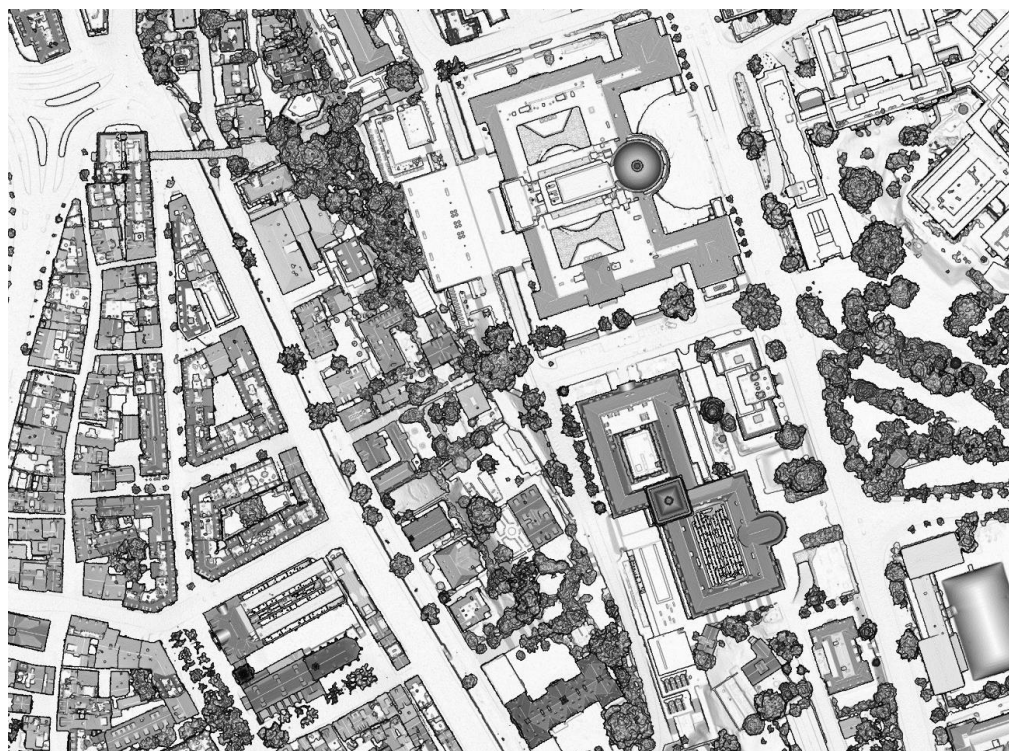


Amt für Raumentwicklung Kanton Zürich
Abteilung Geoinformation

LiDAR Befliegung Kanton Zürich 2022

Technischer Bericht



15. August 2022

Inhaltsverzeichnis:

1	Ausgangslage	5
1.1	Perimeter / Projektanforderungen (Zusammenfassung)	5
1.2	Projektorganisation	5
2	Eingesetztes Messsystem	7
2.1	Laserscanner-System Riegl VQ-1560II	7
2.2	Genauigkeiten a priori	8
2.3	Stabilisierte Plattform SOMAG GSM4000	9
3	Flugplanung	10
4	Befliegung - Durchführung	12
5	Georeferenzierung	14
5.1	Trajektorienberechnung.	14
5.2	Echodigitalisierung	14
5.3	Kalibrierung des Messsystems	14
5.4	Streifenanpassung	14
5.5	Definitive Lagerung und Genauigkeitskontrolle	16
5.6	Punktdichte und Datenlücken	18
6	Punktwolkenklassierung	20
6.1	Öffnungswinkel	20
6.2	Punktklassen	21
6.3	Methodik	22
7	Rasterprodukte	23
7.1	Interpolation Digitales Terrainmodell DTM	23
7.2	Rastergenerierung Digitales Oberflächenmodell DOM	23
7.3	Vegetationshöhenmodell	24
7.4	Gebäudehöhenmodell	24
7.5	Hangneigungsraster	24
8	Transformation / Differenzen LHN95 vs. LN02	25
8.1	Ausgangslage und Methode	25
8.2	Genauigkeitsabschätzung	25
8.3	Resultate	26
9	Höhenkurven (Testgebiet)	27
9.1	Berechnung	27
9.2	Vergleich mit bestehendem Übersichtsplan	27
9.3	Fazit Höhenkurven	28
10	Datenlieferung / Datenformate	29
11	Kurzbeurteilung des Projekts	31

Anhänge

- A Flugprotokolle
- B Protokoll Trajektorienberechnung
- C Resultate Streifenanpassung
- D Datenblätter IMU und Scanner

Dokumenteninformation:

Auftragsnummer: 2020433
Dokumentenname: 2020174_technischerbericht_lidar_zh_2022.docx
Autor: Johannes Gerber
Speicherdatum: 15.08.2022 16:24
Druckdatum: 15.08.2022 16:24
Empfänger: Baudirektion Kanton Zürich
Amt für Raumentwicklung
Abteilung Geoinformation
Stampfenbachstrasse 12
8090 Zürich

1 Ausgangslage

Als Grundlage für die technische Ausführung des Projektes gelten die Offerte vom 09.09.2019, das Pflichtenheft zum Projekt (Stand vom 07.06.2019) und der unterzeichnete Vertrag vom 02.03.2020.

1.1 Perimeter / Projektanforderungen (Zusammenfassung)

Die detaillierten Anforderungen sind im Pflichtenheft beschrieben. Nachfolgend werden nur die wichtigsten Eckdaten aufgeführt:

Der Perimeter gemäss Ausschreibungsunterlagen besteht aus den um 500 m erweiterten Kantons-
grenzen des Kantons Zürich. Damit ergibt sich eine Fläche von 1'869 km².

Die Befliegung soll schnee- und laubfrei im Herbst 2021 durchgeführt werden.

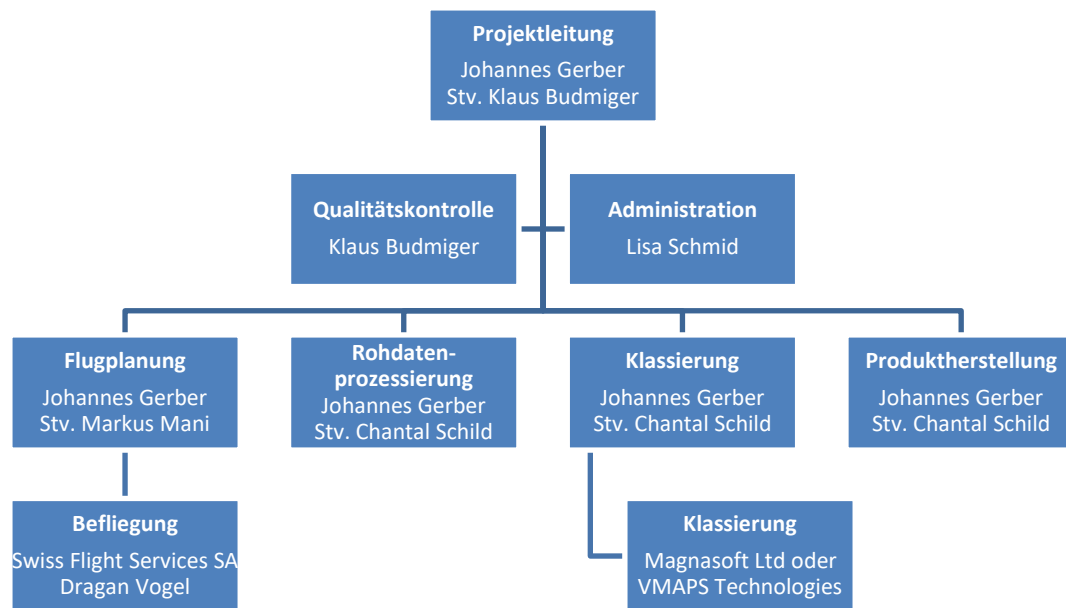
Punktdichte	Mindestens 16 Punkte / m ²
Überlappung	Min. 10% bei 40° Öffnungswinkel
Höhengenauigkeit 1 σ	< ± 0.10 m
Lagegenauigkeit 1 σ	< ± 0.20 m
Bezugsrahmen	LV95 / LHN95
Klassierung	10 Klassen (Standardklassen sowie Leitungen/Antennen)

Aus den klassierten LiDAR-Daten sind diverse Höhenderivate abzuleiten.

1.2 Projektorganisation

Die Flugplanung und die Georeferenzierung der erfassten Daten werden von gut ausgebildeten Ingenieuren der Firma Flotron AG durchgeführt. Die Flugdurchführung liegt im Verantwortungsbereich unseres Flugpartners Swiss Flight Services SA (SFS). Für die Klassierung der Daten wird die Flotron AG einen Subunternehmer beauftragen. Im Anschluss an die Klassierung werden die Qualitätskontrolle und die Produktaufbereitung wieder in Meiringen durchgeführt.

Wir haben folgendes Projektorganigramm vorgesehen:



Funktion	Name	Ausbildung	Berufserfahrung
Projektleiter	Johannes Gerber	MSc ETH Geomatik-Ing. Pat. Ingenieur-Geometer	8 Jahre
Projektleiter Stv. / Qualitätskontrolle	Klaus Budmiger	Dipl. Verm. Ing. HTL/STV Softw. Ing. HTL/NDS	36 Jahre
Flugdurchführung (Swiss Flight Services)	Dragan Vogel	Dipl. Geograph	27 Jahre
Mitarbeit Flugplanung / Datenverarbeitung	Markus Mani	Fotogrammeter	16 Jahre
Stellvertretung Datenverarbeitung	Chantal Schild	BSc Geomatik-Ing. FH	8 Jahre
Operateur / Kontrollflä- chenvermessung	Pirmin Rust	Fotogrammeter	14 Jahre

Auf modernstes Equipment und weitere Mitarbeiter wurde bei Bedarf zugegriffen.

2 Eingesetztes Messsystem

Das Projekt wurde mit zwei unterschiedlichen Flugzeugen befliegen, wobei in beiden derselbe Scanner eingesetzt wurde. Folgende Systeme kamen zum Einsatz:

Flugzeug	Cessna T206H, HB-CZY, modifiziert mit Luke Cessna 208B, HB-TEN, modifiziert mit zwei Luken
Laser Scanner	Riegl VQ-1560 II (Seriennummer 2223550)
Verbaute Kamera	PhaseOne iXU RS-1000 50mm (nicht verwendet)
GNSS/IMU	Applanix POS/AV 610 (Trimble AP60 mit IMU57)
Stabilisierte Plattform	Somag GSM 4000
Flugplanung	TopoFlight MissionPlanner
Flugnavigation	TopoFlight Navigator
GNSS / INS processing	PosPac MMS
Software	RiProcess mit zugehörigen Modulen von Riegl TerraScan, TerraModeler von TerraSolid



Abbildung 1: In diesem Projekt eingesetzte Flugzeuge HB-TEN und HB-CZY

2.1 Laserscanner-System Riegl VQ-1560II

Swiss Flight Services SA betreibt zusammen mit Flotron AG den hoch performanten Laserscanner Riegl VQ-1560II. Dieser Laserscanner ist seit 2019 auf dem Markt und wird weltweit nur von wenigen Unternehmen eingesetzt. Das Gerät ist dank seinem hohen Integrationsgrad enorm leistungsfähig und zuverlässig, und dank des robusten Gehäuses bleibt die Kalibrierung stabil.

Im Innern des VQ-1560II arbeiten zwei Laserscanner, welche jeweils um je 14 Grad gegenüber der Flugrichtung gedreht angeordnet sind. Die spezielle Taktung der beiden Laserquellen erlaubt die Verdoppelung der Pulse Repetition Rate von 2'000kHz auf 4'000kHz. Das führt zu effektiven 2'660'000 Messungen pro Sekunde auf dem Boden.

Aufgrund des Arbeitsprinzips (rotierender Facettenspiegel) hat der Öffnungswinkel bei den Scannern von Riegl kaum Einfluss auf die Punktdichte. Deshalb kann der volle Öffnungswinkel von 58.5° genutzt werden.

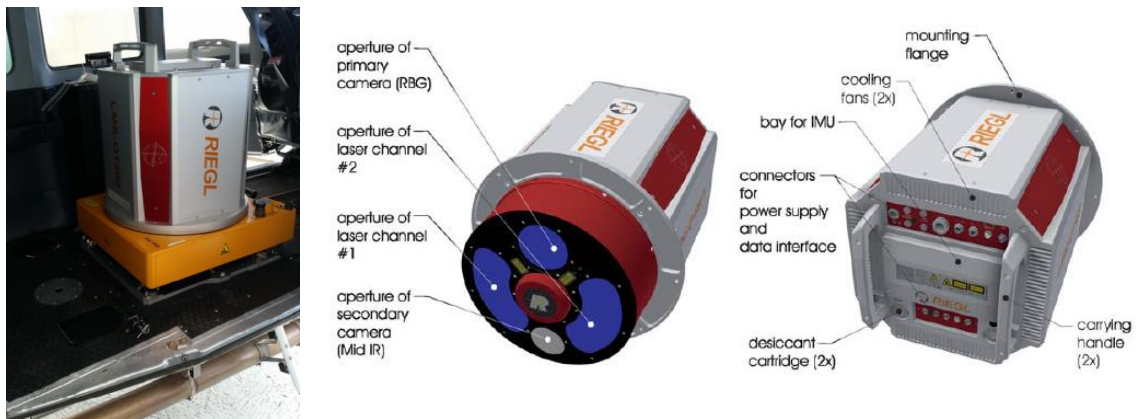


Abbildung 2: Riegl VQ-1560II. Links im Flugzeug mit der stabilisierten Plattform Somag GSM4000, rechts die Schemazeichnung (Quelle: Riegl)

Dank dem hohen Integrationsgrad und dem massiven Gehäuse bleiben die Kalibrierungen von Scanner 1, Scanner 2 und der Kamera zur eingebauten IMU konstant. Diese Kalibrierung wird aber von Mission zu Mission überwacht.

Das Datenblatt des Scanners kann unter folgendem Link heruntergeladen werden:
<http://www.riegl.com/nc/products/airborne-scanning/produktdetail/product/scanner/68/>

2.2 Genauigkeiten a priori

Um die Positionen des Airborne-Sensors zu bestimmen, werden GNSS-Daten mit einer Rate von 2 Hz und IMU-Daten mit 200 Hz aufgezeichnet. Zusätzlich werden die Orientierungsdaten der Gimbal (stabilisierte Plattform GSM4000) aufgezeichnet. Diese werden in der Trajektorienberechnung berücksichtigt, um die dynamischen Lever-Arm-Änderungen von IMU zu GNSS-Antenne zu korrigieren.

Die Genauigkeit der erzielten Resultate hängt im Wesentlichen von der eingesetzten GNSS/IMU-Einheit und der Richtungs- und Distanzmessgenauigkeit des eingesetzten Laserscanning-Systems ab.

	Herstellerangaben	Erfahrungswerte
Messrate	IMU: 200 Hz / GNSS: 5 Hz	
Lagegenauigkeit*	< 20 mm	ca. 12 mm
Höhengenauigkeit*	< 50 mm	ca. 20 mm
Genauigkeit Roll & Pitch*	< 0.0025°	ca. 0.0020°
Genauigkeit Heading*	< 0.0050°	ca. 0.0040°

* Innere Genauigkeit, Standardabweichung 1σ , bei Postprocessing

Die Distanzmessgenauigkeit des VQ-1560II wird a priori mit 20 mm angegeben. Dieser Wert wurde für eine Flughöhe von 250 m über Grund und bei Riegl-Testkonditionen ermittelt. Die a priori Richtungsmessgenauigkeit wird mit 0.001° angegeben.

Für weitergehende Informationen zum Riegl VQ-1560II mit den zugehörigen Komponenten verweisen wir auf die Datenblätter der Firma Riegl und der Firma Applanix.

2.3 Stabilisierte Plattform SOMAG GSM4000

Der VQ-1560II wird bei SFS in einer stabilisierten Plattform des Typs SOMAG GSM4000 eingesetzt. Die Hydraulik der Plattform kompensiert mit Hilfe der IMU-Daten alle ungewollten Lageänderungen des Flugzeugs.

Dies ist speziell in der Pitch-Achse wichtig, da sich nose-up oder nose-down-Bewegungen des Flugzeugs direkt auf die Punktedichte und -verteilung auswirken, wie in untenstehender Abbildung erkennbar. Bei einer nose-up-Bewegung wird der Abstand zwischen den Scanzeilen am Boden gedehnt, bei einer nose-down-Bewegung des Fliegers wird der Abstand der Scanzeilen gestaucht. Die folgende Abbildung zeigt, welchen Einfluss die Lagestabilisierung des Scanners auf die Punkteverteilung hat.

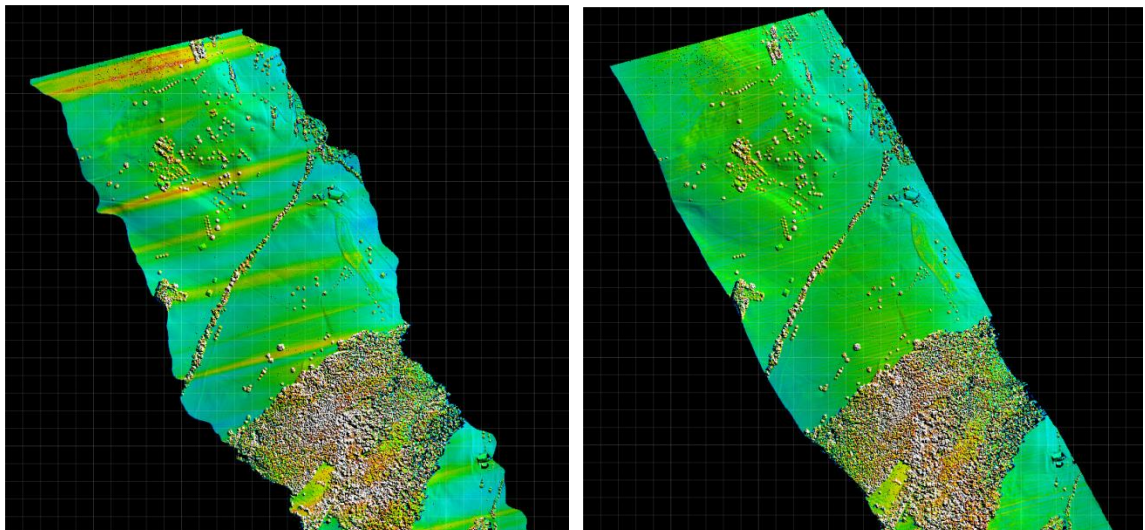


Abbildung 3: Darstellung der Punktedichte in zweimal demselben Flugstreifen bei ruhigem Wetter und ca. 600 m Flughöhe. Links mit deaktivierter Plattform, rechts aktiviert.

Die stabilisierte Plattform wird umso wichtiger, je höher über Grund der Scanner geflogen wird, da sich die Lageänderungen des Fliegers sich wegen des längeren Hebels dort umso stärker auf die Punktedichte und -verteilung auswirken.

3 Flugplanung

Die definitive Flugplanung wurde im April 2021 durchgeführt, Aufgrund einer Rückmeldung von BSF Swissphoto AG wurden die Einstellungen des Sensors vor Flugbeginn noch leicht angepasst.

Im Flugplanungsprozess gilt es folgende Parameter untereinander und mit den Projektanforderungen Punktdichte und Genauigkeit in Einklang zu bringen:

- Flughöhe (je höher desto grössere Streifenbreite und desto grössere Unabhängigkeit von der Topografie aber desto schlechtere Genauigkeit und schlechtere Punktdichte)
- Reichweite des Scanners (bei höherer Pulsrate sinkt die Reichweite)
- Fluggeschwindigkeit (Wirtschaftlichkeit und Flugeigenschaften)

Folgenden Parameter wurden für die Befliegung vorgesehen:

- Minimale Punktdichte pro Linie 16 pt/m² / Mittlere Punktdichte pro Linie 17.4 pt/m²
- Querüberlappung min. 10%, im Mittel 30%
- Öffnungswinkel max. 58.5°
- Höhe über Boden maximal 4'900 ft = 1'494 m
- Fluggeschwindigkeit max. 230 km/h
- Lagegenauigkeit a priori < 12 cm / Höhengenaugigkeit a priori < 8 cm (1σ = 68%)

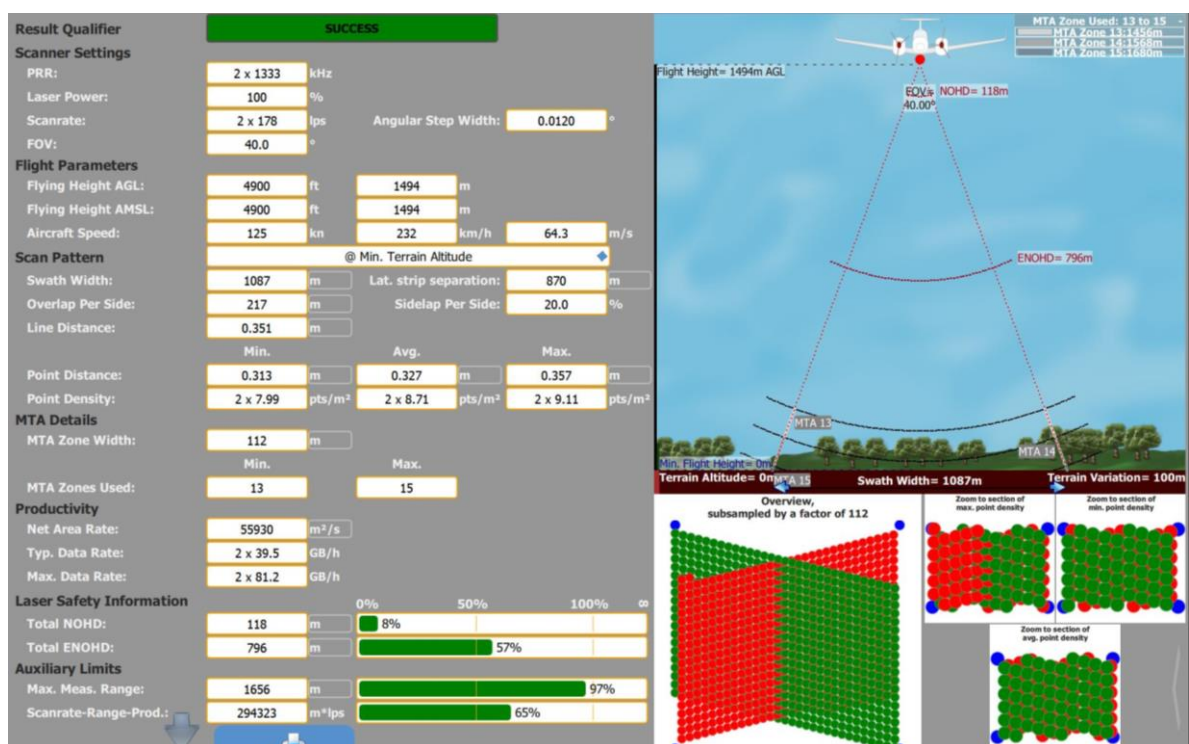


Abbildung 4: Verwendete Flugparameter (Screenshot Planungssoftware RiParameter)

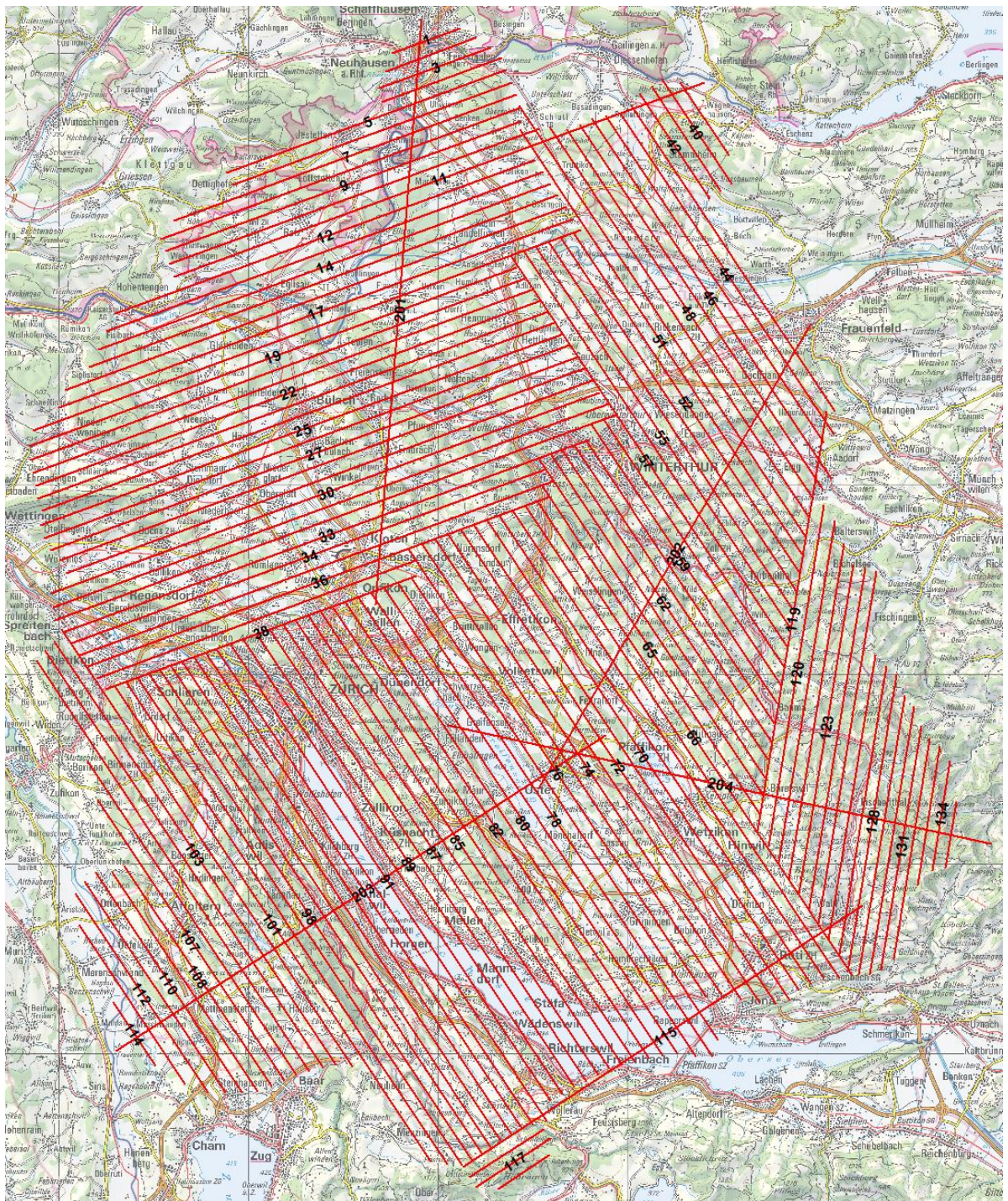


Abbildung 5: Flugplanung VQ-1560II für min. 16pt/m² (Hintergrundkarte: © swisstopo)

Es resultieren:

- 135 Fluglinien + 4 Querlinien mit total ca. 3'130 km Linienlänge
- Ungefähre Flugzeit: 23 Stunden (ohne Anflüge und Nachflüge)

4 Befliegung - Durchführung

Die Befliegung war ursprünglich für Oktober 2021 geplant. Da noch zu viel Laub an den Bäumen war, musste der Flugbeginn verschoben werden. Nach den ersten Schneefällen Ende Oktober lag bis Ende Dezember auch in tieferen Lagen Restschnee. Deshalb konnte erst am 31. Dezember mit den Flügen begonnen werden. Spätere Wintereinbrüche und das Abwarten der Schneeschmelze führten zu grösseren Abständen zwischen den einzelnen Missionen.

Eine weitere Verzögerung ergab sich durch die schwierige Situation im Zürcher Luftraum. Gemäss Aussage von SkyGuide waren nur Flüge in der Nacht möglich. Da als Folge der Coronapandemie viele kleinere Flugplätze ihren Betrieb reduziert hatten, gab es im näheren Umkreis keinen Nachtlandeplatz mehr. Einzige Option war der Flughafen Stuttgart (mit Ausweichflughafen Nürnberg), wo aber in der Nacht nicht getankt werden kann. Deshalb konnte maximal eine Mission pro Nacht durchgeführt werden.

Auf spontane Anfrage hin, konnte jedoch mehrfach auch tagsüber geflogen werden. Für die grossen zusammenhängenden Gebiete wurden dennoch drei Nachtflüge durchgeführt. Insgesamt wurden an 12 Flugtagen 12 Missionen geflogen, siehe Abbildung 6.

Am ersten Flugtag (31.12.2021) gab es eine Lücke im Informationsfluss zu den Piloten, so dass nicht freigegebene, schneebedeckte Linien beflogen wurden. Diese wurden später wiederholt. Einzig die beflogenen Querlinien wurden verwendet.

Bei der Befliegung der Linie 127 wurde das Flugzeug durch eine Windbö aus dem Korridor verfrachtet. Der Flight Management System hat daher den Laserscanner automatisch abgeschaltet. Eine Kurskorrektur brachte das Flugzeug aber innert Kürze wieder zurück auf die Fluglinie wonach der Scanner wieder eingeschaltet wurde. Dieser kurze Unterbruch in der Datenaufzeichnung blieb bei den Piloten unbemerkt, so dass eine Datenlücke entstand. Die Linie wurde später nachgeflogen.

<i>Mission</i>	<i>Flugtag</i>	<i>Start (UTC)</i>	<i>Stop (UTC)</i>	<i>Flugdauer</i>	<i>Flugzeug</i>	<i>Besonderheiten</i>
1	31.12.2021	12:28 h	15:17 h	2:49 h	HB-TEN	Falsche Linien, Kombinationsflug
2	01.01.2022	13:33 h	15:12 h	1:39 h	HB-TEN	
3	02.01.2022	12:46 h	14:37 h	1:51 h	HB-TEN	Kombinationsflug mit anderen Projekten
4	27.01.2022	13:13 h	14:33 h	1:20 h	HB-TEN	
5	09.02.2022	13:06 h	15:40 h	2:34 h	HB-TEN	
6	13.02.2022	13:10 h	15:32 h	2:22 h	HB-TEN	
7	27.02.2022	22:27 h	2:40 h	4:13 h	HB-TEN	Nachtflug ab Stuttgart
8	28.02.2022	22:28 h	2:21 h	3:53 h	HB-TEN	Nachtflug ab Stuttgart
9	11.03.2022	22:31 h	1:29 h	2:58 h	HB-TEN	Nachtflug ab Stuttgart
10	17.04.2022	9:35 h	10:26 h	0:51 h	HB-CZY	
11	19.04.2022	9:08 h	10:45 h	1:37 h	HB-CZY	
12	16.05.2022	8:47 h	9:00 h	0:13 h	HB-TEN	Nachflug Linie 127
Total ohne Anflüge				26:20 h		

Abbildung 6: Übersicht Flugtage und Missionszeiten (UTC)

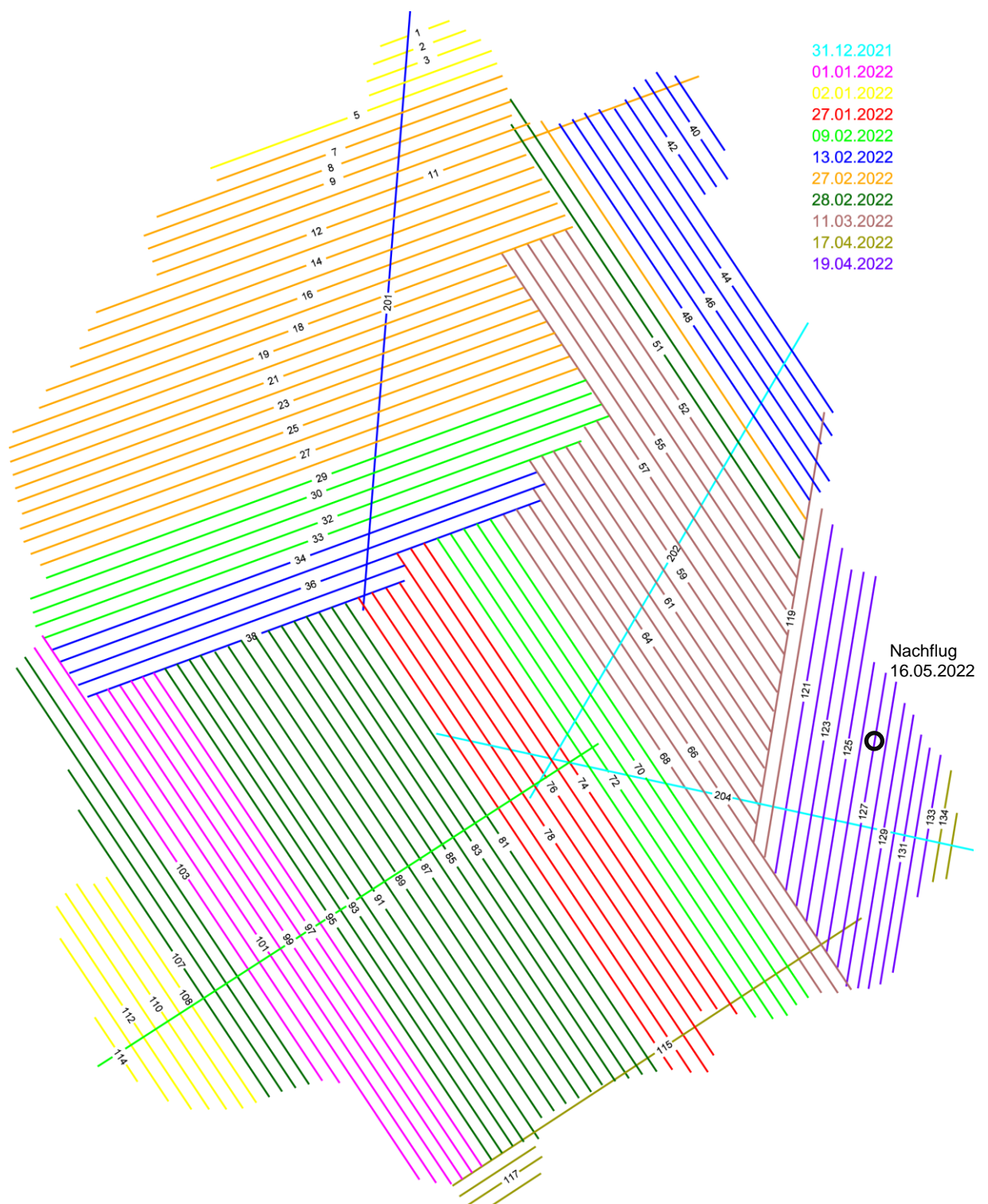


Abbildung 7: Übersicht Missionen

In Anhang A können die detaillierten Flugprotokolle (erstellt während der Befliegung) eingesehen werden.

5 Georeferenzierung

5.1 Trajektorienberechnung.

Die Trajektorienberechnung erfolgte mit der Software POSpac MMS von Applanix. Als GNSS-Referenzdaten wurden die Daten von swipos verwendet. Für jede Mission wurde eine virtuelle Referenzstation in die Mitte der geflogenen Linien gerechnet, so dass die maximale Distanz zur Basis unter 30 km blieb.

Die Trajektorienberechnung verlief über alle Flugtage problemlos und mit zufriedenstellenden Resultaten. Die Ergebnisse sind in Anhang B dokumentiert.

5.2 Echodigitalisierung

Der Scanner zeichnet Fullwaveform Rohdaten auf. Das heisst, es wird die gesamte Antwort jedes Messimpulses aufgezeichnet. Diese werden anschliessend anhand von definierten Schwellwerten in konkrete Echos umgewandelt. Pro ausgesendeten Laserpuls können so mehrere Echos aufgezeichnet werden. Diese Echodigitalisierung erfolgte während der Datenaufzeichnung im Scanner.

5.3 Kalibrierung des Messsystems

Das Messsystem wurde beim Hersteller kalibriert. Es sind aber problemlos Nachkalibrierungen während des Projektes möglich, um allfällige Veränderungen am Gerät nachvollziehen zu können. Wird bei der Streifenanpassung eine Systematik eines gesamten Flugtages festgestellt, so wird eine neue Kalibration direkt mit den aufgezeichneten Daten berechnet. Dabei werden die Orientierungswinkel zwischen benachbarten Streifen optimiert, während die Querstreifen ein willkürliches Verhalten der Kalibrierung unterbinden.

Es konnten nur sehr kleine Differenzen zur Werkskalibrierung festgestellt werden.

5.4 Streifenanpassung

Mit den Werten der Systemkalibrierung wurden zunächst die Koordinaten der Punktwolke für das gesamte Projekt berechnet. Anschliessend werden Differenzen im Überlappungsbereich der Flugstreifen im gesamten vermessenen Gebiet mittels eines automatischen Vergleichs von Flächennormalen ermittelt.

Diese Differenzen sind dann Ziel einer ausgleichenden Fehlerminimierung, bei der pro Flugstreifen drei Unbekannte (XYZ) in die Ausgleichung eingeführt werden. Die Winkel (Roll, Pitch, Yaw) werden nur bei Bedarf freigegeben. Im vorliegenden Projekt wurden zuerst die beiden Querstreifen Nrn. 202 und 204 aufeinander eingepasst. Danach wurden diese als Referenz verwendet, d.h. alle anderen Linien werden an diese beiden Querlinien angepasst. Die absolute Position der gesamten Punktwolke (und damit der festgehaltenen Querstreifen) wird anhand der terrestrisch gemessenen Kontrollflächen in einem späteren Schritt kontrolliert.

In Anhang C sind die angebrachten Korrekturwerte für jede Fluglinie dokumentiert. Nachfolgend sind diese zusammengefasst:

	X	Y	Z
Minimum	-0.181	-0.179	-0.067
Maximum	+0.144	+0.165	+0.072
Mittelwert	+0.004	-0.001	-0.004
Standardabweichung	0.060	0.064	0.026

Um eine Plausibilitätskontrolle durchzuführen kann eine Streifendifferenzkarte in RiProcess erzeugt werden (siehe unten).

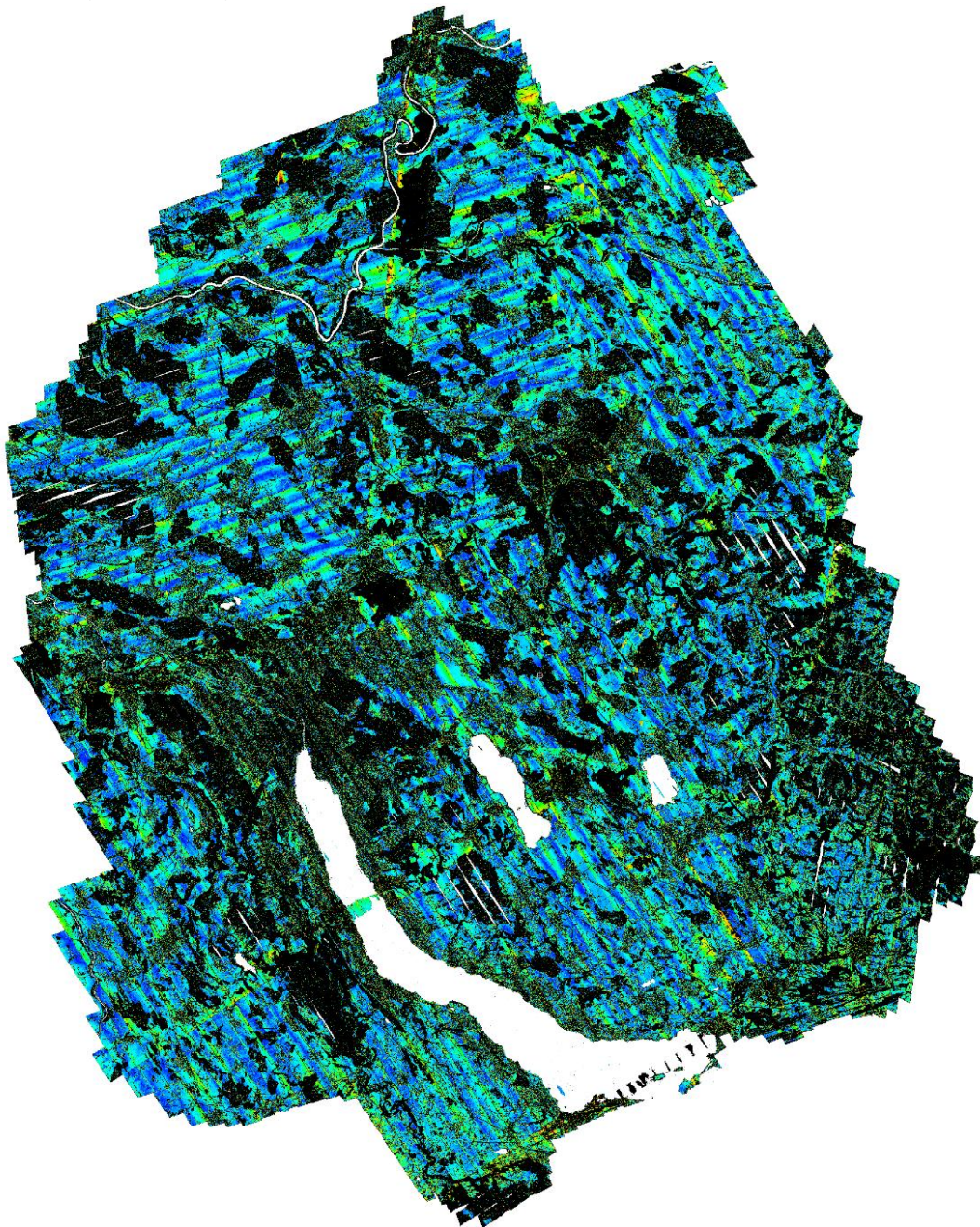


Abbildung 8: Streifendifferenzkarte Gesamtprojekt, bei vollem Öffnungswinkel (blau: 0-3 cm, grün: 3-5 cm, gelb: 5-8 cm, rot: 8-10 cm, schwarz: Vegetation, weiss: keine überlappenden Daten)

Während der Datenauswertung wird zudem darauf geachtet, dass zwischen den Flugstreifen keine signifikanten Unterschiede durch Streifenverkipnungen oder offset-Fehler auftreten. Insbesondere mittels geeigneter Querschnitte an geneigten Hausdächern werden Lageunterschiede zwischen Flugstreifen sichtbar. Exemplarisch einige Querschnitte, wobei die Flugstreifen farblich unterschieden wurden:

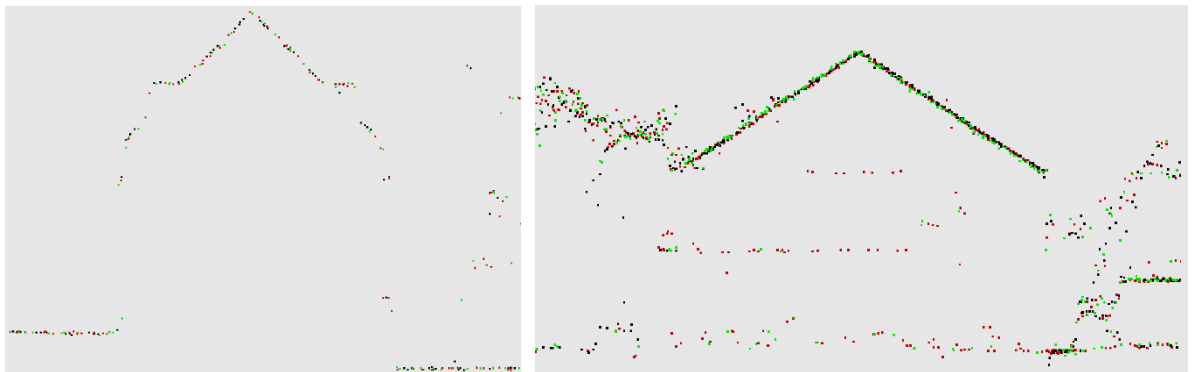


Abbildung 9: Kontrolle der relativen Lagegenauigkeit mittels geeigneter Querschnitte (Farbunter-scheidung nach Flugstreifen)

Bei dieser Kontrolle während der Datenauswertung konnten keine signifikanten systematischen Restfehler festgestellt werden.

5.5 Definitive Lagerung und Genauigkeitskontrolle

Ausgehend von der bekannten Position des Messsystems und der digitalisierten Echos, wurden mit den Daten des Laserscanners (Winkel und Distanz) die Koordinaten im System CHTRS95 berechnet und anschliessend transformiert nach CH1903plus. Die Höhen wurden mittels Geoidmodell CHGeo2004 auf Orthometrische Höhen LHN95 reduziert.

Alle Arbeiten wurden im Softwarepaket RiProcess vom Scannerhersteller Riegl durchgeführt.

Für das vorliegende Projekt wurden 12 Kontrollflächen mittels GNSS in LV95/LHN95 gemessen (siehe Abbildung 10). Pro Kontrollfläche wurden folgende Objekte erfasst

- 15-25 mittels GNSS/RTK in LV95/LHN95 gemessene Bodenpunkte auf einer ebenen, befestigten Fläche (Parkplatz, Sportplatz). Diese dienen der Höhenkontrolle.
- Tachymetrische Messung von mindestens zwei Dächern in LV95/LHN95. Optimalerweise handelt es sich um Satteldächer mit um 90° unterschiedlichen Firstrichtungen. Diese dienen der Lagekontrolle.
- Anschlussmessung an einen HFP2 zur Kontrolle der Transformationsgenauigkeit mittels HTRANS zwischen LHN95 und LN02. Die festgestellten Effekte werden im Kapitel 8 detailliert beschrieben.

Die Kontrolle der Georeferenzierung dient zum einen dem Qualitätsnachweis, zum anderen der Elimination von Differenzen, welche durch die Festhaltung des Querstreifens in der Streifenanpassung eingeführt wurden. Weist dieser Querstreifen systematische Effekte auf, so zeigt anschliessend das gesamte Projekt eine Translation, welche anhand der Kontrollflächen ermittelt und korrigiert werden kann.

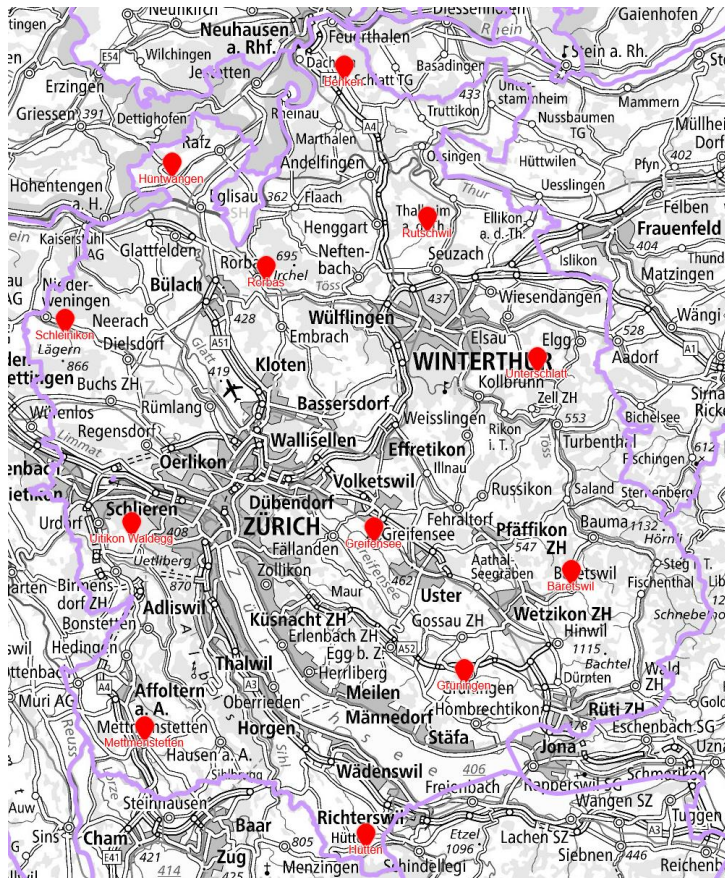


Abbildung 10: Verteilung der Kontrollzonen (Hintergrundkarte: © swisstopo)

5.5.1 Höhenkontrolle

Für die Höhenkontrolle wurden 280 Bodenpunkte verwendet. Für die automatische Kontrolle werden die gemessenen GNSS-Punkte mit der Höhe der lagemässig nächstliegenden Punkte der LiDAR-Punktwolke verglichen. Diese Kontrolle erfolgte in LHN95.

Es wurde eine systematische Differenz von einigen Zentimetern festgestellt und an die Punktwolke angebracht. Danach wurden folgende Ergebnisse für die Qualität der definitiven Lagerung erzielt:

Average dz	+0.003 m
Minimum dz	-0.085 m
Maximum dz	+0.064 m
Average magnitude	0.019 m
Root mean square	0.024 m

Abbildung 11: Ergebnis Höhenkontrolle in Kontrollzonen

Diese Werte sind als sehr gut zu bezeichnen und übertreffen die Projektanforderung von ± 10 cm Standardabweichung deutlich.

5.5.2 Lagekontrolle

Die Lagekontrolle gestaltet sich wesentlich schwieriger als die Höhenkontrolle, da LiDAR-Messungen nicht auf diskrete Punkte erfolgen. Am einfachsten erfolgt die Kontrolle über geneigte Dachflächen, die den Lagefehler visuell aufzeigen. Dabei kann jedes Dach nur die Abweichung rechtwinklig zur Firstrichtung anzeigen.

Bei der visuellen Kontrolle der Dachflächen konnte keine Systematik festgestellt werden. Die Differenzen zur vor Ort eingemessenen Lage der Dachflächen liegen sämtlich deutlich unter der geforderten Standardabweichung von ± 20 cm.

5.6 Punktdichte und Datenlücken

Die Daten des Nachflugs (siehe Kapitel 4) wurden scharf auf die Erfassungslücke zugeschnitten. Es wurde bewusst darauf verzichtet, die gesamte Fluglinie auszutauschen, da die Differenz im Aufnahmezeitpunkt gegenüber den benachbarten Linien zu Artefakten hätte führen können. Aufgrund der um $\pm 14^\circ$ gegenüber der Flugrichtung abgedrehten Ausrichtung der zwei Laserkanäle mussten die Daten je Kanal separat zugeschnitten werden. Die Erfassung ist nun nicht mehr erkennbar – weder in der Punktdichte noch in der Einpassung in die benachbarten Daten.

Die Abdeckung des Gebietes wurde nach der Befliegung aller Linien überprüft. Um das Gesamtprodukt zu dokumentieren wurde eine Punktdichtekarte mit Rasterweite 1x1 m erstellt. Diese beinhaltet alle gelieferten Punkte (siehe auch Kapitel 6.1). Wie aus der nachfolgenden Abbildung 12 ersichtlich ist, konnte die geforderte minimale mittlere Punktdichte von 16 pt/m² flächendeckend erfüllt werden. Im Total wurden 72.15 Mia. Punkte geliefert, was einer mittleren Gesamtpunktdichte von ca. 38.6 pt/m² entspricht. Werden nur die Boden- und Gebäudepunkte betrachtet – d.h. die ungefähre Anzahl ausgesendeter Laserpulse – so ergibt sich eine mittlere nominale Punktdichte von 24.5 pt/m².

Löcher mit einer Fläche von mehr als 20 m² wurden ab der Punktdichtekarte automatisch vektorisiert und in einer Shape-Datei dokumentiert. Das manuell vergebene Attribut ‚Grund‘ gibt hier die Ursache für die Datenlücke im DOM wieder. Folgende Datenlücken wurden festgestellt:

- 9'246 Wasserflächen von Seen, Bächen, Pools etc.
- 37 vernässte Oberflächen nach heftigen Regenfällen
- 41 Reflektierende Oberflächen (Glas- oder Metaldächer etc.)
- 5 Abschattungen durch Gebäude (keine Messung auf Grund des Betrachtungswinkels)

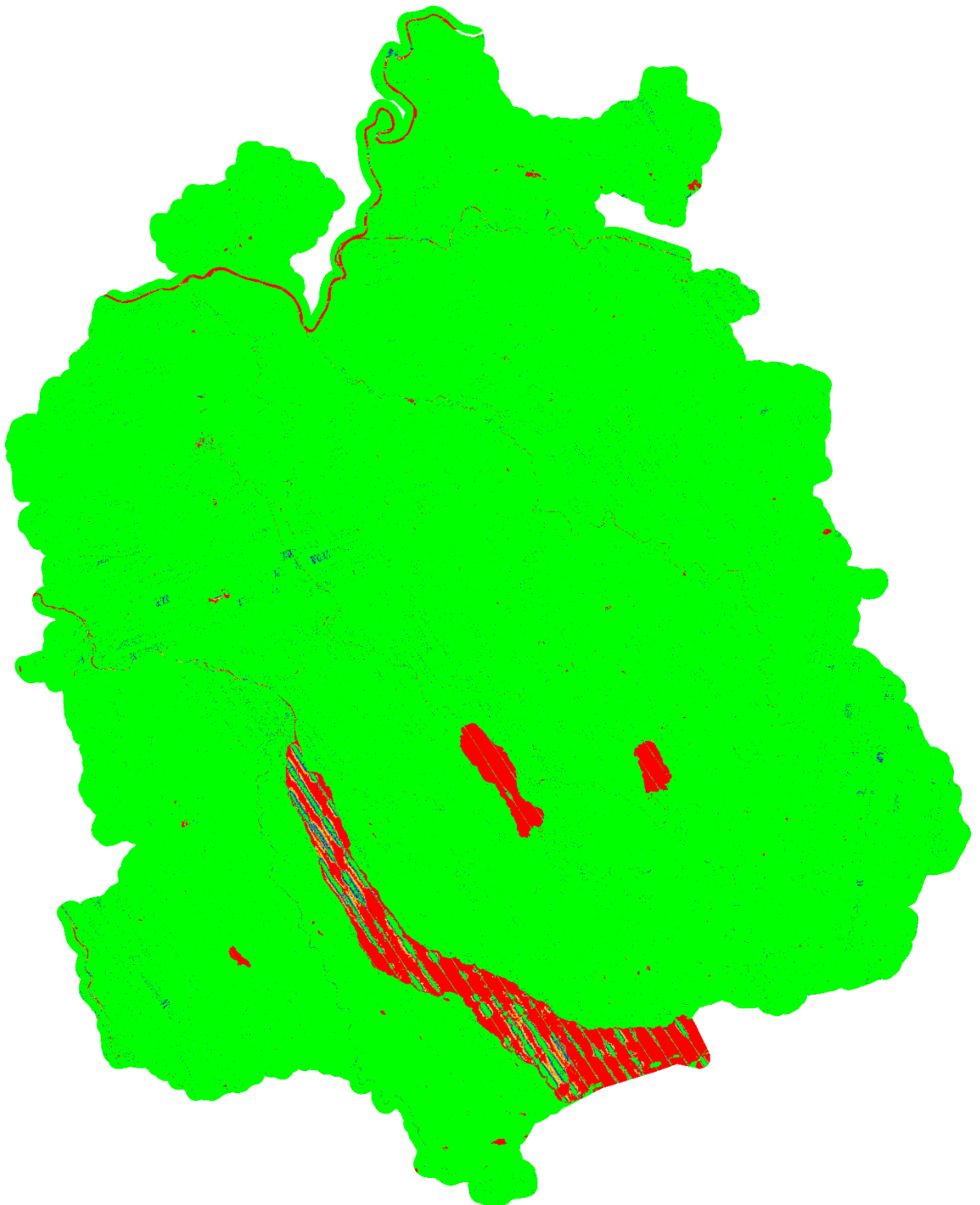


Abbildung 12: Punktdichtekarte (grün: $>16 \text{ pt/m}^2$, blau: 8-16, gelb: 1-8, rot: $<1 \text{ pt/m}^2$)

6 Punktwolkenklassierung

Die Klassierung der Punktwolke wurde durch ausgebildete Mitarbeiter eines Subunternehmers in Indien durchgeführt. Um ein homogenes Resultat zu erhalten, ist die Ausbildung der Operateure von zentraler Bedeutung. Hier werden regelmässige Arbeitsanweisungen und Kontrollen durchgeführt. Die Flotron AG hat stichprobenweise die Klassierung überprüft.

6.1 Öffnungswinkel

Gemäss Ausschreibung darf nur ein Öffnungswinkel von $\pm 20^\circ$ verwendet werden. Der Riegl VQ-1560II zeichnet allerdings Daten in einem Öffnungswinkel von $\pm 58.5^\circ$ auf. Mit dem vollen Öffnungswinkel wurde eine praktisch vollständige Überlappung der benachbarten Linien erreicht, womit fast jeder Ort am Boden aus mindestens zwei Blickrichtungen betrachtet wurde.

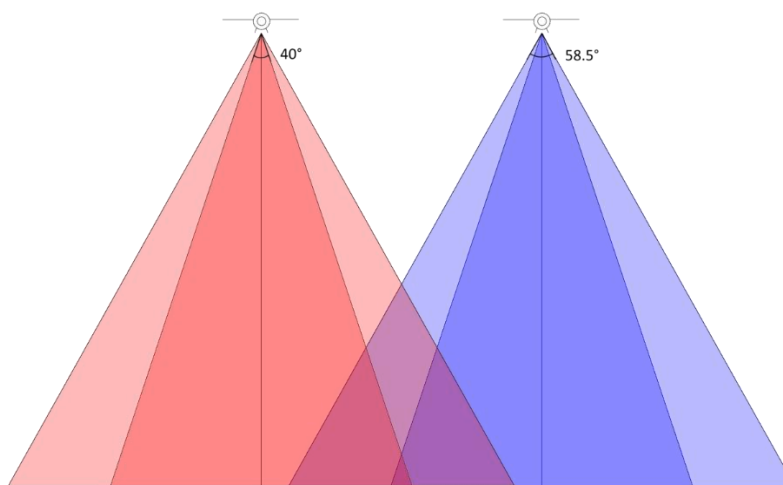


Abbildung 13: Schematische Darstellung der Überlappung mit reduziertem und mit vollem Öffnungswinkel bei minimaler Querüberlappung

Würden alle Daten des vollen Öffnungswinkels benützt, so würde sich eine erheblich grössere Datenmenge und ein deutlicher Zusatzaufwand bei der Prozessierung und Klassierung ergeben. Gemäss einer Zusatzofferte wurde eine Variante gewählt, bei welcher die Daten ausserhalb des erlaubten Öffnungswinkels zum Auffüllen von abgeschatteten Flächen verwendet wurden. Damit kann das DTM insbesondere neben Gebäuden und Einzelbäumen oder im Wald erheblich verbessert werden.

Hierfür wurden die Last-/Only-Pulse-Echos innerhalb von $\pm 20^\circ$ auf Datenlücken analysiert. Wo eine Lücke über einem Meter Durchmesser auftrat, wurden die Last-/Only-Pulse-Echos des erweiterten Öffnungswinkels eingefügt. Alle anderen Daten ausserhalb $\pm 20^\circ$ Öffnungswinkel wurden vor der Klassierung gelöscht und sind damit im Endprodukt nicht enthalten.

6.2 Punktklassen

Für das gesamte Projekt gilt folgende Punktklassendefinition (nach ASPRS-LAS-Standard 1.4, angepasst für projektspezifische Klassen):

Klasse	Beschreibung	DTM	DOM
1	Sonstiges / undefiniert		
2	Bodenpunkte inkl. Wasseroberflächen	X	X
3	Vegetation tief (<0.5m)		
4	Vegetation mittel (0.5-3m)		X
5	Vegetation hoch (>3m)		X
6	Gebäude		X
7	Punkte unter Boden, Fehlmessungen		
15	Hochspannungsleitungen, Antennen		
17	Brücken		X

Sämtliche Datensätze der Endlieferung sind mit dieser Klassenzuordnung versehen. D.h. zum Beispiel ein Punkt mit Identifikator 2 ist als Bodenpunkt klassiert worden.

Nachfolgend sind einige kurze Erläuterungen zu den Punktklassen aufgeführt.

1 Sonstiges / undefiniert

Diese Klasse enthält alle gemessenen Punkte, welche nicht einer anderen Klasse zugeordnet werden können. Dies beinhaltet unter anderem temporäre Objekte (Autos, Personen etc.), dauerhafte Objekte ohne eigene Klasse (Mauern, Spezialbauten) sowie alle Punkte, die durch den Operateur nicht eindeutig einer der anderen Klassen zugewiesen werden können.

2 Boden

Die Klasse Boden beinhaltet alle auf Bodenniveau gemessenen Punkte, inkl. Messrauschen. Auf Flächen mit niedriger Vegetation kann diese teilweise in den Bodenpunkten enthalten sein. Die Wasserflächen wurden, sofern dort Messpunkte aufgenommen werden konnten, ebenfalls der Klasse 2 zugewiesen.

3 Tiefe Vegetation

Diese Klasse stellt die Vegetation mit einer Höhe von max. 50 cm über Grund dar. Diese Klasse wurde automatisch erstellt und nicht manuell kontrolliert.

4 Mittlere Vegetation

Diese Klasse stellt die Vegetation mit einer Höhe über Grund von 0.5 bis 3.0m dar. In dieser Höhe sind sehr viele temporäre Objekte (Autos, Personen, Zäune, etc.) vorhanden. Diese wurden bei der Klassierung manuell bereinigt. Aufgrund der Menge der Fremdobjekte und der Schwierigkeit, diese zuverlässig in der Punktwolke zu erkennen, ist jedoch keine perfekte Klassierung möglich. Damit beinhaltet diese Klasse die meisten Fehlklassierungen.

5 Hohe Vegetation

Diese Klasse wurde sorgfältig visuell kontrolliert. D.h. hier sollte nur Vegetation (ab 3 m über Boden) enthalten sein.

6 Gebäudedächer

In dieser Klasse wurden die Gebäude abgebildet - inkl. Dachaufbauten und Fassaden. Die Gebäudedächer werden grösstenteils automatisch klassiert und sorgfältig manuell kontrolliert/korrigiert. Der Blickwinkel der Aufnahmen erlaubt es nicht, eine Unterscheidung zwischen Unterständen und Gebäuden zu machen, da nicht unter die Dächer gesehen werden kann.

Durch den Operateur als Fahrnisbauten o.ä. identifizierte Objekte werden in der Klasse 1 „Sonstiges“ klassiert.

7 Punkte unter Boden, Fehlmessungen

In dieser Klasse wurden Messpunkte, welche keine realen Objekte abbilden abgelegt, es kann sich dabei um Luftpunkte oder um Punkte unter dem Bodenniveau handeln. Ebenfalls finden sich hier Punkte, welche unterhalb des „gewachsenen“ Geländes liegen und deshalb im DTM nicht abgebildet werden sollen (Schächte etc.). Grössere Objekte unterhalb Bodenniveau (Rampen zu Tiefgaragen, Innenhöfe etc.) wurden in der Bodenklasse belassen.

15 Hochspannungsleitungen, Antennen

Grosse Freileitungen (nicht Telefon- oder Niederspannungsleitungen) wurden inklusive Masten dieser Klasse zugeordnet. Im DOM werden sie nicht verwendet, um darunterliegende Objekte nicht zu verdecken und weil sie z.T. nicht durchgehend vom Laser erfasst werden konnten.

Grosse Radio- und Mobilfunk-Antennen o.ä. mit eigenen Masten wurden ebenfalls auf dieser Klasse abgelegt. Kleinere Antennen auf Gebäudedächern wurden nicht separat behandelt.

17 Brücken

Die Brücken wurden in diese Klasse zugewiesen. Unterhalb der Brücken wurde das DTM nicht korrigiert (d.h. keine synthetischen Punkte eingeführt).

6.3 Methodik

Die Klassifikation erfolgt unter Zuhilfenahme der Programme TerraScan und TerraModeler von TerraSolid.

Die Klassifikation läuft grob in folgenden Schritten ab:

- Automatische Identifikation von isolierten Punkten (Fehlmessungen)
- Grobe Boden-Klassierung (automatisch)
- Automatische Identifikation von Punkten unter dem Gelände (Fehlmessungen, Schächte etc.)
- Detaillierte Klassierung des Bodens mit manuellen Kontrollen/Nachbesserungen
- Manuelle Klassierung der Brücken
- Automatische Klassierung der Gebäude
- Aufteilung der Vegetation nach ihrer Höhe ab Boden (automatisch)
- Manuelle Korrekturen der Vegetation, eliminieren von verbliebenen Gebäuden und sonstigen Objekten

Trotz ausgeklügelter Algorithmen müssen alle Klassen manuell kontrolliert und ggf. korrigiert werden. Die Kachelränder erfordern besondere Aufmerksamkeit: Hier wird stets mit überlappenden Daten gearbeitet, um einen möglichst nahtlosen Übergang zwischen den Kacheln zu ermöglichen.

7 Rasterprodukte

7.1 Interpolation Digitales Terrainmodell DTM

Das DTM bildet das „gewachsene“ Gelände ab, d.h. die Erdoberfläche ohne künstliche Bebauung und ohne Vegetation. Hierzu wurde die Klasse 2 „Boden“ der klassierten Punktwolke verwendet. Die Interpolation zwischen den einzelnen Punkten der Punktwolke wurde mittels Delaunay-Triangulation durchgeführt. Anschliessend wurde für den Mittelpunkt jeder Rasterzelle ein Höhenwert interpoliert. Die Ausgabe erfolgt als TIF-Raster in 500 x 500 m-Kacheln.

Für die Berechnung der Höhenwerte arbeitet die Software TerraModeller mit einem Puffer an den Kachelrändern. Das exportierte Endprodukt wird aber wieder scharf auf die Kachelränder zugeschnitten. Damit wird sichergestellt, dass die generierten DTM-Kacheln nahtlos aneinander passen. Die Boden-Klasse der Punktwolke enthält „natürliche“ Datenlücken, zum Beispiel unter Gebäuden oder Brücken sowie in Gewässern. Diese werden mittels Triangulation der Bodenpunkte geschlossen. Die Geländehöhen in diesen Bereichen sind folglich interpoliert.



Abbildung 14: DTM im Bereich von Gebäuden

7.2 Rastergenerierung Digitales Oberflächenmodell DOM

Zur Berechnung des DOM werden die Klassen Boden, Vegetation mittel + hoch, Gebäude und Brücken der klassierten Punktwolke verwendet (Nrn. 2, 4, 5, 6, 17). Eine Interpolation des DOM analog zum DTM würde vor allem im Waldgebiet zu einer sehr unruhigen Oberfläche führen. Deshalb wird das DOM anhand des höchsten Punktes innerhalb jeder Rasterzelle berechnet.

Es wird ein Spikefree-Algorithmus angewendet, welcher insbesondere scharfe Kanten (Dachkanten, Brückenränder) sehr gut abbildet. Lücken über 5 m² im DOM wurden mit Informationen des triangulierten DTM aufgefüllt, dies betraf insbesondere die Wasserflächen.

7.3 Vegetationshöhenmodell

Dieses Modell entsteht aus der Subtraktion des Geländemodells vom Oberflächenmodell. Um Fehler durch Kunstbauten auszuschliessen, wurde ein separates Oberflächenmodell DOMv berechnet, welches nur die Vegetationsklassen (Nrn. 4 + 5) und die Bodenpunkte berücksichtigt.

Da die Berechnungsmethoden von DTM und DOMv sich leicht unterscheiden, würde Flächendeckend eine Höhendifferenz ausgewiesen. Deshalb werden Höhendifferenzen unter 0.5 m auf Null gesetzt (entspricht der Höhe der Klasse 3 „Tiefe Vegetation/Rauschen“).

Hinzu kommt, dass Bäume am See- und Flussufer sowie neben Gebäuden zu den nächsten Boden- und Vegetationspunkten trianguliert werden und somit „Rampen“ entstehen (siehe nachfolgende Abbildung). Aufgrund dieser Triangulation würden an vielen Orten Vegetationshöhen ausgewiesen, wo keine Vegetation vorhanden ist. Deshalb wurde das Differenzmodell zugeschnitten auf diejenigen Rasterzellen, welche in der Punktwolke auch tatsächlich Vegetationspunkte enthalten. Kleinstflächen unter 0.25 m² im Vegetationshöhenmodell wurden ebenfalls bereinigt.

Alle Bereiche ohne Vegetation wurden mit dem Wert 0 gefüllt.

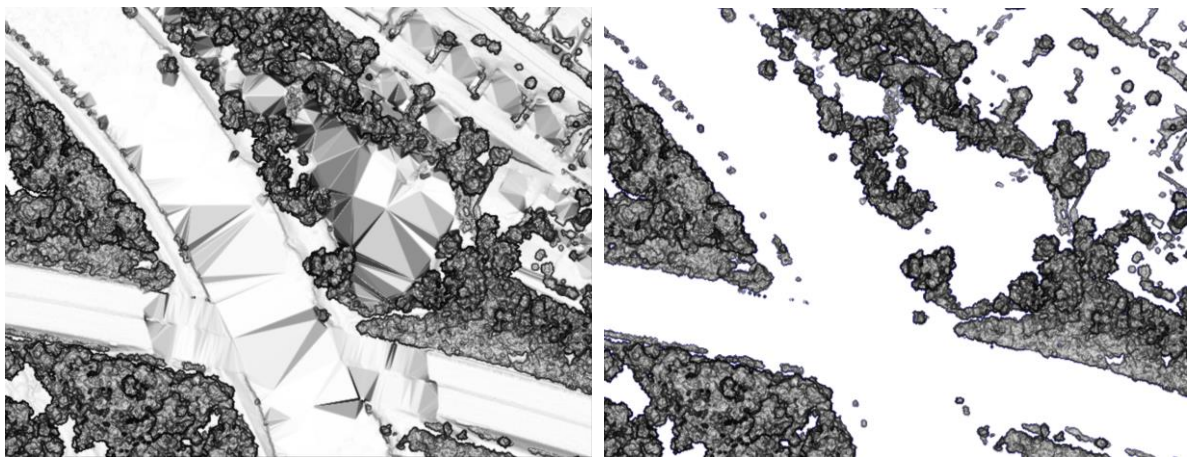


Abbildung 15: Triangulation im Vegetations-DOM und resultierendes Vegetationshöhenmodell

7.4 Gebäudehöhenmodell

Dieses Modell wurde analog zum Vegetationshöhenmodell berechnet, allerdings kommen beim DOMg die Klassen Boden und Gebäude zum Zug. Auch dieses Modell wurde auf diejenigen Rasterzellen zugeschnitten, welche in der Punktwolke Gebäudepunkte enthalten.

Dadurch, dass im DTM die Gebäude „zutrianguliert“ werden, ist es bei Gebäuden am Hang normal, dass auch Flachdächer einen Höhenverlauf aufweisen.

7.5 Hangneigungsraster

Die Hangneigungsraster wurden in zwei Versionen berechnet. In der ersten Version enthalten die Pixel die Neigungswerte in Bogengrad, in der zweiten sind die Neigungswerte in Prozent ausgedrückt. Als Grundlage diente das DTM-Raster (0.25 x 0.25 m) unter Berücksichtigung der benachbarten Kacheln. Die Berechnungen erfolgten in der Software FME mit dem Horn-Algorithmus. Die resultierenden Neigungsraster wurden auf eine Auflösung von 1.0 x 1.0 m reduziert, wobei eine Mittelung der zugrunde liegenden 16 Rasterzellen durchgeführt wurde.

Beide Raster wurden danach mit FME in 5°- resp. 5%-Schritte klassiert. Anschliessend wurden diese klassierten Raster vektorisiert und attribuiert.

8 Transformation / Differenzen LHN95 vs. LN02

8.1 Ausgangslage und Methode

Es wird von Seiten der Abteilung für Geoinformation angenommen, dass z.T. grössere Differenzen zwischen den Kantonalen Nivellementsfixpunkten und mittels HTRANS ins Gebrauchshöhensystem transformierten GNSS-Höhen bestehen. Diese Differenzen sollen im Rahmen des LiDAR-Projekts untersucht werden. Falls grössere Differenzen vorhanden sind, müsste eine Anwendung einer verfeinerten Transformation zwischen LHN95 und LN02 in Erwägung gezogen werden.

Um eine Abschätzung der Transformationsgenauigkeit mittels HTRANS durchzuführen, wurden an den Standorten der Passpunkte gemäss Kapitel 5.5 Differenzen zwischen nivellierten und berechneten Höhen erhoben. Das Verfahren dazu war folgendes:

- Einmessung von temporären Fixpunkten in LHN95 mittels GNSS
- Freie Stationierung eines Tachymeters mit min. dreier solcher temporären Fixpunkte
- Reflektorlose Messung des Höhenfixpunkts
- Transformation der so bestimmten LHN95 Höhe mittels HTRANS
- Vergleich zwischen der nivellierten und der Berechneten LN02-Höhe

Bei der Wahl der Passpunkte wurde darauf geachtet, dass diese möglichst in den Lücken zwischen den Stützpunkten des HTRANS-Rasters platziert werden. Ausserdem sollte eine möglichst gute Verteilung über das Kantonsgebiet erreicht werden.

8.2 Genauigkeitsabschätzung

Die Aussagekraft der Differenzen zwischen transformierten und nivellierten Höhen hängt stark von der Erfassungsgenauigkeit des HFP in LHN95 ab. Deshalb erfolgt hier eine kleine Genauigkeitsabschätzung der oben beschriebenen Methodik.

- Genauigkeitsannahmen:
 - Höhengenaugigkeit der GNSS-Messung mittels Swipos-RTK bei Verwendung von GPS, GLONASS, Galileo und Beidou: $\sigma_{GNSS} \approx 2.5 \text{ cm}$
 - Tachymetrische Messung auf Prisma mit ATR, Stativ: $\sigma_{Prisma} \approx 0.2 \text{ cm}$
 - Tachymetrische Messung des HFP2 (Reflektorlos): $\sigma_{RL} \approx 0.3 \text{ cm}$
 - Höhengenaugigkeit HFP2 in LN02 (gemäss Protokollen): $\sigma_{HFP, LN02} \approx 0.3 \text{ cm}$
- Höhengenaugigkeit der freien Stationierung über drei Fixpunkte:

$$\sigma_{FS} = \frac{\sqrt{\sigma_{GNSS}^2 + \sigma_{Prisma}^2}}{\sqrt{3}} \approx 1.45 \text{ cm}$$

- Bestimmungsgenauigkeit des HFP2 in LHN95:

$$\sigma_{HFP, LHN95} = \sqrt{\sigma_{FS}^2 + \sigma_{RL}^2} \approx 1.48 \text{ cm}$$

- Genauigkeit der berechneten Differenz zwischen LHN95 und LN02 (nivelliert):

$$\sigma_{\Delta} = \sqrt{\sigma_{HFP, LHN95}^2 + \sigma_{HFP, LN02}^2} \approx 1.51 \text{ cm}$$

Die Fehlerfortpflanzung zeigt, dass fast nur die Genauigkeit der Höhenbestimmung mittels GNSS Einfluss hat. Es kann davon ausgegangen werden, dass Höhendifferenzen zwischen der transformierten und nivellierten Höhe unter 4 cm nicht signifikant sind.

8.3 Resultate

Folgende Tabelle zeigt die Messwerte und Differenzen der untersuchten HFP2:

HFP-Nr.	Standort	GNSS Höhe LHN95	HTRANS Höhe LN02	Niv. Höhe LN02	Differenz [mm]
K1135	Hütten	733.864	733.918	733.945	27
K1096	Schleinikon	472.963	473.091	473.119	28
K1163	Uitikon	557.316	557.416	557.466	50
K12a	Mettmenst.	467.970	468.055	468.074	19
KGN33	Grüningen	509.717	509.802	509.822	20
K1116	Bäretswil	703.195	703.277	703.306	29
K716d	Greifensee	441.986	442.101	442.085	-16
K995	Unterschlatt	659.919	660.024	660.056	32
K1056	Rutschwil	458.189	458.320	458.333	13
K1196	Benken	421.167	421.334	421.335	1
K94d	Hüntwangen	386.181	386.335	386.344	9
K270b	Rorbas	373.397	373.536	373.557	21

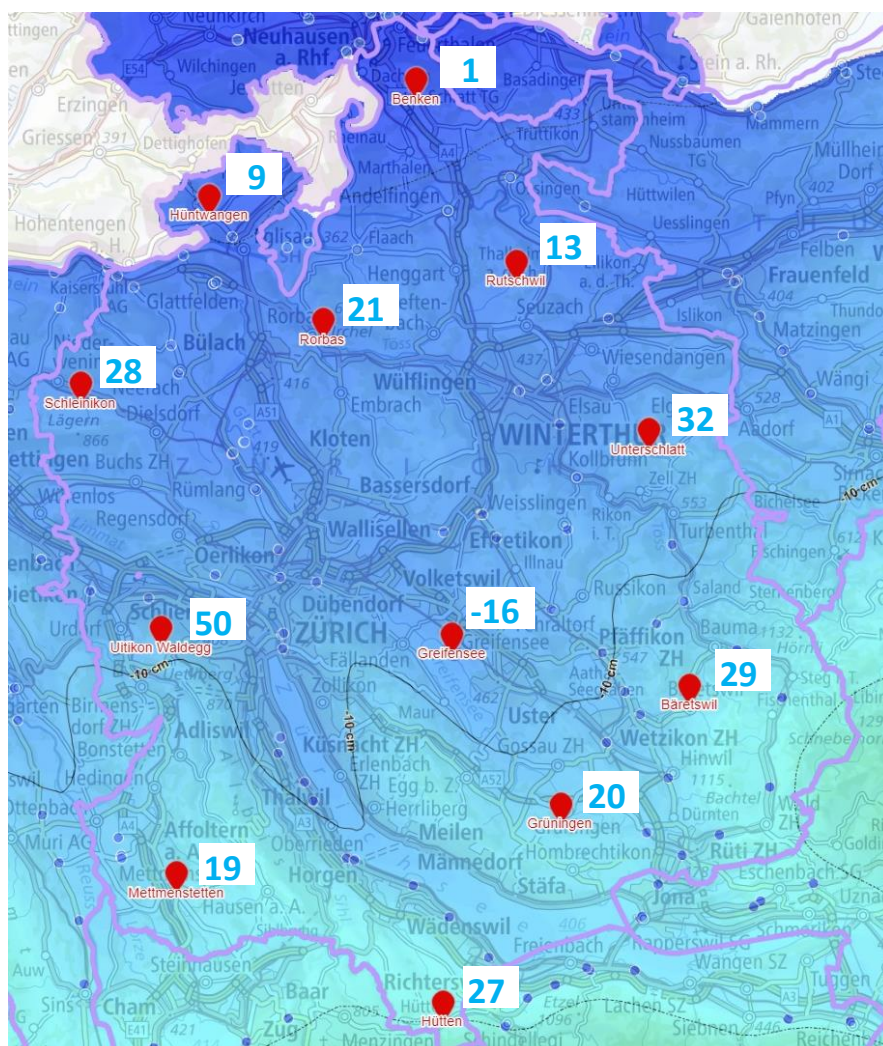


Abbildung 16: Kontrollpunkte HTRANS vs. LN02 mit Abweichungen in Millimetern

Einzig der Punkt K1163 zeigt eine signifikante Differenz zwischen der nivellierten Höhe und der transformierten Höhe. Gemäss nachfolgender Karte liegt dieser Punkt eher nahe an Stützpunkten des HTRANS-Rasters, deshalb könnte es sich hier auch um einen Ausreisser, eine Fehlmessung oder einen instabilen HFP handeln.

Die anderen Werte liegen mehrheitlich deutlich unter der Signifikanzschwelle. Es fällt aber auf, dass fast alle Differenzen positiv sind. Da die Messung über drei Tage verteilt durchgeführt wurde, ist eine Systematik des GNSS-Signals unwahrscheinlich.

In Anbetracht der nicht-signifikanten Differenzen ist die Anwendung einer verfeinerten Transformation zwischen LHN95 und LN02 nicht angebracht.

Aufgrund der festgestellten Werte und der Genauigkeit der Differenzen zwischen LHN95-Messungen und den nivellierten LN02-Höhen, kann davon ausgegangen werden, dass die Transformationsgenauigkeit (einfache Standardabweichung) von HTRANS im Kanton Zürich in der Grössenordnung von ca. 2.0-2.5 cm liegt.

9 Höhenkurven (Testgebiet)

9.1 Berechnung

Die Höhenkurven werden aus der Klasse 2 «Boden» der Punktwolke abgeleitet. Hierzu wird die Bodenklasse mittels eines Makros vorbereitet. Dabei werden kleinere Lichtschächte und Kellertreppen automatisch aus der Bodenklasse entfernt.

Anschliessend werden die Bodenpunkte in der Software TerraSolid auf die sogenannten «Model Key Points» ausgedünnt. Dies sind diejenigen LiDAR-Punkte, die für die korrekte und geglättete Berechnung von 5 m-Höhenkurven relevant sind.

Diese Model Key Points werden anschliessend trianguliert. Dabei wird auf eine Überlappung von 200 m zwischen den Kacheln geachtet, um einen nahtlosen Übergang zu gewährleisten. Die Höhenkurven werden von TerraSolid auf diesem triangulierten Modell berechnet. Zudem wird die Option «smoothing» benutzt, um glattere Kurven zu erhalten. Das Datenvolumen wird durch das Löschen von irrelevanten Stützpunkten reduziert. Erhebungen und Senken unter einer Fläche von 100 m² werden ausgeschlossen.

9.2 Vergleich mit bestehendem Übersichtsplan

Die neu berechneten Höhenkurven zeigen im geneigten Gelände eine geringfügig grössere Detaillierung. Allerdings waren die bisherigen Kurven für den Massstab 1:5000 eher glatt gewählt. Die grössten Differenzen zwischen den Höhenkurven ergeben sich in flachem Gelände – hier besteht bei automatisch generierten Kurven die Gefahr, dass diese scheinbar willkürliche Formen annehmen und teilweise merkwürdige Senken und Hügel abbilden. Dies ist eine logische Folge von kleinsten Geländevariationen, welche dazu führen, dass die gesuchte runde Geländehöhe mehrfach geringfügig durchstossen wird, bevor sie endgültig überschritten wird. Die Bereinigung dieser Effekte ist in einem automatischen Verfahren äusserst schwierig umzusetzen, ohne gleichzeitig die Qualität der Höhekurven in stärker geneigtem Gelände deutlich zu verschlechtern.

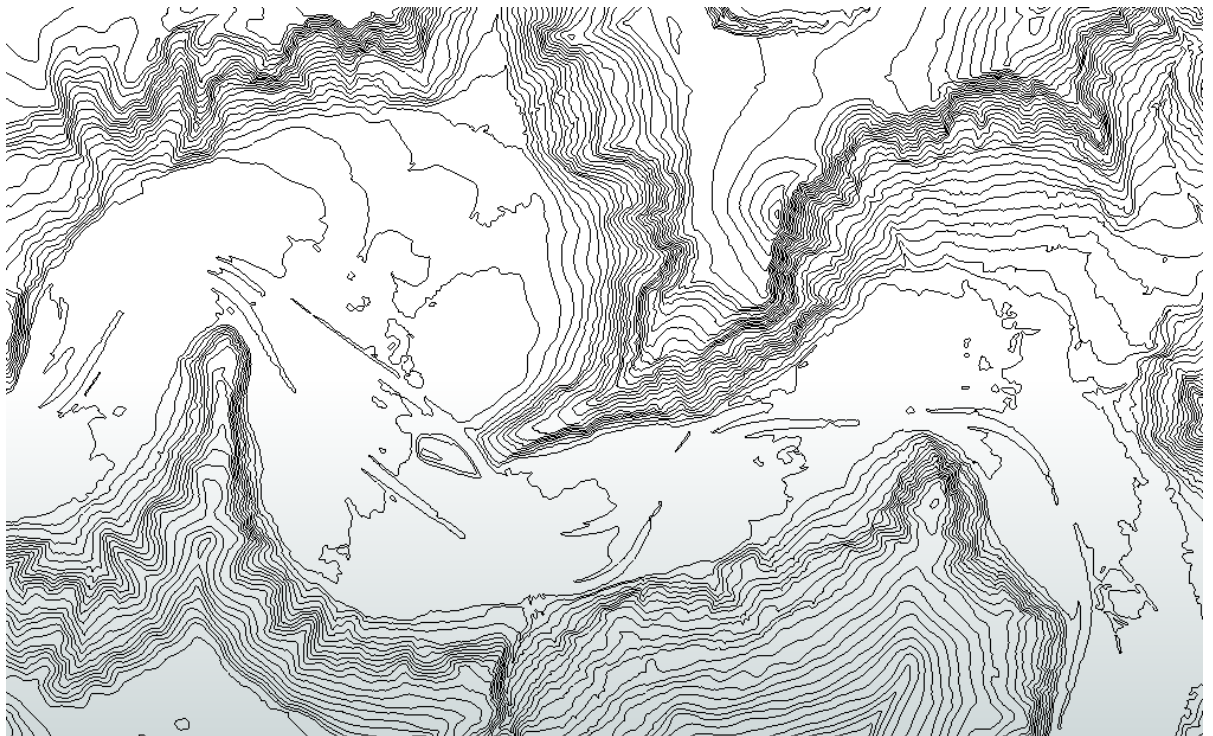


Abbildung 17: Höhenkurven in steilem und flachem Gelände (Äquidistanz 5 m)

Eine weitere Differenz der Höhenkurven zeigt sich theoretisch bei Kiesgruben und Grossbaustellen (>100 m²). Da diese in der Bodenklasse der Punktwolke abgebildet werden, würden automatische Höhenkurven den zum Zeitpunkt der Befliegung vorhandenen Geländeformen entsprechen. Bei den manuell erstellten Höhenkurven des Übersichtsplans wurden solche temporären Geländeformen durch den Operateur bereinigt.

Der bisherige Übersichtsplan verwendet Kurven mit einer Äquidistanz von 10 m. In flacherem Gelände wurden teilweise Zwischenkurven mit 5 m Äquidistanz eingefügt. Unserer Ansicht nach könnte auch flächendeckend mit 5 m-Höhenkurven gearbeitet werden. Bei Bedarf können aber in steilem Gebiet die 5 m-Höhenkurven automatisch ausgespart werden.

9.3 Fazit Höhenkurven

Die automatisch erstellten Höhenkurven eignen sich für ein «technisches» Produkt, können aber bezüglich der ansprechenden Darstellung in flachem Gelände nicht mit manuell bereinigten Höhenkurven mithalten. In steilem Gelände ist die Qualität vergleichbar.

Mit einer manuellen Korrektur der sehr geringfügigen Hebungen und Senken in flachem Gelände kann eine deutliche Verbesserung der Lesbarkeit erreicht werden. Die Korrektur der etwas willkürlichen Kurvenverläufe in flachem Gelände würde aber einen deutlichen Arbeitsaufwand bedeuten. Hier muss die Abwägung zwischen dem Aufwand und einer «schönen» Darstellung erfolgen.

Da der Übersichtsplan mit einer Äquidistanz von 5-10 m arbeitet, haben nur sehr grosse Geländebewegungen (Grossbaustellen, geologische Prozesse) einen entscheidenden Einfluss auf die Höhenkurven. Deshalb ist eine Aktualisierung nur in sehr grossen Zeitabständen oder Punktuell nötig. Daher gilt es abzuwägen zwischen dem Aufwand und der erreichten Genauigkeitssteigerung / Aktualität.

10 Datenlieferung / Datenformate

Die Datenlieferung erfolgt hauptsächlich im Projektionssystem LV95 mit Höhenbezugssystem LN02. Einzig die Punktwolke wird auch in LHN95 geliefert.

Das Projekt umfasst 7784 Kacheln à 500 x 500 m. Die Bezeichnung der Kacheln richtet sich jeweils an der Koordinate der südwestlichen Ecke der Kacheln (minimaler Koordinatenwert). Die Kacheln 2701000_1229500, 2702500_1230000, 2703500_1232000 und 2703500_1232500 enthalten innerhalb des Projektperimeters keine Messpunkte, da sie auf der Perimetergrenze im Zürichsee liegen. Deshalb werden diese Kacheln nicht als Punktwolke geliefert. Die Rasterprodukte dieser Kacheln konnten mit Hilfe von Punkten ausserhalb des Perimeters erstellt werden.

Die Datenlieferung umfasst folgende Produkte und Qualitätssicherungs-Dokumente:

01 Punktwolke LHN95

- Datenformat: ASPRS LAS Version 1.4 (Point Record Format 6)
- Zeitstempel: GPS Standard Time
- Klassiert gemäss Kapitel 6
- Koordinatensystem: LV95 / LHN95 (orthometrische Höhen)
- Anzahl Kacheln: 7780 (4 Kacheln leer)

02 Punktwolke LN02

- Datenformat: ASPRS LAS Version 1.4 (Point Record Format 6)
- Zeitstempel: GPS Standard Time
- Klassiert gemäss Kapitel 6
- Koordinatensystem: LV95 / LN02 (Gebrauchshöhen, mit HTRANS transformiert)
- Anzahl Kacheln: 7780 (4 Kacheln leer)

03 Raster-Höhenmodelle DTM

- Datenformat: GeoTIFF mit World-Datei (TFW)
- Rasterweite: 25 x 25 cm
- Koordinatensystem: LV95 / LN02 (Gebrauchshöhen, mit HTRANS transformiert)
- Gemäss Kapitel 7.1 **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** aus der Punktwolke abgeleitet

04 Raster-Höhenmodelle DOM

- Datenformat: GeoTIFF mit World-Datei (TFW)
- Rasterweite: 25 x 25 cm
- Koordinatensystem: LV95 / LN02 (Gebrauchshöhen, mit HTRANS transformiert)
- Gemäss Kapitel 7.2 aus der Punktwolke abgeleitet

05 Vegetationshöhenmodell

- Datenformat: GeoTIFF mit World-Datei (TFW)
- Rasterweite: 25 x 25 cm
- Gemäss Kapitel 7.3 aus der Punktwolke abgeleitet
- Anzahl Kacheln: 7563 (221 Kacheln ohne Punkte in den Klassen 4+5)

06 Gebäudehöhenmodell

- Datenformat: GeoTIFF mit World-Datei (TFW)
- Rasterweite: 25 x 25 cm
- Gemäss Kapitel 7.4 aus der Punktwolke abgeleitet
- Anzahl Kacheln: 6825 (959 Kacheln ohne Gebäude)

07 Hangneigung

- Datenformat:
 - Kontinuierliche Raster: GeoTIFF mit World-Datei (TFW)
 - Klassierte Raster: ESRI Shapefile (Flächen)
- Rasterweite: 1.0 x 1.0 m
- Gemäss Kapitel 7.5 aus dem Geländemodell abgeleitet

08 Datenlücken > 20m2

- Format: ESRI Shapefile (Flächen)
- Details siehe Kapitel 5.6

09 Punktdichtekarten

- Datenformat: GeoTIFF
- Rasterweite: 1.0 x 1.0 m
- Details siehe Kapitel 5.6

10 Höhenkurven

- Datenformat: ESRI Shapefile (Linien)
- Koordinatensystem: LV95 / LHN95 (orthometrische Höhen)
- Details siehe Kapitel 9

11 Flugwege

- Datenformat: ESRI Shapefile (Punkte)
- Intervall: 5 Sekunden
- Koordinatensystem: LV95 / LHN95 (orthometrische Höhen)

11 Kurzbeurteilung des Projekts

Diese Beurteilung stellt den Projektablauf aus Sicht des Unternehmers dar:

- Die Ausschreibung des Projektes erfolgte im Sommer 2019. Zwischen Ausschreibung und Durchführung der Befliegung hat sich die Technologie weiterentwickelt, deshalb waren Anpassungen am Flugplan nötig.
- Die Situation im Luftraum von Zürich hat sich aufgrund der Coronapandemie zum einen vereinfacht (weniger Luftverkehr) zum anderen erschwert, da kleinere Flugplätze in der Umgebung ihre Nachtflugaktivitäten komplett eingestellt hatten.
- Die frühen Schneefälle im Herbst 2021 verunmöglichten den Plan, alle hohen Linien vor dem Wintereinbruch zu befliegen. Deshalb mussten diese Linien nach der Schneeschmelze geflogen werden, was das Gesamtprojekt verzögerte.
- Die Verwendung des vollen Öffnungswinkels des Laserscanners zum Auffüllen der Datenlücken führte dazu, dass nur 5 Datenlücken über 20 m² aufgrund von Abschattungen auftraten (oder eine Lücke pro 370 km²).
- Die Klassierung der Punktwolke wurde zwischen Februar und Mai 2022 bei unserem Partner in Indien erfolgreich und mit einer sehr hohen Qualität durchgeführt.
- Die Datenlieferung erfolgte pünktlich Ende August 2022.

Die Firma Flotron AG bedankt sich für den geschätzten Auftrag. Die Zusammenarbeit mit dem Auftraggeber und der Verifikationsstelle war angenehm und lehrreich.

Meiringen, 15. August 2022

Flotron AG

Johannes Gerber