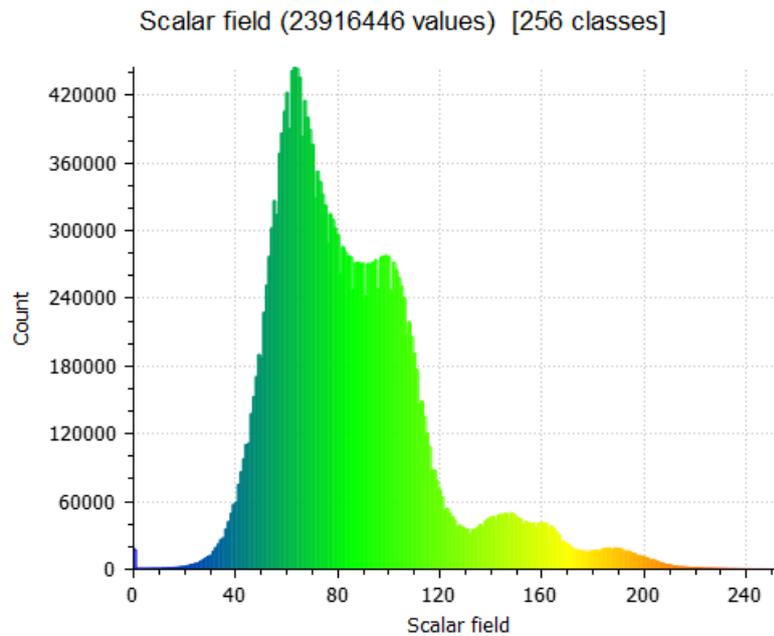


**Abbildung 38** - Intensität bei der Riegl Punktwolke

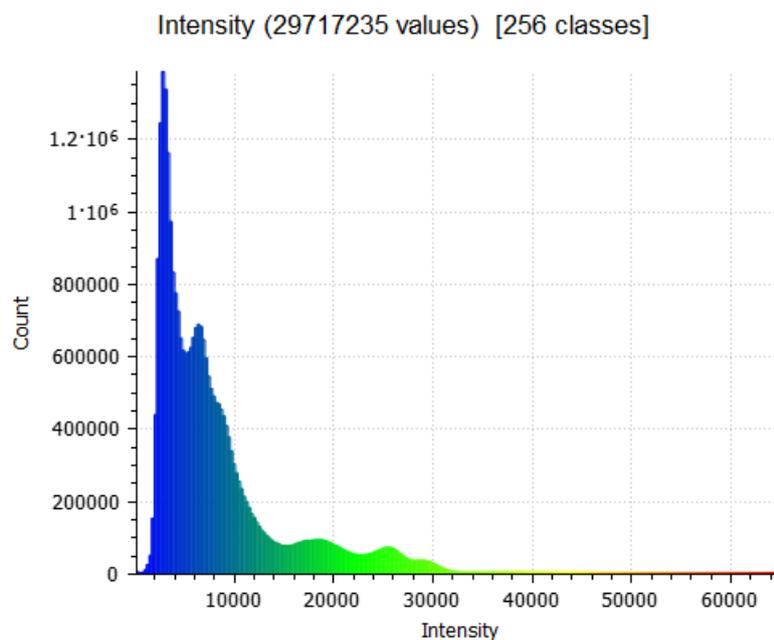


**Abbildung 39** - Intensität bei der Pegasus Punktwolke

Aus diesem Grund wurden die Histogramme für beide Punktwolken mithilfe von CloudCompare berechnet, siehe Abbildung 40 und Abbildung 41.



**Abbildung 40** - Histogramm bei Riegl MMS Punktwolke



**Abbildung 41** - Histogramm bei Leica MMS Punktwolke

Die beiden Histogramme zeigen die Unterschiede in den radiometrischen Auflösungen beider Systeme, d.h. in der Leica Punktwolke ist mehr radiometrische Information enthalten, die bei den Messungen von Kontrollpunkten hilfreich waren (bessere Erkennung von Eckpunkten bei Nebelpunkten). Alle Informationen sind in den ersten ~30000 Grauwerten enthalten, der Bereich ganz rechts enthält nur die übersteuerten Messwerte bei stark reflektierenden Objekten.

## 4 Schlussfolgerungen

Mit Mobile-Mapping-Systemen sind in letzter Zeit neue Möglichkeiten in der geodätischen Welt entstanden. In einigen Bereichen konnten mit dieser Technologie die herkömmlichen Messmethoden ersetzt werden.

Vor diesem Hintergrund besteht die Aufgabe dieser Arbeit, die Genauigkeiten von zwei, auf dem Markt verfügbaren Systemen zu analysieren und festzustellen, ob diese beiden Systeme die Genauigkeitsanforderungen für den Straßenbau erfüllen können.

Wie im Kapitel 3.2 beschrieben bestehen die wesentlichen Unterschiede zwischen dem MMS von Leica und dem MMS von Riegl zunächst in ihren technischen Spezifikationen. Beim MMS von Leica sind die Sensoren im System integriert, wohingegen bei Riegl einige Sensoren flexibel und modular sind. Ein Beispiel hierfür sind die LiDAR-Sensoren (Laserscanner). Leica verwendet den Laserscanner **Z+F LIDAR Profiler 9012**, welcher im System mit der Möglichkeit der Anwendung von noch einem weiteren Laserscanner, **integriert** ist. Riegl verwendet nur einen LiDAR Sensor des Typs **VUX-1UAV**, welcher **flexibel bzw. vielseitig einsetzbar ist**. Das bedeutet, dieser Sensor sowohl auf dem Messfahrzeug als auch auf einer anderen Plattform montiert und verwendet werden kann (z.B. für ALS).

Werden die Unterschiede zwischen den LiDAR-Sensoren im Detail betrachtet, so wird ersichtlich, dass beim VUX-1UAV die **Laufzeitmessung** und beim Profiler 9012 die **Phasenmessung** als Messmethode verwendet wird. Darüber hinaus zeigt sich auch ein Unterschied in der Genauigkeit. VUX-1UAV kann, laut technischen Spezifikationen, eine Punktwolke mit **+/- 5 mm** und der Profiler 9012 mit **+/- 0,2 – 3,1 mm** Präzision erzeugen (abhängig von der Entfernung 10 - 50 m und Reflektivität der Oberfläche).

Weitere technische Unterschiede zwischen diesen beiden Systemen liegen in der eingebauten IMU, und hier hauptsächlich in ihrer Genauigkeit. Laut technischer Spezifikationen der IMU im Leica-System, ist diese **um den Faktor 3 genauer**, als die IMU im System von Riegl. Grundsätzlich können aber beide Systeme eine Punktwolke mit hoher innerer (relativer) Genauigkeit erzeugen, unter der Voraussetzung, einer sorgfältigen Kalibrierung (Kapitel 1.3).

Ein großer Vorteil von Mobile-Mapping-Systemen ist die Möglichkeit direkter Georeferenzierung, also die direkte Messung von Position und Orientierung des Systems mittels integrierter Navigation ohne die Verwendung von Passinformationen. Anhand der Herstellerangaben können unter speziellen Voraussetzungen (wie z.B. konstante GNSS-Abdeckung), beide Systeme eine Genauigkeit von maximal  $\pm 2$  cm in der Lage und  $\pm 2$  cm in der Höhe mittels direkter Georeferenzierung erreichen.

Beide Systeme können daher die ASFINAG Genauigkeitsanforderungen (Lage von  $\pm 3$  cm, Höhe  $\pm 1$  cm) mittels direkter Georeferenzierung nicht erreichen.

Wie aber durch diese Arbeit gezeigt wurde können die Genauigkeitsanforderungen mittels sehr sorgfältiger indirekter Georeferenzierung, d.h. mittels externer Passinformationen, für beide Systeme durchaus erreicht werden, also auch für das von der Grundgenauigkeit schlechtere Riegl-System.

Passinformationen spielen eine wichtige und entscheidende Rolle bei der indirekten Georeferenzierung und der Genauigkeitsanalyse der prozessierten Daten. Es soll daher im Rückblick nochmals kurz auf dieses Thema eingegangen werden. Passinformationen liefern Informationen von außen (unabhängig von den Messdaten) über die richtige absolute Lage. Es gibt verschiedene Möglichkeiten, wie Passinformationen eingebracht werden können. Dies kann durch Höhenpasspunkte, Lagepasspunkte, Vollpasspunkte oder Passflächen geschehen. Für dieses Projekt wurden sowohl Passpunkte als auch Passflächen als Passinformation verwendet.

Es stellt sich noch die Frage, wie genau die Passpunkte eingemessen sein müssen. Aus wissenschaftlicher Sicht müssen die Passpunkte um den Faktor 10 genauer sein als es die Anforderung verlangt. Im Falle dieser Masterarbeit bedeutet das, dass die Passpunkte mit einer Genauigkeit von  $\pm 1$  mm in der Höhe gemessen sein sollten.

Aus wirtschaftlicher Sicht verursacht diese ideale Vorstellung einen sehr großen Aufwand. Um diese Genauigkeit von  $\pm 1$  mm zu erreichen, müsste man die Passpunkte nivellieren. Diese Arbeit ist sehr zeit- und kostenintensiv. Aus diesem Grund wird ein Kompromiss zwischen Genauigkeit und Wirtschaftlichkeit angestrebt. Als Empfehlung hierfür kann der Faktor 3 angegeben werden. Für Projekte im Straßenbau bedeutet dies, dass die Passpunkte mit einer Genauigkeit von mindestens  $\pm 1$  cm in der Lage und  $\pm 3$  mm in der Höhe eingemessen werden sollten.

Voraussetzung ist ein jedenfalls ein hochgenaues Grundlagennetz, von dem aus die einzelnen Pass- und Kontrollpunkte abgeleitet werden. Es gilt, sehr lange Visuren zu vermeiden und Punkte möglichst von zwei Standpunkten aus zu vermessen. Dies führt zu einer leichteren Einschätzung grober Fehler und leichter Elimination derselben. Die Genauigkeit der Passpunkte ist somit von großer Relevanz, da nur durch sie definiert wird, welche Genauigkeit die Punktwolke am Ende besitzt. Fehlerhafte bzw. zu ungenau eingemessene Passpunkte können die Punktwolke unbemerkt deformieren und so unter Umständen die absolute Lage im Vergleich zur direkten Georeferenzierung sogar verschlechtern.

Neben der Genauigkeit der Passpunkte nimmt die Verteilung der Punkte eine wichtige Rolle ein. Diese Problematik wurde jedoch in dieser Arbeit nicht explizit untersucht. Anhand der durchgeführten Berechnungen und Analysen kann aber teilweise abgeschätzt werden, wie Passpunkte optimal verteilt sein sollten.

Zur Georeferenzierung der Scans der beiden Systeme wurden ja Passpunkte mit unterschiedlichen Abständen verwendet. Von JOANNEUM RESEARCH wurde beim Leica-System im Durchschnitt alle 50 m ein Passpunkt verwendet und die geforderte Genauigkeit damit nachweislich erreicht. Von Skyability wurden beim Riegl-Scanner Passflächen mit einem Abstand von teilweise 150 m oder sogar mehr verwendet. Hierbei hat sich jedoch gezeigt, dass die Genauigkeit weitestgehend erhalten wird.

Wie im Kapitel 3.5.3.4 beschrieben, steigen die Klaffen (und somit auch die Standardabweichungen) aber nach ca. 300m außerhalb des eingeschränkten Bereichs schnell auf bis zu 5 cm an. Da diese Problematik nicht streng untersucht wurde, kann jedoch keine definitive Aussage getätigt werden.

Da bei Mobile-Mapping-Systemen viele verschiedene Koordinatentransformationen (vom Sensorkoordinatensystem bis zum Anwenderkoordinatensystem) stattfinden, kommt es

immer zu Restungenauigkeiten der transformierten Daten. Jede separate Transformation verursacht einen kleinen Fehler. Um prüfen zu können, wie hoch diese Fehler am Ende sind, kommen Kontrollpunkte zum Einsatz.

Nicht nur bei den Passpunkten ist die Verteilung wichtig, sondern auch bei den Kontrollpunkten. Die Kontrollpunkte sollten nicht in unmittelbarer Nähe der Passpunkte liegen und sollten wie die Passpunkte gut messbar sein. Es gibt aber keine eindeutige Antwort auf die Frage, wie viele Kontrollpunkte ausreichend sind, um eine Genauigkeitsabschätzung oder Genauigkeitsüberprüfung durchführen zu können. Eine allgemeine Antwort auf diese Frage lautet: je mehr wir unserer Georeferenzierung vertrauen, desto weniger Kontrollpunkte werden benötigt. Für spezielle wissenschaftliche Fragestellungen kann es also durchaus sinnvoll sein eine extrem hohe Kontrollpunktdichte zu verwenden.

Auch die eingesetzte Messmethode spielt eine große Rolle. Für das Leica-MMS wurden ausschließlich Lage – und Höhenpasspunkte auf der Fahrbahn (seitlich am Pannestreifen) verwendet. Dazu wurde hauptsächlich die automatisierte Einmessung der Passpunkte im Scan mittels Template durchgeführt. In Bereichen, wo kein Template verwendet werden konnte, wurden Passpunkte manuell eingemessen.

Im Vergleich dazu wurde beim Riegl-MMS keine Einzelpunktmessung durchgeführt. Hierbei wurden ausschließlich horizontale und vertikale Passflächen verwendet. Somit wurde das Problem der eindeutigen Punktidentifizierung in den Scandaten umgangen. Die Software führt eine automatische Zuordnung von Punkten der vermessenen Passfläche zu den Punkten in der Punktwolke durch. Die Passflächen müssen dazu unterschiedlich (horizontal und vertikal) orientiert sein und räumlich gut verteilt sein, damit eine robuste Lagerung stattfinden kann.

Die automatische Erkennung und Messung von Passpunkten in den Scandaten kann die Ungenauigkeit der Messung einzelner Passpunkte in der Punktwolke stark verringern. Im Vergleich zur manuellen Messung kann es hier zu keinen, vom Menschen verursachten Fehlern kommen. Die Verwendung von hundert Einzelmessungen reduziert statistisch gesehen den Messfehler um den Faktor 10. Die Möglichkeit einer automatischen Messung kann also neben der Effizienzsteigerung maßgeblich die Qualität der Georeferenzierung erhöhen.

Neben der sorgfältigen Passpunktmessung spielt auch ein tieferes Verständnis im Bezug auf den gesamten Ablauf der Datenprozessierung eine sehr wichtige Rolle. So bieten die unterschiedlichen Softwarepakete unterschiedlicher Hersteller verschiedene Methoden der indirekten Georeferenzierung an. Es gibt z.B. Methoden, welche die Passpunkte als fehlerfrei annehmen und Methoden, welche die Fehler in den Passpunkten berücksichtigen. Letztere modifizieren meist die Trajektorie im Sinne einer bestmöglichen Schätzung unter Einbeziehung der Passinformation, während erstere oft nur eine mehr oder weniger „sanfte“ Deformation der Punktwolke durchführen, um die Abweichungen in den Passpunkten zu eliminieren.

Aus diesem Grund ist das Verständnis für den genauen Ablauf und die richtige Durchführung sehr wichtig, da für eine abschließende Ergebnisinterpretation genau bekannt sein muss, welche Methode der Georeferenzierung angewendet wurde und wie sie überprüft wurde.

Neben den Genauigkeitsuntersuchungen sind in Kapitel 3.5.4.1 auch die Ergebnisse der Punktdichteuntersuchung dargestellt. Es hat sich gezeigt, dass beide Systeme etwas unterschiedliche Punktdichten erzeugen (Leica besitzt eine höhere Dichte als das Riegl-MMS). Das liegt natürlich in den unterschiedlichen Messraten beider Systeme und in der Anzahl der verwendeten Laserscanner (Leica wurde mit zwei Laserscannern, Riegl mit einem Scanner ausgestattet). Damit das Riegl-System möglichst eine gleiche Punktdichte wie Leica mit zwei Scannern hat, muss dieselbe Strecke zweimal befahren werden.

Eine Vollständigkeit hinsichtlich der Abdeckung kann nur erreicht werden, in dem ein Begleitschutz während der Aufnahme organisiert wird. Der Begleitschutz ist zudem sehr wichtig, um eine saubere Punktwolke zu bekommen. Der Aufwand zur Bereinigung von Punktwolken (z.B. Lücken durch andere Autos) ist sehr groß.

Beide Mobile-Mapping-Systeme konnten den Korridor zwischen zwei Lärmschutzwänden (Lärmschutzwand, Böschung, Pannestreifen, Fahrbahn, Betonleitwand, Brücken, Mautstellen, etc.) sehr gut erfassen. Sollen auch größere Bereiche neben der Autobahn aufgenommen werden, muss die Aufnahme z.B. durch ALS ergänzt werden (z.B. Lärmschutzanalyse, Geländemodell, etc.).

Für die Erstellung von Planungsunterlagen für Straßenbauprojekten reichen Punktdichte und Vollständigkeit dieser Systeme aus. Im Falle, dass ein BIM-Modell erstellt werden soll, sind MMS aber nur beschränkt einsetzbar. Diese Beschränkung hängt vom geforderten LOD (Level of Detail) für das BIM-Modell ab. Wenn z.B. ein BIM-Modell von einer Brücke mit großem LOD erstellt werden soll, können MMS unter Umständen keine ausreichende Vollständigkeit bzw. Detailgrad bieten. In diesen Fällen sollten MMS-Daten durch TLS ergänzt werden.

Abschließend kann nochmals gesagt werden, dass aufgrund der in Kapitel 3.5.3 dargestellten Unterschiede bei der Georeferenzierung ein direkter Vergleich der beiden Systeme nur eingeschränkt möglich war. Diese haben auf der anderen Seite aber zu einem tieferen Verständnis der Materie geführt. Unter Berücksichtigung aller oben dargestellter Erkenntnisse kann somit festgestellt werden, dass auf Basis der Ergebnisse von Kapitel 3.5.3 sowohl das Leica-MMS als auch das Riegl-MMS die Anforderungen für Straßenbauprojekte zur Gänze erfüllen.

## 5 Literaturverzeichnis

- Beyer, J., & Wigger, B. (2001). *Grundlagen der Navigation und Anwendungen I+II*. Darmstadt: Technische Universität Darmstadt.
- Dudek, G., & Jenkin, M. (2008). Inertial Sensors, GPS and Odometry. In B. Siciliano, & O. Khatib, *Handbook of Robotics* (S. 477-490). Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.
- Frankić, K. (2010). *Metoda najmanjih kvadrata u geodeziji*. Sarajevo: Građevinski fakultet Univerziteta u Sarajevu .
- Gao, Y., Zhang, Y., & Chen, K. (2006). Development of a Real-Time Single-Frequency Precise Point Positioning System and Road Test Results. *Proceedings of the 19th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS 2006)*, (S. 2297-2303).
- Glira, P. (2012). *Direkte Georeferenzierung von Bildern eines unbemannten Luftfahrzeuges mit LowCost- Sensoren*. Wien: TU Wien.
- Gordon, B. (2008). *Zur Bestimmung von Messunsicherheiten terrestrischer Laserscanner* (Bd. Dissertation). Technische Universität Darmstadt.
- Gottwald, R., Heister, H., & Staiger, R. (2009). Zur Prüfung und Kalibrierung von terrestrischen Laserscannern - eine Standortbestimmung. *ZFV - Fachbeitrag*, 88-96.
- Gräfe, G. (2017). *Kinematische Anwendungen von Laserscannern im Straßenraum*. München: Universität der Bundeswehr München.
- Gräfe, G., Caspary, W., Heister, H., Klemm, J., & Sever, M. (2001). *The road data acquisition system MoSES- determination and accuracy of trajectory data gained with the Applanix POS/LV*. Cairo, Egypt: 3rd International Symposium on Mobile Mapping Technology.
- Haala, N., Peter, M., Kremer, J., & Hunter, G. (2008). Mobile Lidar Mapping for 3D Point Cloud Collection in Urban Areas - A Performance Test. In *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*.
- Heinz, E., Eling, C., Wieland, M., Klingbeil, L., & Kuhlmann, H. (2017). Analysis of different reference plane setups for the calibration of a mobile laser scanning system. In W. Lienhart (Hrsg.), *Ingenieurvermessung 17. Beiträge zum 18. Internationalen Ingenieurvermessungskurs Graz* (S. 131-145). Berlin/Offenbach: Wichmann.
- Heinz, E., Klingbell, L., & Kuhlmann, H. (2020). *Aufbau einer Einrichtung zur Kalibrierung und Evaluierung von Mobile-Mapping-Systemen*. Von Research Gate: [https://www.researchgate.net/publication/339799898\\_Aufbau\\_einer\\_Einrichtung\\_zur\\_Kalibrierung\\_und\\_Evaluierung\\_von\\_Mobile-Mapping-Systemen](https://www.researchgate.net/publication/339799898_Aufbau_einer_Einrichtung_zur_Kalibrierung_und_Evaluierung_von_Mobile-Mapping-Systemen) Abgerufen am 05.05.2020
- Hofmann, S. (2017). *Potential von LiDAR Mobile Mapping für hochgenaue Karten*. München: Bayerische Akademie der Wissenschaften München.
- Hofmann-Wellenhof, B., Legat, K., & Wieser, M. (2003). *Navigation - Principles of Positioning and Guidance*. Wien: Springer-Verlag GmbH.

- Hutton, J., Gopaul, N., Zhang, X., Wand, J., Menon, V., Rieck, D., . . . Pastor, F. (2016). Centimeter-Level, robust GNSS-Aided inertial post-processing for mobile mapping without local reference stations. *XXIII ISPRS Congress. Volume XLI-B3*, S. 819-826. Prague, Czech Republic: The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences.
- IEC08. (2008). *Safety of laser products - Part 1: Equipment classification, requirements and user's guide*. International Electrotechnical Commission (IEC).
- IGS. (4. April 2016). Von IGS products: <https://igsceb.jpl.nasa.gov/components/> abgerufen
- Kern, F. (2003). *Automatisierte Modellierung von Bauwerksgeometrien aus 3D-Laserscanner-Daten*. Geodätische Schriftenreihe der Technischen Universität Braunschweig.
- Klingbeil, L., & Kuhlmann, H. (2018). Mobile Multisensorsysteme: Sensoren, Verfahren, Anwendungen - Ein Überblick. In D. e.V., *MST 2018 - Multisensortechnologie: Low-Cost Sensoren im Verbund*. Augsburg: DVW-Schriftenreihe.
- Kremer, J., & Hunter, G. (2007). Performance of the Streetmapper Mobile LIDAR Mapping System in 'Real World' Projects. *Photogrammetric Week 2007*, 215-225.
- Kuhlmann, H., & Holst, C. (2017). Flächenhafte Abtastung mit Laserscanning. Messtechnik, flächenhafte Modellierung und aktuelle Entwicklungen im Bereich des terrestrischen Laserscanning. In W. Schwarz, *Ingenieurgeodäsie*. Springer Spektrum.
- Ladstädter, R. (2019). *Optimierte Georeferenzierung von Mobile Mapping Daten der Gesamtstrecke (A09 - FSE + INSB Graz West - Wildon) mit Passpunkten*. Unveröffentlicht, Graz.
- Ladstädter, R., Luley, P., Ladstätter, S., & Mayer, H. (2019). UHD Mapping von Teststrecken für automatisiertes Fahren. *Dreiländertagung der DGPF, der OVG und der SGPF in Wien, Österreich*, 28.
- Längauer, K. (2010). *Trajektorienbestimmung mittels Integration von GNSS und IMS - Genauigkeitsuntersuchung unterschiedlicher Systeme und Kopplungsarten*. Graz: TU Graz.
- Leica Geosystems. (29. Februar 2016). Leica Pegasus: Two - Field Operations Manual. Heerbrugg, Switzerland. Abgerufen am 11. 10 2020
- Leica Geosystems. (2018). *Wahrnehmung & Realität - Einführung in das 3D-Laserscanning. 3D+ Reality Capture in neuen Dimensionen*, 3.
- Leica Geosystems. (14. November 2019). Leica Pegasus Manager - User Manual. (0.4). Abgerufen am 11.10.2020
- Leica Geosystems. (01. Februar 2020). Von [https://leica-geosystems.com/de-at/products/mobile-sensor-platforms/capture-platforms/leica-pegasus\\_two](https://leica-geosystems.com/de-at/products/mobile-sensor-platforms/capture-platforms/leica-pegasus_two) abgerufen
- Lesjak, R. (2010). *Die Rolle einer inertialen Messeinheit in der Anwendung Moving-Base Gravimetry*. Graz: Technische Universität Graz.
- Li, R., Toth, C., Mostafa, M., & Tao, C. (2013). Mobile Mapping. In J. McGlone, *Manual of Photogrammetry* (S. 1060-1074). ASPRS; Auflage: 6th.

- Lichti, D., & Skaloud, J. (2010). Registration and calibration. In G. Vosselman, & H. Mass, *Airborne and Terrestrial Laser Scanning*. Whittles Publishing.
- Luhmann, T. (2018). *Nahbereichsphotogrammetrie, Grundlagen – Methoden – Beispiele* (4. Ausgabe). Wichmann Verlag.
- Minitab. (30. 08 2020). *Support Minitab*. Von <https://support.minitab.com/de-de/minitab/19/help-and-how-to/quality-and-process-improvement/measurement-system-analysis/supporting-topics/basics/accuracy-and-precision/> abgerufen
- Moder, T. (2011). *Wesen und Nutzen inertialer MEMS Sensoren in der Fahrzeugnavigation* (Bd. Masterarbeit). Graz: TU Graz.
- Moritz, H., Hanke, R., & Holub, W. (2013). Bildgebende Sensoren, Bildauswerteverfahren. *Sensortechnologien - Bildgebende Sensoren*, 25-31.
- NovAtel Inc. (2015). *An Introduction to GNSS (GPS, GLONASS, BeiDou, Galileo and other Global Navigation Satellite Systems)*. Calgary, Alberta, Canada: NoVatel Inc.
- Orbit Support. (20. 08 2020). *Knowledge base - Orbit GT*. Von [https://kb.orbitgt.com/206/technology/3d\\_mapping/measure\\_pointcloud](https://kb.orbitgt.com/206/technology/3d_mapping/measure_pointcloud) abgerufen
- Perry, J., & Childs, J. (2009). Timing on the fly. *Inside GNSS*, 34-40.
- Reshetyuk, Y. (2009). *Self-calibration and direct georeferencing in terrestrial laser scanning* (Bd. Dissertation). Stockholm: Royal Institute of Technology (KTH).
- Riegl. (04. 12 2019). Von [http://www.riegl.com/uploads/tx\\_pxpriegldownloads/RIEGL\\_VUX-SYS\\_Datasheet\\_2019-12-04\\_01.pdf](http://www.riegl.com/uploads/tx_pxpriegldownloads/RIEGL_VUX-SYS_Datasheet_2019-12-04_01.pdf) abgerufen
- Schaer, P., & Vallet, J. (2016). TRAJECTORY ADJUSTMENT OF MOBILE LASER SCAN DATA IN GPS DENIED ENVIRONMENTS. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* (S. 61-64). Lausanne, Switzerland: EuroCOW 2016, the European Calibration and Orientation Workshop.
- Schill, J. F. (2018). *Überwachung von Tragwerken mit Profilsclannern*. Darmstadt: Technische Universität Darmstadt.
- Schwarz, K., & El-Sheimy, N. (1996). Multi-sensor arrays for mapping from moving vehicles. In G. Beutler, G. Hein, W. Melbourne, & G. Seeber, *GPS trends in precise terrestrial, airborne, and spaceborne applications* (S. 185-190). Berlin: Springer.
- SPAN. (01. März 2020). Von <https://www.novatel.com/assets/Documents/Papers/FSAS.pdf> abgerufen
- Sternberg, H., & Schwieger, V. (2014). Multi-Sensor-Systeme in der Ingenieurgeodäsie - Grundlagen und Überblick. In DVW-Schriftenreihe, *Multi-Sensor-Systeme - Bewegte Zukunftsfelder*. Augsburg: DVW e.V. (Hrsg.).
- Strübing, T., & Neumann, I. (2013). Positions- und Orientierungsschätzung von LIDAR-Sensoren auf Multisensorplattformen. *ZFV - Fachbeitrag*, 210-221.
- Titterton, D., & Weston, J. (2004). *Strapdown Inertial Navigation Technology* (2nd Ausg.). The American Institute of Aeronautics and Astronautics.
- Toschi, I., Rodriguez-Gonzalvez, P., Remondino, F., Minto, S., Orlandini, S., & Fuller, A. (2015). Accuracy evaluation of a mobile mapping system with advanced statistical

methods. *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 40, 245-253.

Toth, C., & Jutzi, B. (2015). Plattformen und Sensoren für die Fernerkundung und deren Geopositionierung. In W. Freedom, & R. Rummel (Hrsg.), *Handbuch der Geodäsie* (Bd. Erdmessung und Satellitengeodäsie, S. 1-36). München: Springer Berlin Heidelberg.

Urban, H., Paar, G., Niel, A., Abwerzger, G., & Sünkel, H. (2001). *Mobile Mapping for the Protection of the Environment*. Graz, Austria.

Vexcel Imaging GmbH. (2018). Von [https://www.vexcel-imaging.com/brochures/UC\\_Mustang\\_en.pdf](https://www.vexcel-imaging.com/brochures/UC_Mustang_en.pdf) abgerufen

Wieser, M. (2013). *Direkte Georeferenzierung von Photographien anhand von freier Hardware und quelloffener Software*. Wien: Technische Universität Wien.

Z+F LIDAR Profiler. (01. März 2020). Von [http://www.zf-laser.com/fileadmin/editor/Datenblaetter/Z\\_F\\_PROFILER\\_9012\\_Datenblatt\\_D\\_final\\_kompr.pdf](http://www.zf-laser.com/fileadmin/editor/Datenblaetter/Z_F_PROFILER_9012_Datenblatt_D_final_kompr.pdf) abgerufen

## 6 Anhang

### 6.1 Genauigkeitsberechnungen

#### 6.1.1 Riegl

##### 6.1.1.1 Bodenmarkierungen (Gesamt, Track A + Track B)

Punktname	R.N.	X_IST [m]	Y_IST [m]	Z_IST[m]	X_Soll [m]	Y_Soll [m]	Z_Soll[m]	$\Delta X$ [m]	$\Delta Y$ [m]	$\Delta Z$ [m]
STL-A-49	1	-69638,736	205612,278	337,354	-69638,747	205612,276	337,329	-0,011	-0,002	-0,025
STL-A-51	2	-69624,224	205585,961	337,271	-69624,226	205585,954	337,242	-0,002	-0,007	-0,029
STL-A-53	3	-69609,630	205559,625	337,174	-69609,643	205559,609	337,142	-0,013	-0,016	-0,032
STL-A-55	4	-69595,018	205533,283	337,085	-69595,025	205533,266	337,060	-0,007	-0,017	-0,025
STL-A-57	5	-69580,319	205507,014	337,005	-69580,328	205506,997	336,970	-0,009	-0,017	-0,035
STL-A-59	6	-69565,562	205480,762	336,918	-69565,561	205480,770	336,872	0,001	0,008	-0,046
STL-A-61	7	-69556,661	205465,025	336,864	-69556,667	205465,017	336,822	-0,006	-0,008	-0,042
NP-A-3	8	-69521,274	205402,342	336,648	-69521,292	205402,373	336,635	-0,018	0,031	-0,013
NP-A-5	9	-69504,029	205372,142	336,578	-69504,028	205372,191	336,548	0,001	0,049	-0,030
NP-A-7	10	-69486,668	205342,036	336,498	-69486,664	205342,033	336,470	0,004	-0,003	-0,028
NP-A-9	11	-69469,276	205311,891	336,409	-69469,272	205311,888	336,384	0,004	-0,003	-0,025
NP-A-11	12	-69451,924	205281,835	336,302	-69451,920	205281,832	336,288	0,004	-0,003	-0,014
NP-A-13	13	-69434,439	205251,737	336,199	-69434,450	205251,772	336,190	-0,011	0,035	-0,009
NP-A-15	14	-69416,912	205221,797	336,128	-69416,907	205221,816	336,122	0,005	0,019	-0,006
NP-A-17	15	-69399,345	205191,878	336,076	-69399,328	205191,892	336,046	0,017	0,014	-0,030
NP-A-21	16	-69364,054	205131,875	335,872	-69364,074	205131,923	335,860	-0,020	0,048	-0,012
NP-A-23	17	-69346,373	205101,860	335,783	-69346,373	205101,891	335,766	0,000	0,031	-0,017
NP-A-25	18	-69328,717	205071,893	335,705	-69328,733	205071,972	335,677	-0,016	0,079	-0,028
NP-A-27	19	-69311,054	205041,992	335,611	-69311,061	205042,010	335,587	-0,007	0,018	-0,024
NP-A-29	20	-69293,441	205012,058	335,562	-69293,437	205012,055	335,508	0,004	-0,003	-0,054
NP-A-31	21	-69275,827	204982,131	335,443	-69275,823	204982,128	335,427	0,004	-0,003	-0,016
NP-A-33	22	-69258,096	204952,119	335,336	-69258,118	204952,128	335,321	-0,022	0,009	-0,015
NP-A-35	23	-69240,401	204922,184	335,244	-69240,430	204922,178	335,232	-0,029	-0,006	-0,012
STL-A-63	24	-69223,035	204892,905	335,164	-69223,065	204892,902	335,173	-0,030	-0,003	0,009
STL-A-65	25	-69207,779	204866,966	335,073	-69207,781	204866,951	335,091	-0,002	-0,015	0,018
STL-A-67	26	-69192,540	204841,120	334,989	-69192,543	204841,105	334,991	-0,003	-0,015	0,002
STL-A-69	27	-69177,298	204815,278	334,928	-69177,286	204815,285	334,929	0,012	0,007	0,001
STL-A-71	28	-69162,031	204789,475	334,864	-69162,031	204789,469	334,863	0,000	-0,006	-0,001
STL-A-73	29	-69146,734	204763,592	334,809	-69146,732	204763,587	334,807	0,002	-0,005	-0,002
STL-A-75	30	-69131,494	204737,732	334,728	-69131,492	204737,721	334,734	0,002	-0,011	0,006
STL-A-77	31	-69116,250	204711,867	334,698	-69116,258	204711,855	334,690	-0,008	-0,012	-0,008
STL-A-79	32	-69101,005	204685,921	334,593	-69101,008	204685,934	334,588	-0,003	0,013	-0,005
STL-A-81	33	-69085,658	204659,975	334,503	-69085,661	204659,976	334,500	-0,003	0,001	-0,003
STL-A-83	34	-69073,398	204639,193	334,431	-69073,394	204639,190	334,427	0,004	-0,003	-0,004

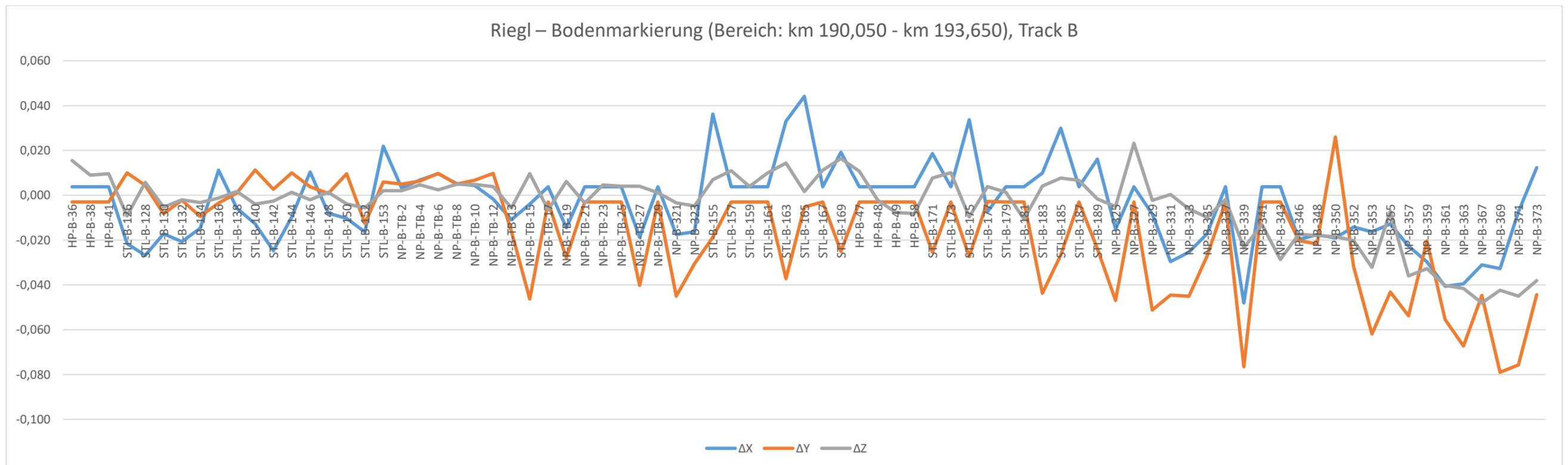
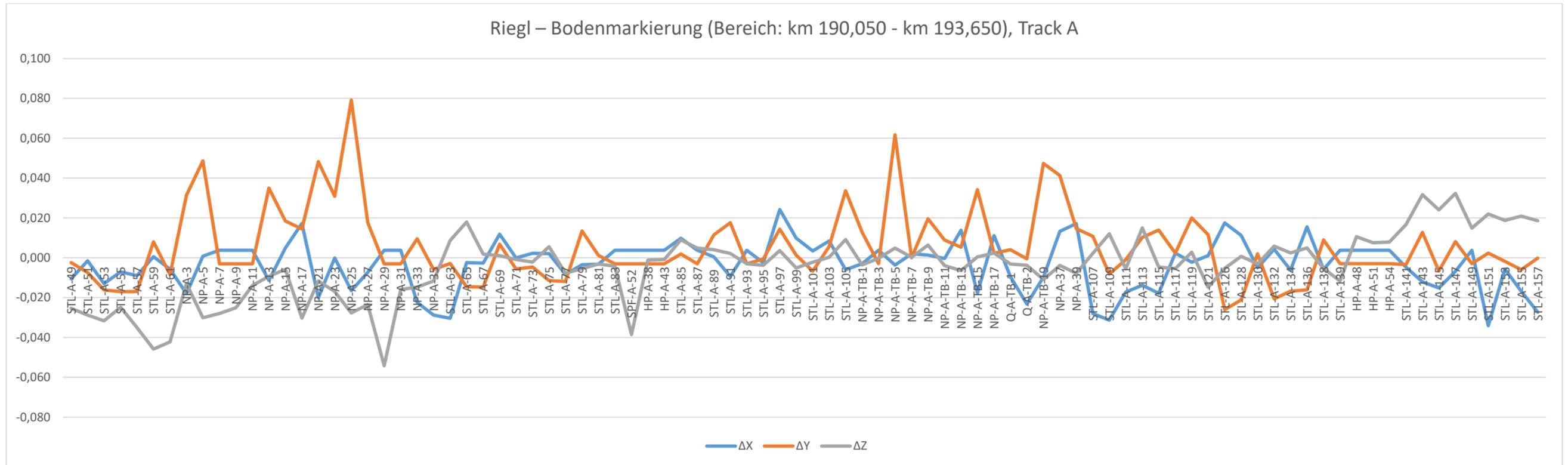
SPF-A-52	35	-69043,615	204588,855	334,312	-69043,611	204588,852	334,273	0,004	-0,003	-0,039
HP-A-38	36	-69013,689	204538,151	334,144	-69013,685	204538,148	334,143	0,004	-0,003	-0,001
HP-A-43	37	-68960,159	204447,464	333,916	-68960,155	204447,461	333,915	0,004	-0,003	-0,001
STL-A-85	38	-68916,648	204373,579	333,627	-68916,638	204373,581	333,636	0,010	0,002	0,009
STL-A-87	39	-68901,353	204347,640	333,547	-68901,349	204347,637	333,552	0,004	-0,003	0,005
STL-A-89	40	-68886,072	204321,766	333,522	-68886,072	204321,777	333,526	0,000	0,011	0,004
STL-A-91	41	-68870,766	204295,797	333,460	-68870,775	204295,815	333,462	-0,009	0,018	0,002
STL-A-93	42	-68855,446	204269,819	333,384	-68855,442	204269,816	333,381	0,004	-0,003	-0,003
STL-A-95	43	-68840,127	204243,862	333,306	-68840,130	204243,861	333,302	-0,003	-0,001	-0,004
STL-A-97	44	-68824,831	204217,876	333,208	-68824,807	204217,890	333,212	0,024	0,014	0,004
STL-A-99	45	-68809,502	204191,903	333,137	-68809,492	204191,904	333,132	0,010	0,001	-0,005
STL-A-101	46	-68794,207	204165,940	333,064	-68794,204	204165,933	333,062	0,003	-0,007	-0,002
STL-A-103	47	-68778,896	204139,988	333,006	-68778,888	204139,994	333,006	0,008	0,006	0,000
STL-A-105	48	-68766,654	204119,208	332,944	-68766,660	204119,242	332,953	-0,006	0,034	0,009
NP-A-TB-1	49	-68729,501	204056,071	332,730	-68729,504	204056,084	332,726	-0,003	0,013	-0,004
NP-A-TB-3	50	-68711,804	204026,081	332,638	-68711,800	204026,078	332,638	0,004	-0,003	0,000
NP-A-TB-5	51	-68694,126	203996,143	332,563	-68694,130	203996,205	332,568	-0,004	0,062	0,005
NP-A-TB-7	52	-68676,443	203966,230	332,471	-68676,441	203966,230	332,471	0,002	0,000	0,000
NP-A-TB-9	53	-68658,812	203936,300	332,370	-68658,811	203936,320	332,376	0,001	0,020	0,006
NP-A-TB-11	54	-68641,115	203906,296	332,297	-68641,115	203906,305	332,293	0,000	0,009	-0,004
NP-A-TB-13	55	-68623,474	203876,354	332,223	-68623,460	203876,359	332,217	0,014	0,005	-0,006
NP-A-TB-15	56	-68605,789	203846,342	332,135	-68605,807	203846,376	332,136	-0,018	0,034	0,001
NP-A-TB-17	57	-68588,155	203816,492	332,041	-68588,144	203816,494	332,043	0,011	0,002	0,002
Q-A-TB-1	58	-68587,556	203814,031	332,020	-68587,565	203814,035	332,017	-0,009	0,004	-0,003
Q-A-TB-2	59	-68586,530	203812,326	332,018	-68586,553	203812,325	332,014	-0,023	-0,001	-0,004
NP-A-TB-19	60	-68570,444	203786,397	331,975	-68570,454	203786,444	331,964	-0,010	0,047	-0,011
NP-A-37	61	-68552,750	203756,427	331,891	-68552,737	203756,468	331,887	0,013	0,041	-0,004
NP-A-39	62	-68535,109	203726,471	331,813	-68535,092	203726,486	331,805	0,017	0,015	-0,008
STL-A-107	63	-68495,031	203658,740	331,578	-68495,059	203658,751	331,580	-0,028	0,011	0,002
STL-A-109	64	-68479,685	203632,738	331,536	-68479,716	203632,730	331,548	-0,031	-0,008	0,012
STL-A-111	65	-68464,351	203606,731	331,510	-68464,368	203606,730	331,504	-0,017	-0,001	-0,006
STL-A-113	66	-68449,016	203580,690	331,379	-68449,030	203580,700	331,394	-0,014	0,010	0,015
STL-A-115	67	-68433,632	203554,658	331,320	-68433,650	203554,672	331,315	-0,018	0,014	-0,005
STL-A-117	68	-68418,269	203528,630	331,238	-68418,267	203528,632	331,233	0,002	0,002	-0,005
STL-A-119	69	-68402,915	203502,601	331,155	-68402,917	203502,621	331,158	-0,002	0,020	0,003
STL-A-121	70	-68387,567	203476,621	331,108	-68387,566	203476,633	331,093	0,001	0,012	-0,015
STL-A-126	71	-68367,345	203442,385	330,982	-68367,327	203442,359	330,977	0,018	-0,026	-0,005
STL-A-128	72	-68351,993	203416,370	330,894	-68351,982	203416,349	330,895	0,011	-0,021	0,001
STL-A-130	73	-68336,657	203390,336	330,823	-68336,662	203390,338	330,820	-0,005	0,002	-0,003
STL-A-132	74	-68321,333	203364,373	330,741	-68321,329	203364,352	330,747	0,004	-0,021	0,006
STL-A-134	75	-68305,983	203338,363	330,679	-68305,989	203338,346	330,681	-0,006	-0,017	0,002
STL-A-136	76	-68290,674	203312,337	330,610	-68290,658	203312,321	330,615	0,016	-0,016	0,005
STL-A-138	77	-68275,358	203286,309	330,533	-68275,364	203286,318	330,528	-0,006	0,009	-0,005
STL-A-139	78	-68262,031	203263,759	330,455	-68262,027	203263,756	330,443	0,004	-0,003	-0,012
HP-A-48	79	-68221,374	203194,924	330,280	-68221,370	203194,921	330,291	0,004	-0,003	0,011
HP-A-51	80	-68183,447	203130,656	330,089	-68183,443	203130,653	330,097	0,004	-0,003	0,008

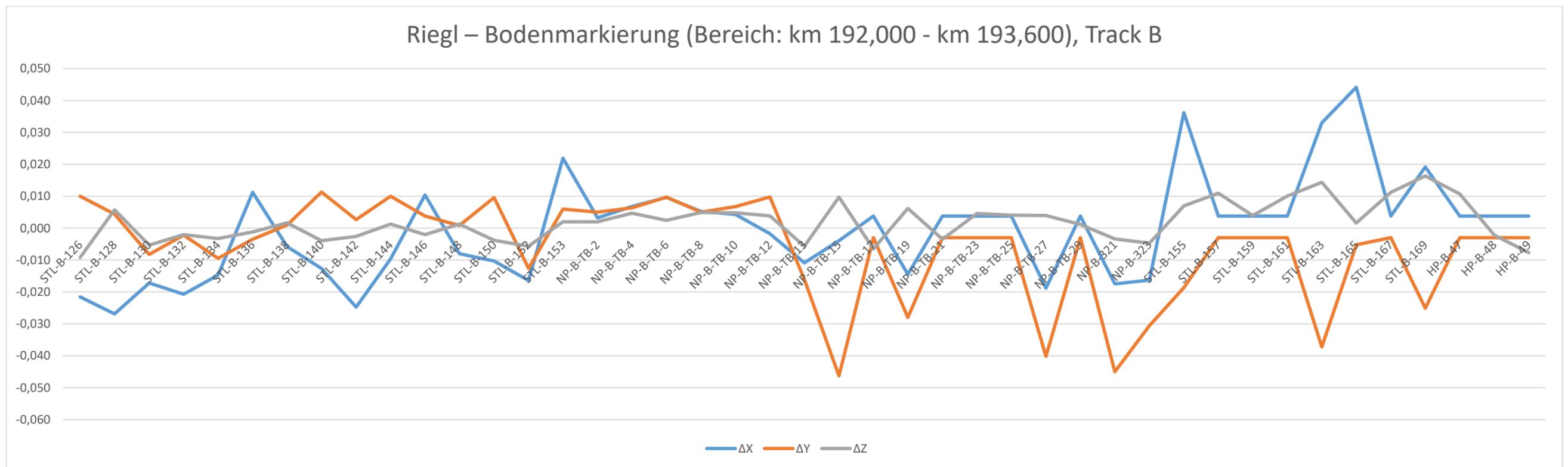
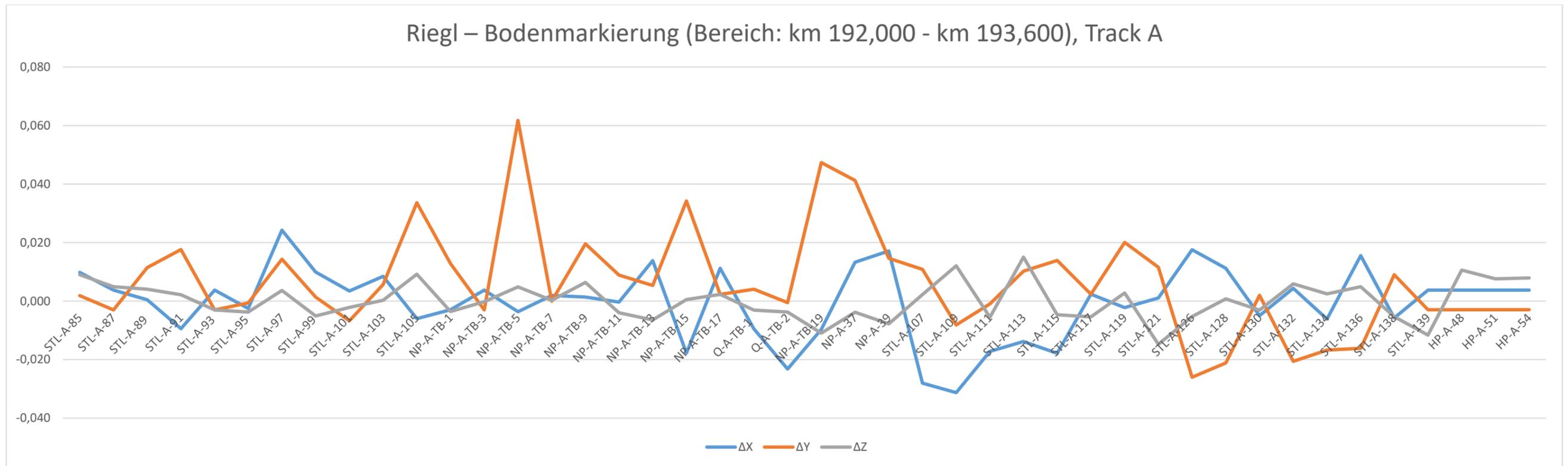
## Anhang

HP-A-54	81	-68135,414	203049,337	329,762	-68135,410	203049,334	329,770	0,004	-0,003	0,008
STL-A-141	82	-68099,572	202988,461	329,570	-68099,577	202988,458	329,587	-0,005	-0,003	0,017
STL-A-143	83	-68084,250	202962,490	329,524	-68084,262	202962,503	329,556	-0,012	0,013	0,032
STL-A-145	84	-68068,947	202936,542	329,458	-68068,962	202936,535	329,482	-0,015	-0,007	0,024
STL-A-147	85	-68053,641	202910,540	329,377	-68053,648	202910,548	329,409	-0,007	0,008	0,032
STL-A-149	86	-68038,352	202884,593	329,337	-68038,348	202884,590	329,352	0,004	-0,003	0,015
STL-A-151	87	-68022,993	202858,627	329,272	-68023,027	202858,629	329,294	-0,034	0,002	0,022
STL-A-153	88	-68007,695	202832,645	329,196	-68007,701	202832,643	329,215	-0,006	-0,002	0,019
STL-A-155	89	-67992,374	202806,654	329,121	-67992,391	202806,648	329,142	-0,017	-0,006	0,021
STL-A-157	90	-67977,033	202780,658	329,034	-67977,060	202780,658	329,053	-0,027	0,000	0,019
HP-B-36	91	-67988,863	202839,356	328,966	-67988,859	202839,353	328,982	0,004	-0,003	0,016
HP-B-38	92	-68014,430	202882,764	329,101	-68014,426	202882,761	329,110	0,004	-0,003	0,009
HP-B-41	93	-68060,029	202959,891	329,335	-68060,025	202959,888	329,345	0,004	-0,003	0,010
STL-B-126	94	-68112,291	203048,849	329,524	-68112,313	203048,859	329,515	-0,022	0,010	-0,009
STL-B-128	95	-68127,732	203075,038	329,643	-68127,759	203075,042	329,649	-0,027	0,004	0,006
STL-B-130	96	-68143,224	203101,243	329,791	-68143,241	203101,235	329,786	-0,017	-0,008	-0,005
STL-B-132	97	-68158,658	203127,404	329,872	-68158,679	203127,402	329,870	-0,021	-0,002	-0,002
STL-B-134	98	-68174,096	203153,612	329,927	-68174,111	203153,603	329,924	-0,015	-0,009	-0,003
STL-B-136	99	-68189,567	203179,796	330,010	-68189,556	203179,792	330,009	0,011	-0,004	-0,001
STL-B-138	100	-68205,005	203205,958	330,085	-68205,011	203205,959	330,087	-0,006	0,001	0,002
STL-B-140	101	-68220,449	203232,134	330,164	-68220,462	203232,145	330,160	-0,013	0,011	-0,004
STL-B-142	102	-68235,899	203258,323	330,234	-68235,924	203258,326	330,231	-0,025	0,003	-0,003
STL-B-144	103	-68251,369	203284,484	330,312	-68251,379	203284,494	330,313	-0,010	0,010	0,001
STL-B-146	104	-68266,811	203310,670	330,392	-68266,801	203310,674	330,390	0,010	0,004	-0,002
STL-B-148	105	-68282,244	203336,878	330,457	-68282,252	203336,879	330,458	-0,008	0,001	0,001
STL-B-150	106	-68297,671	203363,025	330,519	-68297,681	203363,035	330,515	-0,010	0,010	-0,004
STL-B-152	107	-68313,104	203389,232	330,595	-68313,120	203389,219	330,589	-0,016	-0,013	-0,006
STL-B-153	108	-68326,538	203411,900	330,660	-68326,516	203411,906	330,662	0,022	0,006	0,002
NP-B-TB-2	109	-68331,575	203420,558	330,679	-68331,572	203420,563	330,681	0,003	0,005	0,002
NP-B-TB-4	110	-68349,276	203450,524	330,773	-68349,269	203450,530	330,778	0,007	0,006	0,005
NP-B-TB-6	111	-68367,049	203480,615	330,861	-68367,039	203480,625	330,863	0,010	0,010	0,002
NP-B-TB-8	112	-68384,695	203510,545	330,953	-68384,690	203510,550	330,958	0,005	0,005	0,005
NP-B-TB-10	113	-68402,431	203540,589	331,053	-68402,427	203540,596	331,058	0,004	0,007	0,005
NP-B-TB-12	114	-68420,093	203570,586	331,142	-68420,095	203570,596	331,146	-0,002	0,010	0,004
NP-B-TB-13	115	-68436,782	203598,951	331,208	-68436,793	203598,935	331,202	-0,011	-0,016	-0,006
NP-B-TB-15	116	-68472,113	203658,979	331,313	-68472,117	203658,933	331,323	-0,004	-0,046	0,010
NP-B-TB-17	117	-68489,835	203688,962	331,411	-68489,831	203688,959	331,404	0,004	-0,003	-0,007
NP-B-TB-19	118	-68507,535	203719,003	331,536	-68507,549	203718,975	331,542	-0,014	-0,028	0,006
NP-B-TB-21	119	-68525,253	203749,002	331,629	-68525,249	203748,999	331,626	0,004	-0,003	-0,003
NP-B-TB-23	120	-68542,962	203778,982	331,700	-68542,958	203778,979	331,705	0,004	-0,003	0,005
NP-B-TB-25	121	-68560,677	203808,993	331,792	-68560,673	203808,990	331,796	0,004	-0,003	0,004
NP-B-TB-27	122	-68578,359	203839,055	331,915	-68578,378	203839,015	331,919	-0,019	-0,040	0,004
NP-B-TB-29	123	-68596,004	203868,921	332,009	-68596,000	203868,918	332,010	0,004	-0,003	0,001
NP-B-321	124	-68613,715	203898,981	332,079	-68613,732	203898,936	332,076	-0,017	-0,045	-0,003
NP-B-323	125	-68631,419	203928,979	332,164	-68631,435	203928,948	332,159	-0,016	-0,031	-0,005
STL-B-155	126	-68650,240	203960,698	332,252	-68650,204	203960,679	332,259	0,036	-0,019	0,007

STL-B-157	127	-68665,598	203986,732	332,327	-68665,594	203986,729	332,338	0,004	-0,003	0,011
STL-B-159	128	-68680,982	204012,783	332,419	-68680,978	204012,780	332,423	0,004	-0,003	0,004
STL-B-161	129	-68696,340	204038,847	332,490	-68696,336	204038,844	332,500	0,004	-0,003	0,010
STL-B-163	130	-68711,760	204064,951	332,533	-68711,727	204064,914	332,547	0,033	-0,037	0,014
STL-B-165	131	-68727,144	204091,015	332,644	-68727,100	204091,010	332,646	0,044	-0,005	0,002
STL-B-167	132	-68742,307	204116,794	332,699	-68742,303	204116,791	332,710	0,004	-0,003	0,011
STL-B-169	133	-68757,700	204142,915	332,765	-68757,681	204142,890	332,781	0,019	-0,025	0,016
HP-B-47	134	-68812,651	204235,721	333,039	-68812,647	204235,718	333,050	0,004	-0,003	0,011
HP-B-48	135	-68832,329	204269,112	333,134	-68832,325	204269,109	333,132	0,004	-0,003	-0,002
HP-B-49	136	-68850,100	204299,258	333,236	-68850,096	204299,255	333,228	0,004	-0,003	-0,008
HP-B-58	137	-68987,142	204531,479	333,934	-68987,138	204531,476	333,926	0,004	-0,003	-0,008
STL-B-171	138	-69033,933	204611,014	334,173	-69033,914	204610,989	334,181	0,019	-0,025	0,008
STL-B-173	139	-69049,301	204637,050	334,239	-69049,297	204637,047	334,249	0,004	-0,003	0,010
STL-B-175	140	-69064,695	204663,104	334,332	-69064,661	204663,077	334,322	0,034	-0,027	-0,010
STL-B-177	141	-69080,025	204689,105	334,393	-69080,032	204689,102	334,397	-0,007	-0,003	0,004
STL-B-179	142	-69095,396	204715,201	334,476	-69095,392	204715,198	334,477	0,004	-0,003	0,001
STL-B-181	143	-69110,791	204741,275	334,559	-69110,787	204741,272	334,548	0,004	-0,003	-0,011
STL-B-183	144	-69126,150	204767,407	334,625	-69126,140	204767,363	334,629	0,010	-0,044	0,004
STL-B-185	145	-69141,539	204793,448	334,702	-69141,509	204793,421	334,710	0,030	-0,027	0,008
STL-B-187	146	-69156,884	204819,552	334,783	-69156,880	204819,549	334,790	0,004	-0,003	0,007
STL-B-189	147	-69172,291	204845,640	334,871	-69172,275	204845,616	334,869	0,016	-0,024	-0,002
NP-B-325	148	-69180,242	204859,321	334,910	-69180,257	204859,274	334,905	-0,015	-0,047	-0,005
NP-B-327	149	-69197,754	204888,971	334,959	-69197,750	204888,968	334,982	0,004	-0,003	0,023
NP-B-329	150	-69215,345	204918,866	335,069	-69215,353	204918,815	335,067	-0,008	-0,051	-0,002
NP-B-331	151	-69232,968	204948,761	335,151	-69232,998	204948,716	335,151	-0,030	-0,045	0,000
NP-B-333	152	-69250,570	204978,572	335,253	-69250,595	204978,527	335,247	-0,025	-0,045	-0,006
NP-B-335	153	-69268,286	205008,596	335,336	-69268,303	205008,569	335,326	-0,017	-0,027	-0,010
NP-B-337	154	-69285,936	205038,459	335,421	-69285,932	205038,456	335,419	0,004	-0,003	-0,002
NP-B-339	155	-69303,620	205068,439	335,498	-69303,668	205068,362	335,475	-0,048	-0,077	-0,023
NP-B-341	156	-69321,336	205098,410	335,573	-69321,332	205098,407	335,560	0,004	-0,003	-0,013
NP-B-343	157	-69338,971	205128,261	335,674	-69338,967	205128,258	335,645	0,004	-0,003	-0,029
NP-B-346	158	-69374,217	205188,216	335,851	-69374,237	205188,196	335,834	-0,020	-0,020	-0,017
NP-B-348	159	-69391,800	205218,203	335,944	-69391,818	205218,181	335,926	-0,018	-0,022	-0,018
NP-B-350	160	-69409,312	205248,095	336,015	-69409,331	205248,121	335,997	-0,019	0,026	-0,018
NP-B-352	161	-69426,806	205278,167	336,074	-69426,820	205278,135	336,054	-0,014	-0,032	-0,020
NP-B-353	162	-69444,325	205308,331	336,196	-69444,341	205308,269	336,164	-0,016	-0,062	-0,032
NP-B-355	163	-69461,720	205338,374	336,260	-69461,733	205338,331	336,253	-0,013	-0,043	-0,007
NP-B-357	164	-69479,023	205368,458	336,383	-69479,046	205368,404	336,347	-0,023	-0,054	-0,036
NP-B-359	165	-69496,300	205398,601	336,450	-69496,330	205398,581	336,417	-0,030	-0,020	-0,033
NP-B-361	166	-69513,549	205428,904	336,540	-69513,590	205428,849	336,500	-0,041	-0,055	-0,040
NP-B-363	167	-69530,684	205459,136	336,621	-69530,723	205459,069	336,579	-0,039	-0,067	-0,042
NP-B-367	168	-69564,833	205519,756	336,816	-69564,864	205519,711	336,768	-0,031	-0,045	-0,048
NP-B-369	169	-69581,821	205550,270	336,911	-69581,854	205550,191	336,869	-0,033	-0,079	-0,042
NP-B-371	170	-69598,675	205580,668	337,014	-69598,682	205580,592	336,969	-0,007	-0,076	-0,045
NP-B-373	171	-69615,467	205611,129	337,110	-69615,455	205611,085	337,072	0,012	-0,044	-0,038

6.1.1.2 Plots





## 6.1.1.3 Querprofile

**Profil 1**

Punktname	R.Nummer	Z_IST[m]	Z_SOLL[m]	$\Delta Z$ [m]
PR1000	1	333,567	333,567	0,000
PR1001	2	333,580	333,578	-0,002
PR1002	3	333,598	333,598	0,000
PR1003	4	333,608	333,608	0,000
PR1004	5	333,621	333,622	0,001
PR1005	6	333,630	333,630	0,000
PR1006	7	333,639	333,640	0,001
PR1007	8	333,647	333,648	0,001
PR1008	9	333,662	333,664	0,002
PR1009	10	333,674	333,677	0,003
PR1010	11	333,697	333,700	0,003
PR1011	12	333,711	333,713	0,002
PR1012	13	333,730	333,733	0,003
PR1013	14	333,750	333,750	0,000
PR1014	15	333,782	333,786	0,004
PR1015	16	333,796	333,797	0,001
PR1016	17	333,826	333,828	0,002
PR1017	18	333,883	333,884	0,001
PR1018	19	333,884	333,889	0,005

**Profil 2**

Punktname	R.Nummer	Z_IST[m]	Z_SOLL[m]	$\Delta Z$ [m]
PR2000	1	332,201	332,197	-0,004
PR2001	2	332,212	332,211	-0,001
PR2002	3	332,226	332,231	0,005
PR2003	4	332,246	332,244	-0,002
PR2004	5	332,268	332,265	-0,003
PR2005	6	332,302	332,305	0,003
PR2006	7	332,342	332,342	0,000
PR2007	8	332,388	332,389	0,001
PR2008	9	332,415	332,417	0,002
PR2009	10	332,451	332,451	0,000
PR2010	11	332,479	332,481	0,002

**Profil 3**

Punktname	R.Nummer	Z_IST[m]	Z_SOLL[m]	$\Delta Z$ [m]
PR3000	1	331,041	331,042	0,001
PR3001	2	331,055	331,054	-0,001
PR3002	3	331,074	331,076	0,002
PR3003	4	331,099	331,102	0,003

PR3004	5	331,143	331,142	-0,001
PR3005	6	331,172	331,173	0,001
PR3006	7	331,188	331,190	0,002
PR3007	8	331,224	331,225	0,001
PR3008	9	331,240	331,240	0,000
PR3009	10	331,252	331,252	0,000

**Profil 4**

Punktname	R.Nummer	Z_IST[m]	Z_SOLL[m]	$\Delta Z$ [m]
PR4000	1	330,041	330,042	0,001
PR4001	2	330,053	330,053	0,000
PR4002	3	330,063	330,062	-0,001
PR4003	4	330,068	330,067	-0,001
PR4004	5	330,079	330,078	-0,001
PR4005	6	330,097	330,094	-0,003
PR4006	7	330,110	330,110	0,000
PR4007	8	330,132	330,131	-0,001
PR4008	9	330,167	330,166	-0,001
PR4009	10	330,173	330,175	0,002
PR4010	11	330,203	330,204	0,001
PR4011	12	330,220	330,220	0,000

**Profil 5**

Punktname	R.Nummer	Z_IST[m]	Z_SOLL[m]	$\Delta Z$ [m]
PR5000	1	330,759	330,761	0,002
PR5001	2	330,776	330,776	0,000
PR5002	3	330,790	330,789	-0,001
PR5003	4	330,803	330,802	-0,001
PR5004	5	330,810	330,816	0,006
PR5005	6	330,821	330,826	0,005
PR5006	7	330,838	330,842	0,004
PR5007	8	330,862	330,866	0,004
PR5008	9	330,884	330,885	0,001
PR5009	10	330,912	330,910	-0,002
PR5010	11	330,935	330,935	0,000
PR5011	12	330,975	330,975	0,000

**Profil 6**

Punktname	R.Nummer	Z_IST[m]	Z_SOLL[m]	$\Delta Z$ [m]
PR6000	1	331,528	331,531	0,003
PR6001	2	331,545	331,542	-0,003
PR6002	3	331,555	331,557	0,002
PR6003	4	331,570	331,573	0,003
PR6004	5	331,592	331,597	0,005
PR6005	6	331,630	331,631	0,001
PR6006	7	331,659	331,657	-0,002

PR6007	8	331,672	331,674	0,002
PR6008	9	331,695	331,699	0,004
PR6009	10	331,727	331,727	0,000
PR6010	11	331,758	331,756	-0,002
PR6011	12	331,788	331,787	-0,001

**Profil 7**

Punktname	R.Nummer	Z_IST[m]	Z_SOLL[m]	$\Delta Z$ [m]
PR7000	1	333,033	333,030	-0,003
PR7001	2	333,043	333,044	0,001
PR7002	3	333,054	333,058	0,004
PR7003	4	333,069	333,068	-0,001
PR7004	5	333,078	333,083	0,005
PR7005	6	333,111	333,111	0,000
PR7006	7	333,143	333,147	0,004
PR7007	8	333,167	333,169	0,002
PR7008	9	333,195	333,196	0,001
PR7009	10	333,221	333,222	0,001
PR7010	11	333,251	333,251	0,000
PR7011	12	333,261	333,259	-0,002

## 6.1.2 Leica

## 6.1.2.1 Bodenmarkierungen

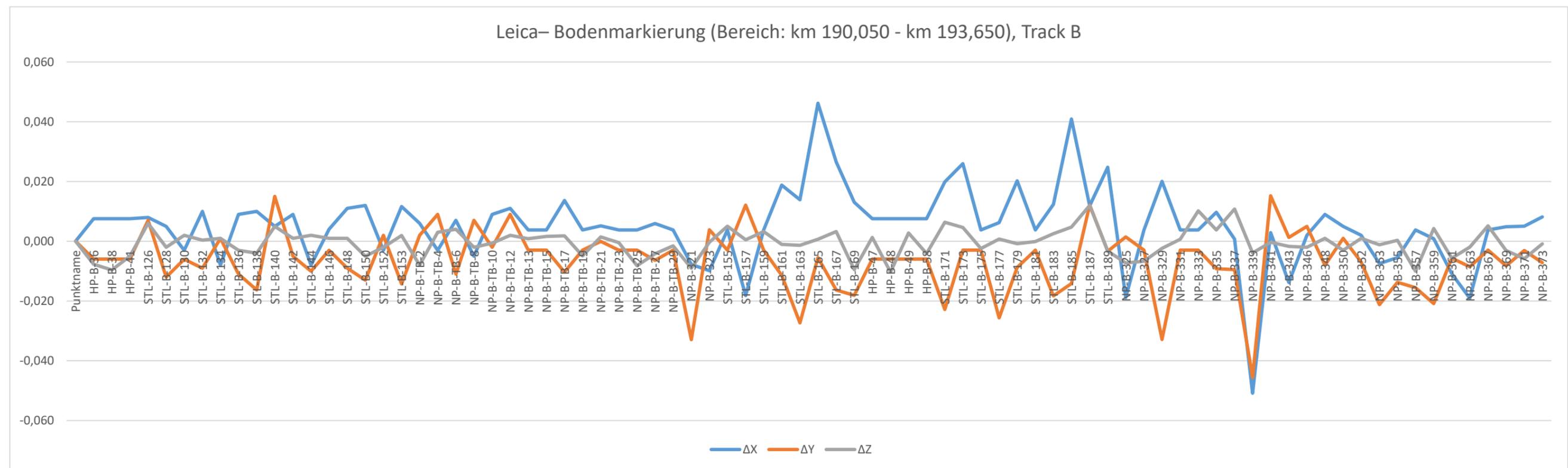
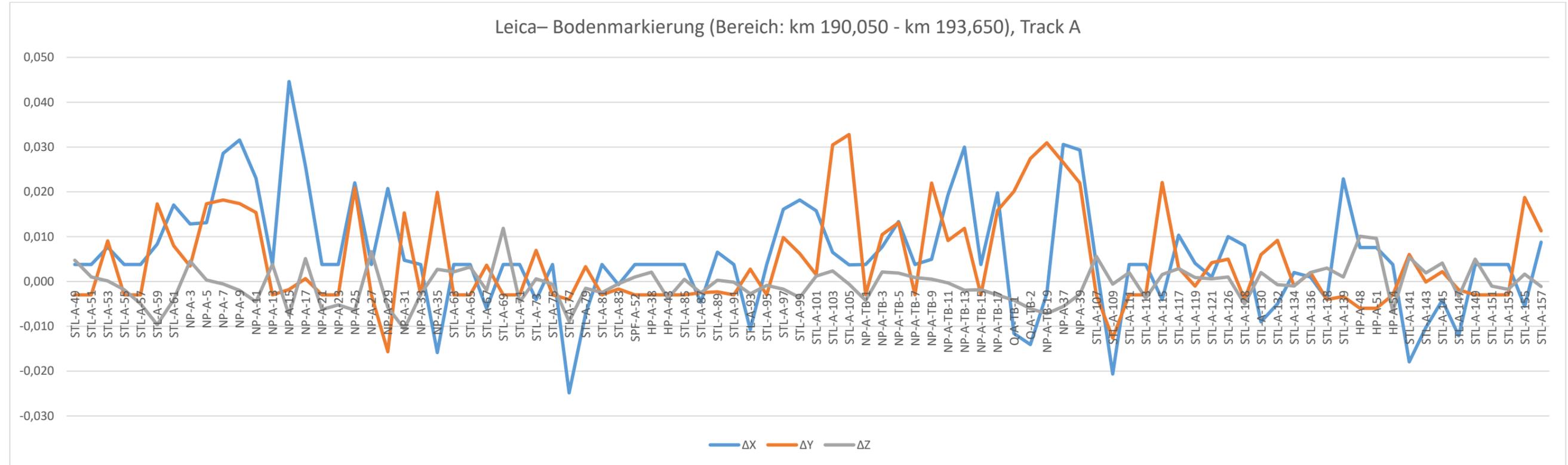
Punktname	R.N.	X_IST[m]	Y_IST[m]	Z_IST[m]	X_Soll[m]	Y_Soll[m]	Z_Soll[m]	$\Delta X$ [m]	$\Delta Y$ [m]	$\Delta Z$ [m]
STL-A-49	1	-69638,751	205612,279	337,324	-69638,747	205612,276	337,329	0,004	-0,003	0,005
STL-A-51	2	-69624,230	205585,957	337,241	-69624,226	205585,954	337,242	0,004	-0,003	0,001
STL-A-53	3	-69609,651	205559,600	337,142	-69609,643	205559,609	337,142	0,008	0,009	0,000
STL-A-55	4	-69595,029	205533,269	337,062	-69595,025	205533,266	337,060	0,004	-0,003	-0,002
STL-A-57	5	-69580,332	205507,000	336,975	-69580,328	205506,997	336,970	0,004	-0,003	-0,005
STL-A-59	6	-69565,569	205480,753	336,882	-69565,561	205480,770	336,872	0,008	0,017	-0,010
STL-A-61	7	-69556,684	205465,009	336,826	-69556,667	205465,017	336,822	0,017	0,008	-0,004
NP-A-3	8	-69521,305	205402,370	336,630	-69521,292	205402,373	336,635	0,013	0,003	0,005
NP-A-5	9	-69504,041	205372,174	336,548	-69504,028	205372,191	336,548	0,013	0,017	0,000
NP-A-7	10	-69486,693	205342,015	336,471	-69486,664	205342,033	336,470	0,029	0,018	-0,001
NP-A-9	11	-69469,304	205311,871	336,386	-69469,272	205311,888	336,384	0,032	0,017	-0,002
NP-A-11	12	-69451,943	205281,817	336,293	-69451,920	205281,832	336,288	0,023	0,015	-0,005
NP-A-13	13	-69434,454	205251,775	336,186	-69434,450	205251,772	336,190	0,004	-0,003	0,004
NP-A-15	14	-69416,952	205221,818	336,129	-69416,907	205221,816	336,122	0,045	-0,002	-0,007
NP-A-17	15	-69399,354	205191,891	336,041	-69399,328	205191,892	336,046	0,026	0,001	0,005
NP-A-21	16	-69364,078	205131,926	335,866	-69364,074	205131,923	335,860	0,004	-0,003	-0,006
NP-A-23	17	-69346,377	205101,894	335,771	-69346,373	205101,891	335,766	0,004	-0,003	-0,005
NP-A-25	18	-69328,755	205071,951	335,683	-69328,733	205071,972	335,677	0,022	0,021	-0,006
NP-A-27	19	-69311,065	205042,013	335,580	-69311,061	205042,010	335,587	0,004	-0,003	0,007
NP-A-29	20	-69293,458	205012,071	335,514	-69293,437	205012,055	335,508	0,021	-0,016	-0,006
NP-A-31	21	-69275,828	204982,113	335,438	-69275,823	204982,128	335,427	0,005	0,015	-0,011
NP-A-33	22	-69258,122	204952,131	335,324	-69258,118	204952,128	335,321	0,004	-0,003	-0,003
NP-A-35	23	-69240,414	204922,158	335,229	-69240,430	204922,178	335,232	-0,016	0,020	0,003
STL-A-63	24	-69223,069	204892,905	335,171	-69223,065	204892,902	335,173	0,004	-0,003	0,002
STL-A-65	25	-69207,785	204866,954	335,088	-69207,781	204866,951	335,091	0,004	-0,003	0,003
STL-A-67	26	-69192,537	204841,101	334,993	-69192,543	204841,105	334,991	-0,006	0,004	-0,002
STL-A-69	27	-69177,290	204815,288	334,917	-69177,286	204815,285	334,929	0,004	-0,003	0,012
STL-A-71	28	-69162,035	204789,472	334,868	-69162,031	204789,469	334,863	0,004	-0,003	-0,005
STL-A-73	29	-69146,728	204763,580	334,806	-69146,732	204763,587	334,807	-0,004	0,007	0,001
STL-A-75	30	-69131,496	204737,724	334,735	-69131,492	204737,721	334,734	0,004	-0,003	-0,001
STL-A-77	31	-69116,233	204711,859	334,699	-69116,258	204711,855	334,690	-0,025	-0,004	-0,009
STL-A-79	32	-69101,001	204685,931	334,589	-69101,008	204685,934	334,588	-0,007	0,003	-0,001
STL-A-81	33	-69085,665	204659,979	334,502	-69085,661	204659,976	334,500	0,004	-0,003	-0,002
STL-A-83	34	-69073,393	204639,192	334,428	-69073,394	204639,190	334,427	-0,001	-0,002	-0,001
SPF-A-52	35	-69043,615	204588,855	334,272	-69043,611	204588,852	334,273	0,004	-0,003	0,001
HP-A-38	36	-69013,689	204538,151	334,141	-69013,685	204538,148	334,143	0,004	-0,003	0,002
HP-A-43	37	-68960,159	204447,464	333,919	-68960,155	204447,461	333,915	0,004	-0,003	-0,004
STL-A-85	38	-68916,642	204373,584	333,636	-68916,638	204373,581	333,636	0,004	-0,003	0,000
STL-A-87	39	-68901,344	204347,640	333,555	-68901,349	204347,637	333,552	-0,005	-0,003	-0,003

STL-A-89	40	-68886,079	204321,779	333,526	-68886,072	204321,777	333,526	0,007	-0,002	0,000
STL-A-91	41	-68870,779	204295,818	333,462	-68870,775	204295,815	333,462	0,004	-0,003	0,000
STL-A-93	42	-68855,431	204269,813	333,384	-68855,442	204269,816	333,381	-0,011	0,003	-0,003
STL-A-95	43	-68840,134	204243,864	333,303	-68840,130	204243,861	333,302	0,004	-0,003	-0,001
STL-A-97	44	-68824,823	204217,880	333,214	-68824,807	204217,890	333,212	0,016	0,010	-0,002
STL-A-99	45	-68809,510	204191,898	333,136	-68809,492	204191,904	333,132	0,018	0,006	-0,004
STL-A-101	46	-68794,220	204165,931	333,061	-68794,204	204165,933	333,062	0,016	0,002	0,001
STL-A-103	47	-68778,895	204139,964	333,004	-68778,888	204139,994	333,006	0,007	0,030	0,002
STL-A-105	48	-68766,664	204119,209	332,954	-68766,660	204119,242	332,953	0,004	0,033	-0,001
NP-A-TB-1	49	-68729,508	204056,087	332,730	-68729,504	204056,084	332,726	0,004	-0,003	-0,004
NP-A-TB-3	50	-68711,808	204026,068	332,636	-68711,800	204026,078	332,638	0,008	0,010	0,002
NP-A-TB-5	51	-68694,143	203996,192	332,566	-68694,130	203996,205	332,568	0,013	0,013	0,002
NP-A-TB-7	52	-68676,445	203966,233	332,470	-68676,441	203966,230	332,471	0,004	-0,003	0,001
NP-A-TB-9	53	-68658,816	203936,298	332,375	-68658,811	203936,320	332,376	0,005	0,022	0,001
NP-A-TB-11	54	-68641,134	203906,296	332,293	-68641,115	203906,305	332,293	0,019	0,009	0,000
NP-A-TB-13	55	-68623,490	203876,347	332,219	-68623,460	203876,359	332,217	0,030	0,012	-0,002
NP-A-TB-15	56	-68605,811	203846,379	332,138	-68605,807	203846,376	332,136	0,004	-0,003	-0,002
NP-A-TB-17	57	-68588,164	203816,478	332,046	-68588,144	203816,494	332,043	0,020	0,016	-0,003
Q-A-TB-1	58	-68587,553	203814,015	332,021	-68587,565	203814,035	332,017	-0,012	0,020	-0,004
Q-A-TB-2	59	-68586,539	203812,298	332,020	-68586,553	203812,325	332,014	-0,014	0,027	-0,006
NP-A-TB-19	60	-68570,451	203786,413	331,971	-68570,454	203786,444	331,964	-0,003	0,031	-0,007
NP-A-37	61	-68552,768	203756,441	331,893	-68552,737	203756,468	331,887	0,031	0,027	-0,006
NP-A-39	62	-68535,121	203726,464	331,808	-68535,092	203726,486	331,805	0,029	0,022	-0,003
STL-A-107	63	-68495,063	203658,754	331,574	-68495,059	203658,751	331,580	0,004	-0,003	0,006
STL-A-109	64	-68479,695	203632,743	331,549	-68479,716	203632,730	331,548	-0,021	-0,013	-0,001
STL-A-111	65	-68464,372	203606,733	331,502	-68464,368	203606,730	331,504	0,004	-0,003	0,002
STL-A-113	66	-68449,034	203580,703	331,398	-68449,030	203580,700	331,394	0,004	-0,003	-0,004
STL-A-115	67	-68433,646	203554,650	331,313	-68433,650	203554,672	331,315	-0,004	0,022	0,002
STL-A-117	68	-68418,277	203528,629	331,230	-68418,267	203528,632	331,233	0,010	0,003	0,003
STL-A-119	69	-68402,921	203502,622	331,157	-68402,917	203502,621	331,158	0,004	-0,001	0,001
STL-A-121	70	-68387,567	203476,629	331,092	-68387,566	203476,633	331,093	0,001	0,004	0,001
STL-A-126	71	-68367,337	203442,354	330,976	-68367,327	203442,359	330,977	0,010	0,005	0,001
STL-A-128	72	-68351,990	203416,353	330,900	-68351,982	203416,349	330,895	0,008	-0,004	-0,005
STL-A-130	73	-68336,653	203390,332	330,818	-68336,662	203390,338	330,820	-0,009	0,006	0,002
STL-A-132	74	-68321,324	203364,343	330,748	-68321,329	203364,352	330,747	-0,005	0,009	-0,001
STL-A-134	75	-68305,991	203338,347	330,682	-68305,989	203338,346	330,681	0,002	-0,001	-0,001
STL-A-136	76	-68290,659	203312,319	330,613	-68290,658	203312,321	330,615	0,001	0,002	0,002
STL-A-138	77	-68275,360	203286,322	330,525	-68275,364	203286,318	330,528	-0,004	-0,004	0,003
STL-A-139	78	-68262,050	203263,759	330,442	-68262,027	203263,756	330,443	0,023	-0,003	0,001
HP-A-48	79	-68221,378	203194,927	330,281	-68221,370	203194,921	330,291	0,008	-0,006	0,010
HP-A-51	80	-68183,451	203130,659	330,087	-68183,443	203130,653	330,097	0,008	-0,006	0,010
HP-A-54	81	-68135,414	203049,337	329,777	-68135,410	203049,334	329,770	0,004	-0,003	-0,007
STL-A-141	82	-68099,559	202988,452	329,582	-68099,577	202988,458	329,587	-0,018	0,006	0,005
STL-A-143	83	-68084,252	202962,503	329,554	-68084,262	202962,503	329,556	-0,010	0,000	0,002
STL-A-145	84	-68068,958	202936,533	329,478	-68068,962	202936,535	329,482	-0,004	0,002	0,004
STL-A-147	85	-68053,636	202910,550	329,412	-68053,648	202910,548	329,409	-0,012	-0,002	-0,003

STL-A-149	86	-68038,352	202884,593	329,347	-68038,348	202884,590	329,352	0,004	-0,003	0,005
STL-A-151	87	-68023,031	202858,632	329,295	-68023,027	202858,629	329,294	0,004	-0,003	-0,001
STL-A-153	88	-68007,705	202832,646	329,217	-68007,701	202832,643	329,215	0,004	-0,003	-0,002
STL-A-155	89	-67992,385	202806,629	329,140	-67992,391	202806,648	329,142	-0,006	0,019	0,002
STL-A-157	90	-67977,069	202780,647	329,054	-67977,060	202780,658	329,053	0,009	0,011	-0,001
HP-B-36	91	-67988,867	202839,359	328,990	-67988,859	202839,353	328,982	0,008	-0,006	-0,008
HP-B-38	92	-68014,434	202882,767	329,120	-68014,426	202882,761	329,110	0,008	-0,006	-0,010
HP-B-41	93	-68060,033	202959,894	329,350	-68060,025	202959,888	329,345	0,008	-0,006	-0,005
STL-B-126	94	-68112,321	203048,852	329,509	-68112,313	203048,859	329,515	0,008	0,007	0,006
STL-B-128	95	-68127,764	203075,054	329,651	-68127,759	203075,042	329,649	0,005	-0,012	-0,002
STL-B-130	96	-68143,238	203101,241	329,784	-68143,241	203101,235	329,786	-0,003	-0,006	0,002
STL-B-132	97	-68158,689	203127,411	329,870	-68158,679	203127,402	329,870	0,010	-0,009	0,000
STL-B-134	98	-68174,103	203153,602	329,923	-68174,111	203153,603	329,924	-0,008	0,001	0,001
STL-B-136	99	-68189,565	203179,803	330,012	-68189,556	203179,792	330,009	0,009	-0,011	-0,003
STL-B-138	100	-68205,021	203205,975	330,091	-68205,011	203205,959	330,087	0,010	-0,016	-0,004
STL-B-140	101	-68220,467	203232,130	330,155	-68220,462	203232,145	330,160	0,005	0,015	0,005
STL-B-142	102	-68235,933	203258,331	330,230	-68235,924	203258,326	330,231	0,009	-0,005	0,001
STL-B-144	103	-68251,371	203284,504	330,311	-68251,379	203284,494	330,313	-0,008	-0,010	0,002
STL-B-146	104	-68266,805	203310,677	330,389	-68266,801	203310,674	330,390	0,004	-0,003	0,001
STL-B-148	105	-68282,263	203336,888	330,457	-68282,252	203336,879	330,458	0,011	-0,009	0,001
STL-B-150	106	-68297,693	203363,048	330,520	-68297,681	203363,035	330,515	0,012	-0,013	-0,005
STL-B-152	107	-68313,117	203389,217	330,591	-68313,120	203389,219	330,589	-0,003	0,002	-0,002
STL-B-153	108	-68326,528	203411,920	330,660	-68326,516	203411,906	330,662	0,012	-0,014	0,002
NP-B-TB-2	109	-68331,578	203420,561	330,689	-68331,572	203420,563	330,681	0,006	0,002	-0,008
NP-B-TB-4	110	-68349,266	203450,521	330,775	-68349,269	203450,530	330,778	-0,003	0,009	0,003
NP-B-TB-6	111	-68367,046	203480,636	330,859	-68367,039	203480,625	330,863	0,007	-0,011	0,004
NP-B-TB-8	112	-68384,685	203510,543	330,960	-68384,690	203510,550	330,958	-0,005	0,007	-0,002
NP-B-TB-10	113	-68402,436	203540,598	331,059	-68402,427	203540,596	331,058	0,009	-0,002	-0,001
NP-B-TB-12	114	-68420,106	203570,587	331,144	-68420,095	203570,596	331,146	0,011	0,009	0,002
NP-B-TB-13	115	-68436,797	203598,938	331,201	-68436,793	203598,935	331,202	0,004	-0,003	0,001
NP-B-TB-15	116	-68472,121	203658,936	331,321	-68472,117	203658,933	331,323	0,004	-0,003	0,002
NP-B-TB-17	117	-68489,845	203688,969	331,402	-68489,831	203688,959	331,404	0,014	-0,010	0,002
NP-B-TB-19	118	-68507,553	203718,978	331,547	-68507,549	203718,975	331,542	0,004	-0,003	-0,005
NP-B-TB-21	119	-68525,254	203748,999	331,625	-68525,249	203748,999	331,626	0,005	0,000	0,001
NP-B-TB-23	120	-68542,962	203778,982	331,705	-68542,958	203778,979	331,705	0,004	-0,003	0,000
NP-B-TB-25	121	-68560,677	203808,993	331,804	-68560,673	203808,990	331,796	0,004	-0,003	-0,008
NP-B-TB-27	122	-68578,384	203839,021	331,923	-68578,378	203839,015	331,919	0,006	-0,006	-0,004
NP-B-TB-29	123	-68596,004	203868,921	332,012	-68596,000	203868,918	332,010	0,004	-0,003	-0,002
NP-B-321	124	-68613,724	203898,969	332,085	-68613,732	203898,936	332,076	-0,008	-0,033	-0,009
NP-B-323	125	-68631,425	203928,944	332,159	-68631,435	203928,948	332,159	-0,010	0,004	0,000
STL-B-155	126	-68650,208	203960,682	332,254	-68650,204	203960,679	332,259	0,004	-0,003	0,005
STL-B-157	127	-68665,576	203986,717	332,337	-68665,594	203986,729	332,338	-0,018	0,012	0,001
STL-B-159	128	-68680,982	204012,783	332,420	-68680,978	204012,780	332,423	0,004	-0,003	0,003
STL-B-161	129	-68696,355	204038,855	332,501	-68696,336	204038,844	332,500	0,019	-0,011	-0,001
STL-B-163	130	-68711,741	204064,941	332,548	-68711,727	204064,914	332,547	0,014	-0,027	-0,001
STL-B-165	131	-68727,146	204091,016	332,645	-68727,100	204091,010	332,646	0,046	-0,006	0,001

STL-B-167	132	-68742,330	204116,807	332,707	-68742,303	204116,791	332,710	0,027	-0,016	0,003
STL-B-169	133	-68757,694	204142,908	332,790	-68757,681	204142,890	332,781	0,013	-0,018	-0,009
HP-B-47	134	-68812,655	204235,724	333,049	-68812,647	204235,718	333,050	0,008	-0,006	0,001
HP-B-48	135	-68832,333	204269,115	333,142	-68832,325	204269,109	333,132	0,008	-0,006	-0,010
HP-B-49	136	-68850,104	204299,261	333,225	-68850,096	204299,255	333,228	0,008	-0,006	0,003
HP-B-58	137	-68987,146	204531,482	333,930	-68987,138	204531,476	333,926	0,008	-0,006	-0,004
STL-B-171	138	-69033,934	204611,012	334,175	-69033,914	204610,989	334,181	0,020	-0,023	0,006
STL-B-173	139	-69049,323	204637,050	334,244	-69049,297	204637,047	334,249	0,026	-0,003	0,005
STL-B-175	140	-69064,665	204663,080	334,324	-69064,661	204663,077	334,322	0,004	-0,003	-0,002
STL-B-177	141	-69080,038	204689,128	334,396	-69080,032	204689,102	334,397	0,006	-0,026	0,001
STL-B-179	142	-69095,412	204715,207	334,478	-69095,392	204715,198	334,477	0,020	-0,009	-0,001
STL-B-181	143	-69110,791	204741,275	334,548	-69110,787	204741,272	334,548	0,004	-0,003	0,000
STL-B-183	144	-69126,152	204767,381	334,626	-69126,140	204767,363	334,629	0,012	-0,018	0,003
STL-B-185	145	-69141,550	204793,435	334,705	-69141,509	204793,421	334,710	0,041	-0,014	0,005
STL-B-187	146	-69156,892	204819,537	334,778	-69156,880	204819,549	334,790	0,012	0,012	0,012
STL-B-189	147	-69172,300	204845,619	334,872	-69172,275	204845,616	334,869	0,025	-0,003	-0,003
NP-B-325	148	-69180,238	204859,273	334,912	-69180,257	204859,274	334,905	-0,019	0,001	-0,007
NP-B-327	149	-69197,754	204888,971	334,989	-69197,750	204888,968	334,982	0,004	-0,003	-0,007
NP-B-329	150	-69215,373	204918,848	335,069	-69215,353	204918,815	335,067	0,020	-0,033	-0,002
NP-B-331	151	-69233,002	204948,719	335,150	-69232,998	204948,716	335,151	0,004	-0,003	0,001
NP-B-333	152	-69250,599	204978,530	335,237	-69250,595	204978,527	335,247	0,004	-0,003	0,010
NP-B-335	153	-69268,313	205008,578	335,322	-69268,303	205008,569	335,326	0,010	-0,009	0,004
NP-B-337	154	-69285,933	205038,466	335,408	-69285,932	205038,456	335,419	0,001	-0,010	0,011
NP-B-339	155	-69303,617	205068,408	335,479	-69303,668	205068,362	335,475	-0,051	-0,046	-0,004
NP-B-341	156	-69321,335	205098,392	335,560	-69321,332	205098,407	335,560	0,003	0,015	0,000
NP-B-343	157	-69338,953	205128,257	335,647	-69338,967	205128,258	335,645	-0,014	0,001	-0,002
NP-B-346	158	-69374,239	205188,191	335,836	-69374,237	205188,196	335,834	0,002	0,005	-0,002
NP-B-348	159	-69391,827	205218,189	335,925	-69391,818	205218,181	335,926	0,009	-0,008	0,001
NP-B-350	160	-69409,336	205248,120	336,000	-69409,331	205248,121	335,997	0,005	0,001	-0,003
NP-B-352	161	-69426,822	205278,142	336,053	-69426,820	205278,135	336,054	0,002	-0,007	0,001
NP-B-353	162	-69444,334	205308,290	336,165	-69444,341	205308,269	336,164	-0,007	-0,021	-0,001
NP-B-355	163	-69461,728	205338,345	336,253	-69461,733	205338,331	336,253	-0,005	-0,014	0,000
NP-B-357	164	-69479,050	205368,420	336,357	-69479,046	205368,404	336,347	0,004	-0,016	-0,010
NP-B-359	165	-69496,331	205398,602	336,413	-69496,330	205398,581	336,417	0,001	-0,021	0,004
NP-B-361	166	-69513,579	205428,855	336,506	-69513,590	205428,849	336,500	-0,011	-0,006	-0,006
NP-B-363	167	-69530,704	205459,078	336,581	-69530,723	205459,069	336,579	-0,019	-0,009	-0,002
NP-B-367	168	-69564,868	205519,714	336,763	-69564,864	205519,711	336,768	0,004	-0,003	0,005
NP-B-369	169	-69581,859	205550,199	336,872	-69581,854	205550,191	336,869	0,005	-0,008	-0,003
NP-B-371	170	-69598,687	205580,595	336,975	-69598,682	205580,592	336,969	0,005	-0,003	-0,006
NP-B-373	171	-69615,463	205611,092	337,073	-69615,455	205611,085	337,072	0,008	-0,007	-0,001

6.1.2.2 Plots



## 6.1.2.3 Querprofile

**Profil 1**

Punktname	R.Nummer	Z_IST[m]	Z_SOLL[m]	$\Delta Z$ [m]
PR1000	1	333,572	333,567	-0,005
PR1001	2	333,579	333,578	-0,001
PR1002	3	333,593	333,598	0,005
PR1003	4	333,612	333,608	-0,004
PR1004	5	333,622	333,622	0,000
PR1005	6	333,634	333,630	-0,004
PR1006	7	333,642	333,640	-0,002
PR1007	8	333,653	333,648	-0,005
PR1008	9	333,666	333,664	-0,002
PR1009	10	333,681	333,677	-0,004
PR1010	11	333,701	333,700	-0,001
PR1011	12	333,716	333,713	-0,003
PR1012	13	333,740	333,733	-0,007
PR1013	14	333,755	333,750	-0,005
PR1014	15	333,788	333,786	-0,002
PR1015	16	333,803	333,797	-0,006
PR1016	17	333,832	333,828	-0,004
PR1017	18	333,891	333,884	-0,007
PR1018	19	333,899	333,889	-0,010

**Profil 2**

Punktname	R.Nummer	Z_IST[m]	Z_SOLL[m]	$\Delta Z$ [m]
PR2000	1	332,200	332,197	-0,003
PR2001	2	332,214	332,211	-0,003
PR2002	3	332,235	332,231	-0,004
PR2003	4	332,245	332,244	-0,001
PR2004	5	332,269	332,265	-0,004
PR2005	6	332,311	332,305	-0,006
PR2006	7	332,345	332,342	-0,003
PR2007	8	332,385	332,389	0,004
PR2008	9	332,422	332,417	-0,005
PR2009	10	332,458	332,451	-0,007
PR2010	11	332,487	332,481	-0,006

**Profil 3**

Punktname	R.Nummer	Z_IST[m]	Z_SOLL[m]	$\Delta Z$ [m]
PR3000	1	331,040	331,042	0,002
PR3001	2	331,054	331,054	0,000
PR3002	3	331,077	331,076	-0,001
PR3003	4	331,112	331,102	-0,010
PR3004	5	331,141	331,142	0,001

PR3005	6	331,177	331,173	-0,004
PR3006	7	331,188	331,190	0,002
PR3007	8	331,227	331,225	-0,002
PR3008	9	331,242	331,240	-0,002
PR3009	10	331,255	331,252	-0,003

**Profil 4**

Punktname	R.Nummer	Z_IST[m]	Z_SOLL[m]	$\Delta Z$ [m]
PR4000	1	330,045	330,042	-0,003
PR4001	2	330,057	330,053	-0,004
PR4002	3	330,070	330,062	-0,008
PR4003	4	330,069	330,067	-0,002
PR4004	5	330,081	330,078	-0,003
PR4005	6	330,103	330,094	-0,009
PR4006	7	330,115	330,110	-0,005
PR4007	8	330,136	330,131	-0,005
PR4008	9	330,175	330,166	-0,009
PR4009	10	330,186	330,175	-0,011
PR4010	11	330,213	330,204	-0,009
PR4011	12	330,229	330,220	-0,009
PR4012	13	330,288	330,276	-0,012

**Profil 5**

Punktname	R.Nummer	Z_IST[m]	Z_SOLL[m]	$\Delta Z$ [m]
PR5000	1	330,760	330,761	0,001
PR5001	2	330,778	330,776	-0,002
PR5002	3	330,790	330,789	-0,001
PR5003	4	330,802	330,802	0,000
PR5004	5	330,815	330,816	0,001
PR5005	6	330,827	330,826	-0,001
PR5006	7	330,844	330,842	-0,002
PR5007	8	330,868	330,866	-0,002
PR5008	9	330,887	330,885	-0,002
PR5009	10	330,914	330,910	-0,004
PR5010	11	330,936	330,935	-0,001
PR5011	12	330,977	330,975	-0,002
PR5012	13	331,004	330,995	-0,009
PR5013	14	331,010	331,000	-0,010
PR5014	15	331,022	331,013	-0,009

**Profil 6**

Punktname	R.Nummer	Z_IST[m]	Z_SOLL[m]	$\Delta Z$ [m]
PR6000	1	331,529	331,531	0,002
PR6001	2	331,542	331,542	0,000
PR6002	3	331,556	331,557	0,001
PR6003	4	331,573	331,573	0,000

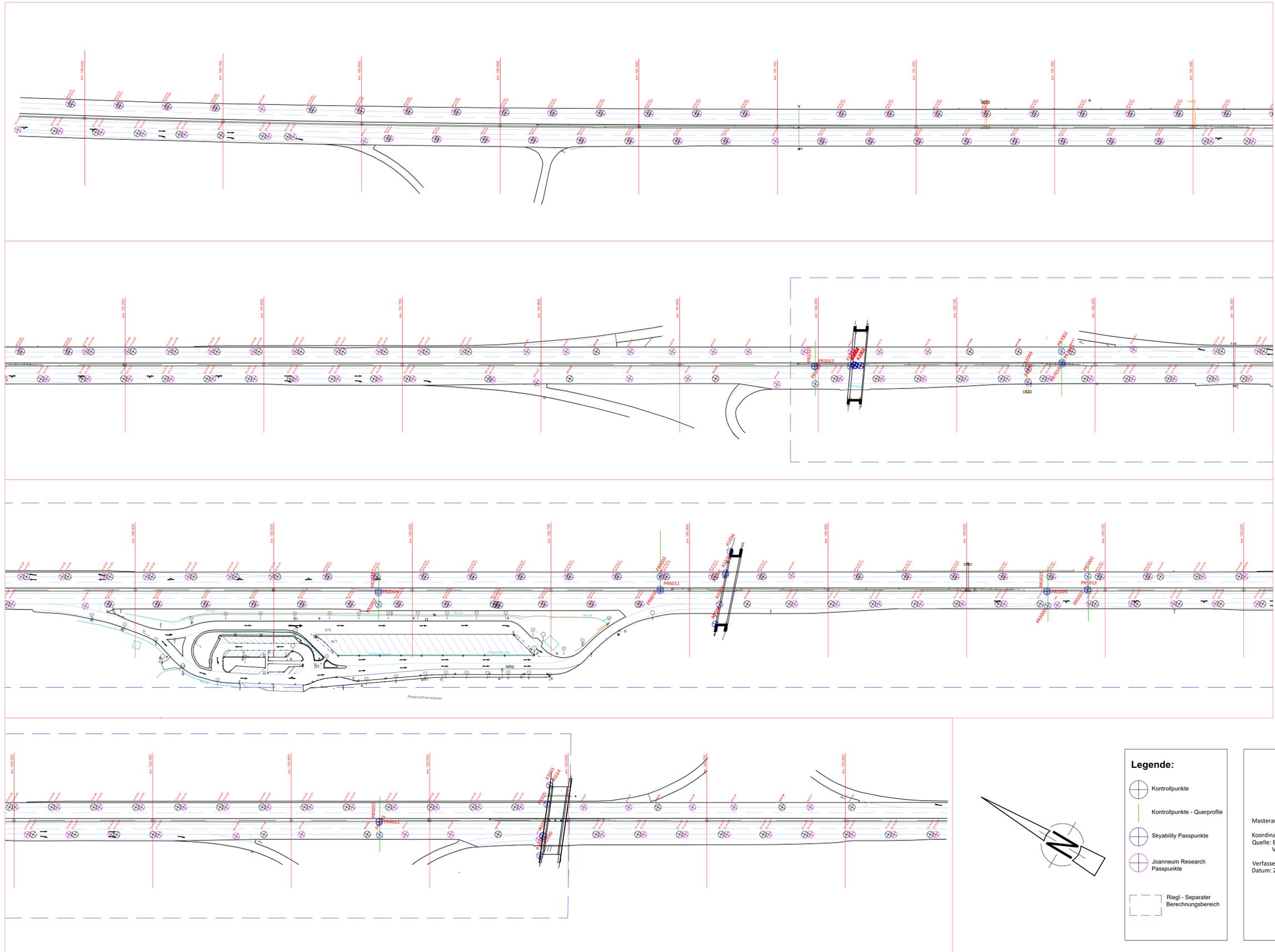
PR6004	5	331,610	331,597	-0,013
PR6005	6	331,633	331,631	-0,002
PR6006	7	331,667	331,657	-0,010
PR6007	8	331,676	331,674	-0,002
PR6008	9	331,694	331,699	0,005
PR6009	10	331,728	331,727	-0,001
PR6010	11	331,757	331,756	-0,001
PR6011	12	331,791	331,787	-0,004

**Profil 7**

Punktname	R.Nummer	Z_IST[m]	Z_SOLL[m]	$\Delta Z$ [m]
PR7000	1	333,036	333,030	-0,006
PR7001	2	333,049	333,044	-0,005
PR7002	3	333,066	333,058	-0,008
PR7003	4	333,070	333,068	-0,002
PR7004	5	333,094	333,083	-0,011
PR7005	6	333,120	333,111	-0,009
PR7006	7	333,154	333,147	-0,007
PR7007	8	333,178	333,169	-0,009
PR7008	9	333,202	333,196	-0,006
PR7009	10	333,230	333,222	-0,008
PR7010	11	333,260	333,251	-0,009
PR7011	12	333,269	333,259	-0,010

# Übersicht über Passpunkte und Kontrollpunkte

Lageplan 1:1000



**Legende:**

- Kontrollpunkte
- Kontrollpunkte - Querprofile
- Skyability Passpunkte
- Joanneum Research Passpunkte
- Riegl - Separator Berechnungsbereich

Masterarbeit  
 Koordinatenangaben: MGI - AT, East/GK  
 Quelle: Bestandsplan A9  
 Vermessung ADP Rinner ZT  
 Verfasser: Kaltak Aladin  
 Datum: 27.09.2020

