

Amt für Wald (KAWA)

LiDAR Bern

Airborne Laserscanning

Gesamtbericht Befliegung

Befliegung Kanton Bern 2011 bis 2014



20. Mai 2015

Inhaltsverzeichnis:

1	Management Summary LiDAR Bern 2011 – 2014	4
2	Berner Jura 2011	5
2.1	Ausgangslage	5
2.2	Flugplanung	7
2.3	Befliegung - Durchführung	13
2.4	Punktwolkenklassierung	24
2.5	Verifikation	27
2.6	Nachprozessierung nach Verifikation	28
2.7	Definitive Datenlieferung	31
2.8	Beurteilung Berner Jura 2011	33
3	Etappe 1 – östlicher Kantonsteil 2012	34
3.1	Ausgangslage	34
3.2	Flugplanung	36
3.3	Befliegung – Durchführung	44
3.4	Geometriekontrolle	54
3.5	Punktwolkenklassierung	57
3.6	Datenabgabe	57
3.7	Beurteilung Etappe 1 2012	58
4	Etappe2 – westlicher Kantonsteil 2013/2014	59
4.1	Ausgangslage	59
4.2	Flugplanung	61
4.3	Durchführung der Befliegung 2013	65
4.4	Durchführung der Befliegung Frühjahr 2014	71
4.5	Durchführung der Befliegung Herbst 2014	72
4.6	Nachflug Etappe 1	79
4.7	Beurteilung Etappe 2 2013/2014	81
5	Übersicht Gesamtprojekt - Kennzahlen	82
5.1	Technische Kennzahlen – Gesamtprojekt	82
5.2	Höhen- und Lagegenauigkeit	83
5.3	Unabhängige Höhenkontrolle / Nachweis Höhengenaugigkeit	84
5.4	Schlussbemerkung	85

Anhangsverzeichnis

A1:	Vergleich Kontrollflächen Gesamtprojekt
A2:	ASTEC Projektbericht Kanton-Bern Etappe1
A3:	ASTEC Projektbericht Kanton-Bern Etappe2 Hochlagen

Dokumenteninformation:

Auftragsnummer: 2012166
Dokumentenname: 2012166_gesamtbericht_befliegung_lidar_bern.docx
Autor: Adrian Annen
Speicherdatum: 20.05.2015 15:45
Druckdatum: 20.05.2015 15:45
Empfänger: Amt für Wald (KAWA)
Kanton Bern
Laupenstrasse 22
3011 Bern

1 Management Summary LiDAR Bern 2011 – 2014

Im Frühjahr 2011 wurde die Flotron AG mit dem Pilotprojekt „ALS Berner Jura“ beauftragt. Ziel war die Erfassung einer 3D-Punktwolke mittels Airborne Laserscanning (LiDAR). Die erfolgreiche Durchführung führte zu einer Erweiterung des Perimeters über den gesamten Kanton (Flächen über 2000m.ü.M. ausgenommen). Die Flotron AG hat in Zusammenarbeit mit mehreren Unterakkordanten ab Frühjahr 2012 den östlichen Teil des Kantons befliegen. In den Jahren 2013 bzw. 2014 folgte der westliche Teil.

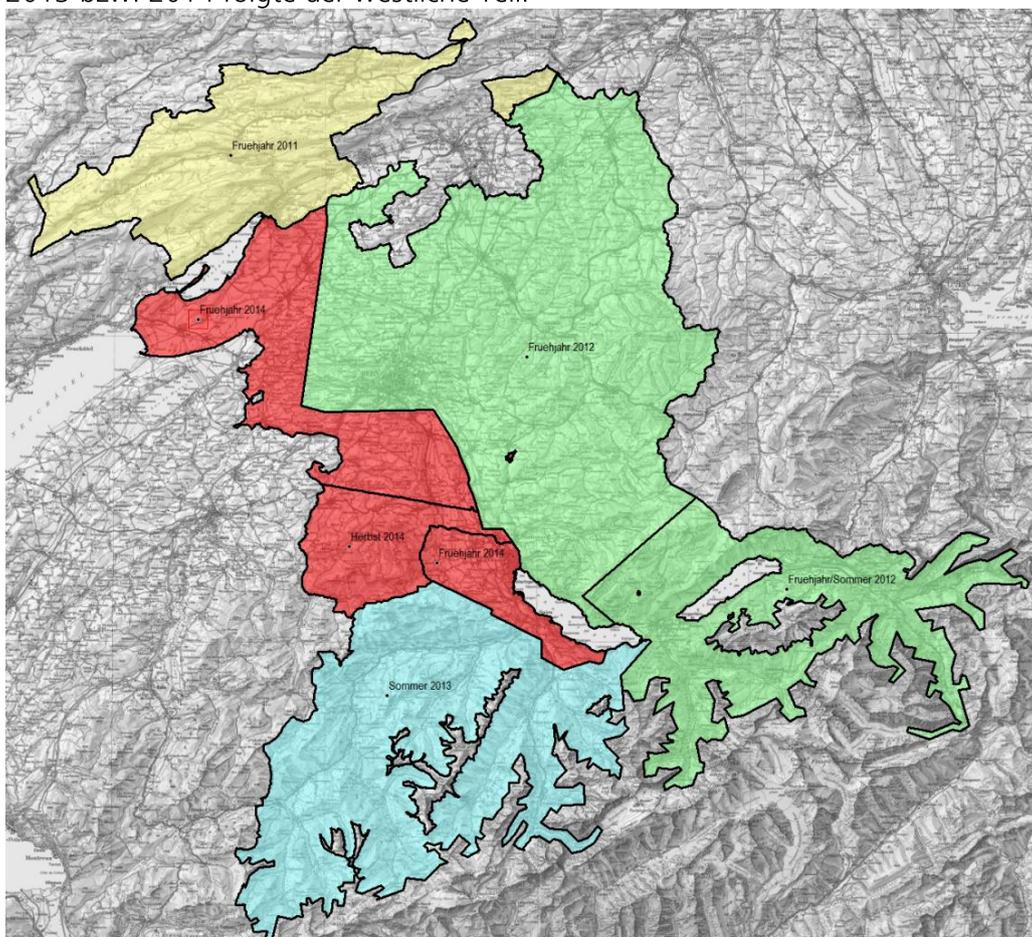


Abbildung 1: Übersicht über die effektiv erfassten Perimeter (mit Angabe Flugjahr)

Die Befliegung erfolgte laublos und schneefrei, d.h. mehrheitlich im Frühjahr vor Laubaustrieb. Es resultierte eine Punktwolke mit einer minimalen Punktdichte von 4 Punkten pro m². Die Höhengenaugigkeit der Einzelpunkte über das gesamte Projektgebiet beträgt ca. 12cm (einfache Standardabweichung). Vegetation, Kunstbauten und temporäre Objekte wurden in der Punktwolke identifiziert und klassiert. Die Punkte welche den „gewachsenen“ Boden abbilden, stellen ein digitales Geländemodell von höchster Präzision dar.

Die detailreichen Produkte sind vielfältig einsetzbar und werden auch für andere Fachbereiche (z.Bsp. Architektur, amtliche Vermessung, etc.) rege genutzt. Durch die gebührenfreie Abgabe der Daten sind unkomplizierte und interessante Projekte einfach realisierbar.

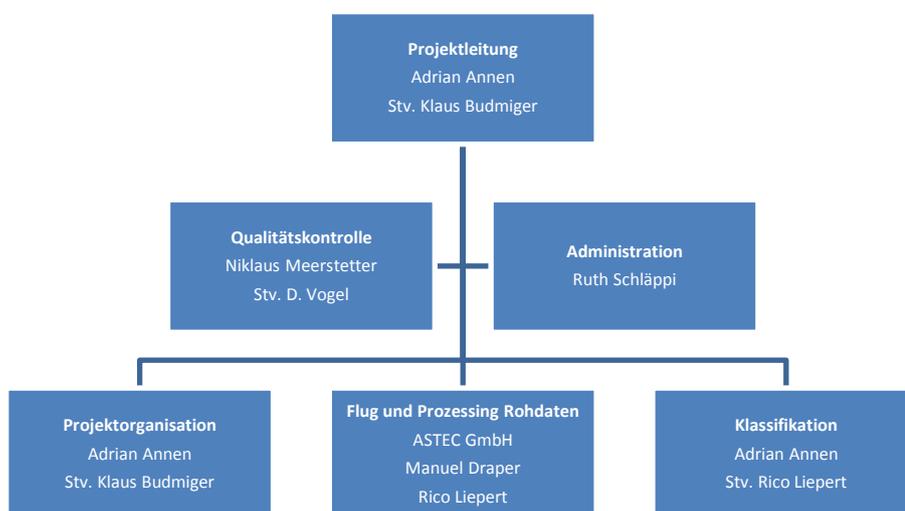
2 Berner Jura 2011

2.1 Ausgangslage

Als Grundlage für die technische Ausführung des Projektes gelten die Offerte vom 10.12.2010, das Pflichtenheft zum Projekt (V1.4, Stand vom 16.2.2011) und die an der Unternehmersitzung vom 14.1.2011 in Gümligen festgelegten weiteren Absprachen zwischen Ueli Maag (AGI BE), Nikolaus Grässle (AGI BE), David Brugger (AGI BE), Michael Sauter (Amt für Wald BE), Felix Morsdorf (Uni Zürich), Klaus Budmiger (Flotron AG) und Adrian Annen (Flotron AG, Projektleiter).

2.1.1 Projektorganisation

Beteiligte Firmen / Projektorganigramm LiDAR Berner Jura 2011:



Die Projektleitung liegt bei Flotron AG in Meiringen. Die Durchführung der Befliegung und die Georeferenzierung der Punktwolke wird durch die Firma ASTEC GmbH, Kreba-Neudorf, Deutschland durchgeführt. Die ASTEC GmbH zeichnet sich durch grosse Erfahrung bei grossflächigen Laserscanning-Befliegungen in ganz Europa aus.

Funktion	Beschreibung
Projektleitung	<ul style="list-style-type: none"> • Ansprechpartner gegenüber dem Kunden • Terminkontrolle • Finanzkontrolle • Einsatzplanung Personal • Kommunikation intern • Redaktion des technischen Berichtes
Qualitätskontrolle	<ul style="list-style-type: none"> • Unabhängiges Überprüfen ob die internen Qualitätskontrollen festgelegt wurden, eingehalten und dokumentiert werden • Unabhängige Kontrolle der Termine und Finanzen
Projektorganisation	<ul style="list-style-type: none"> • Technische Organisation des Bildfluges und aller nachfolgenden technischen Arbeiten

Flug und Prozessing Rohdaten	<ul style="list-style-type: none"> • Durchführung des Fluges • Berechnung der Punktwolke
Klassifikation	<ul style="list-style-type: none"> • Verarbeitung der Punktwolke

2.1.2 Perimeter / Projektanforderungen (Zusammenfassung)

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

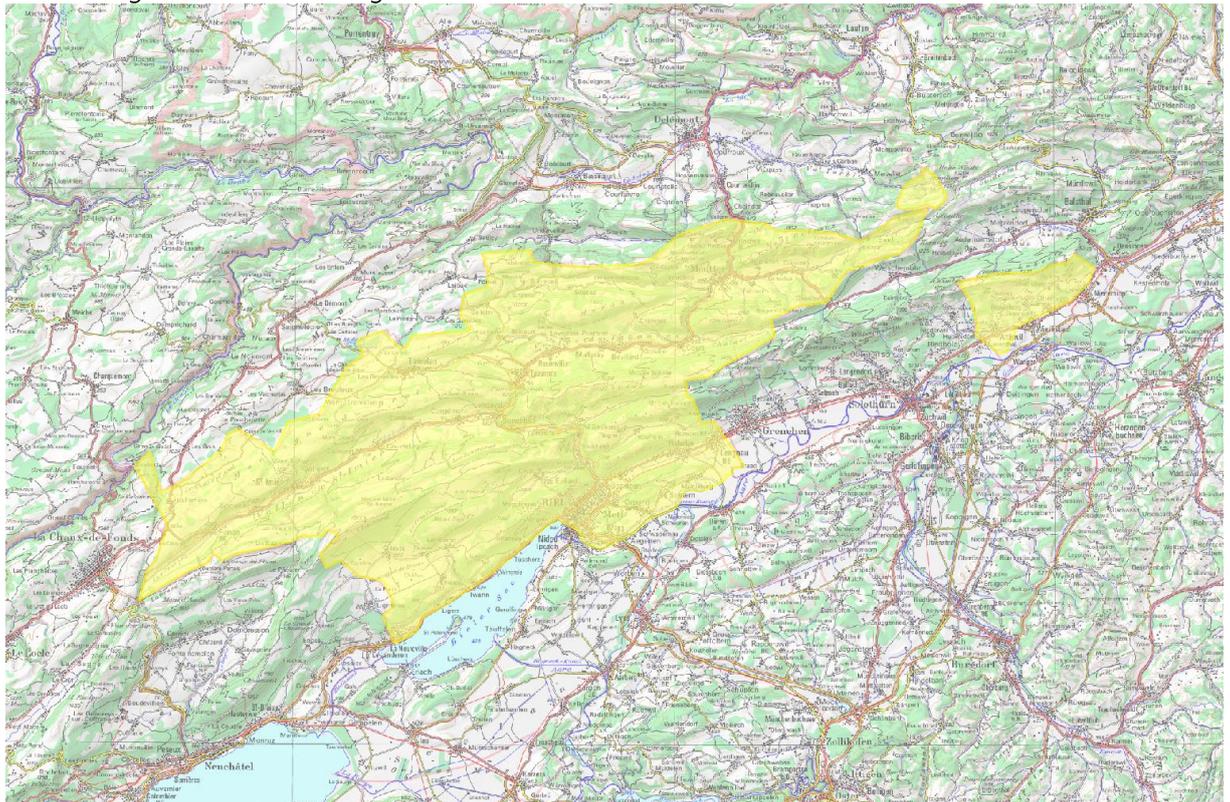


Abbildung 2: Perimeter Projektgebiet (Fläche ca. 646 km²)

Punktdichte	mind. 4 Pt / m ²
Höhengenauigkeit ausserhalb Wald	< ±0.2 m
Höhengenauigkeit Baumkronen	< ±1.0 m
Lagegenauigkeit	< ±0.3 m
Höhendifferenz zwischen Linien	< ±0.15 m
Projektionssystem	CH03+ / LHN95
zusätzliches Projektionssystem	CH03 / LN02
5 Klassen	Boden, Vegetation tief und hoch, Gebäude, Brücken und weitere Kunstbauten

2.2 Flugplanung

Nachfolgend sind das zur Verfügung stehende Messsystem und die Flugplanung vorgestellt und die wichtigsten Überlegungen dokumentiert.

2.2.1 Messsystem

Im Befliegungszeitraum steht das folgende Equipment zur Verfügung (Eigentum und betrieben durch ASTEC GmbH):

Flugzeug	Cessna C 402
Laser Scanner	Leica ALS60
GPS	GPS/INS-unit von Leica
IMU	IPAS-CUS6
Flugplanung	TopoFlight
GPS / INS processing	Leica IPAS TC-software
Software	TerraScan, TerraModeler, TerraMatch von TerraSolid FI
GPS für Feldvermessung	Trimble R8 GNSS
GPS Auswerteprogramm	Leica GEO Office

2.2.1.1 GPS/IMU – Systemkomponenten

Für die Positionierung und Orientierung der Messplattform wird ein hochgenaues Messsystem der Firma Leica eingesetzt. Die Systemkomponenten (GPS/IMU) sind bereits fest in das LIDAR System ALS 60 integriert, wodurch Fehlerquellen schon von vornherein vermieden werden.

Für die GPS Auswertung wird das Verfahren des differentiellen GPS (DGPS) verwendet. Die dazu benötigten Referenzdaten werden entweder mittels eigenen Basisstationen bestimmt oder über Positionierungsdienste (z. B. SAPOS) bereitgestellt. Um ein optimales und zuverlässiges Resultat zu erzielen, werden die Lösungen mehrerer Referenzstationen ggf. miteinander verglichen und kombiniert. Die GPS-Komponente liefert hochgenaue Positionen über die gesamte Flugzeit hinweg, jedoch nur im Abstand von 30-50 m (Abhängig von Fluggeschwindigkeit und GPSAufzeichnungsrate) und ohne Orientierungsinformationen. Zur genauen Rekonstruktion der Flugbahn wird die IMU (Inertial Measurement Unit) benötigt, welche die Orientierung der Messplattform im Raum (Nick-, Roll-, und Kurswinkel) sowie ebenfalls Positionen mit einer Taktrate von 200Hz für nahezu jede Flugzeugposition bestimmt. Die Genauigkeit der IMU ist zeitabhängig, wodurch die alleinige Positionierung mittels IMU über längere Zeiträume hinweg den Genauigkeitsanforderungen nicht mehr genügt.

Die zeitlich zuverlässigere Positionslösung des GPS-Systems wird nun mit den IMU – Daten kombiniert, wodurch einerseits Fehler in den GPS-Lösungen detektiert und genaue Positionslösungen über die gesamte Flugzeit hinweg gewährleistet werden können. Andererseits werden die Messungen der IMU durch die GPS-Lösungen optimiert. Aus dem DGPS Datensatz wird mit den Messungen der IMU eine sog. „Solution – SOL“ berechnet.

Parameter Genauigkeit [RMS]	IPAS
Position	± 5-30 cm
Geschwindigkeit	± 0.5 cm/s
Roll- und Nickwinkel	± 0.0025°
Kurswinkel	± 0.005°
Zufälliges Rauschen	$< \pm 0.01 \text{ } ^\circ / \sqrt{h}$
Systematische Drift, 1σ	± 0.01 °/h

Abbildung 3: Genauigkeit des IPAS nach Postprozessierung
 [IPAS BROSCHUERE, LEICA GEOSYSTEMS, 2009]

In Abhängigkeit von den Messbedingungen sind Genauigkeiten für die rekonstruierte Flugbahn von <20cm für die Höhe und <10cm für die Lage zu erwarten. Praktische Tests weisen häufig sogar wesentlich bessere Ergebnisse nach (Höhe <10cm, Lage < 5cm). Auf die für dieses Projekt tatsächlich erreichte Genauigkeit wird später eingegangen.

2.2.1.2 LIDAR System ALS 60



Abbildung 4: : Laserscanningsystem ALS60 mit integrierten IPAS-Komponenten

Bei dem LIDAR ALS 60 handelt es sich um einen Laserscanner, der nach dem Schwingspiegelprinzip arbeitet. Die von einer Laserdiode erzeugten Pulse werden auf den oszillierenden Spiegel gelenkt, der die Pulse in einem annähernd zickzackförmigen Punktemuster auf die Erde projiziert.

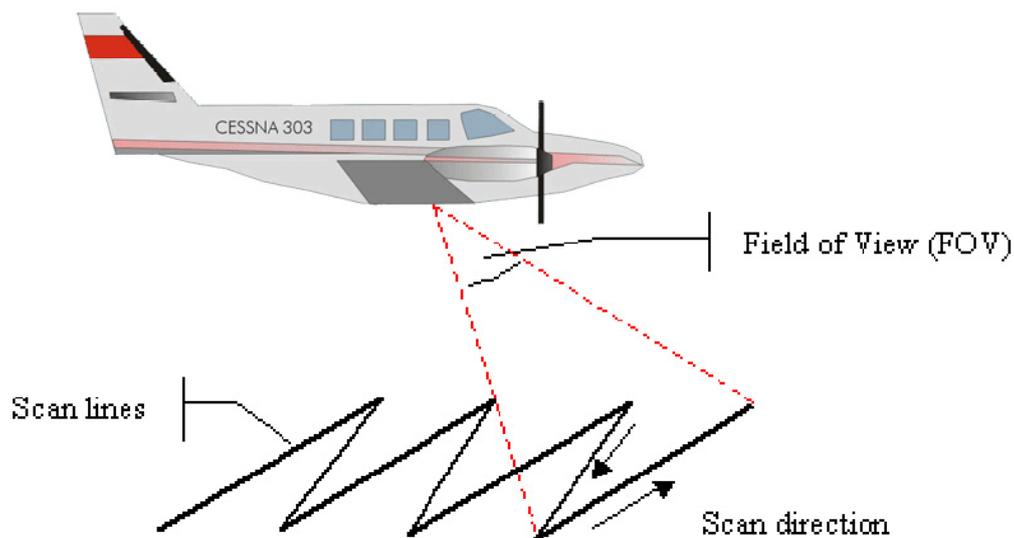


Abbildung 5: : Punktverteilung mittels oszillierender Spiegel

Das reflektierte Signal (Echo) eines Pulses wird dann wieder vom LIDAR System detektiert. Aus der Zeitdifferenz zwischen gesendetem Laserpuls und empfangenem Echo wird die Entfernung zwischen Flugzeug und beleuchtetem Geländepunkt errechnet. Zusammen mit der Position (Winkel) des oszillierenden Spiegels können die Koordinate der Messpunkte berechnet werden. Ein operationeller Vorteil des ALS 60 ist die Rollwinkelkompensierung, welche die Bewegungen des Flugzeuges um die Längsachse ausgleicht. Die Rollwinkelkompensierung stellt sicher, dass einerseits die geforderten Punkteabstände quer zur Flugrichtung gewährleistet werden, andererseits die Querüberlappung eingehalten wird. Messlücken zwischen einzelnen Streifen, wie sie sonst durch Rollbewegungen des Flugzeuges entstehen, werden vermieden und die Streifenabstände können ökonomischer gewählt werden. Ein weiterer Vorteil des Schwingspiegelprinzips ist die freie Einstellbarkeit des Öffnungswinkels und der Scannfrequenz über einen großen Bereich. Beim ALS 60 lässt sich der Öffnungswinkel zwischen 11° und 75° frei einstellen. Die Scannfrequenz kann bis maximal 100Hz frei eingestellt werden. Das Messpunktmuster (und damit die Punktdichte) können dem Projekt hierdurch auf optimale Weise angepasst werden.

Des Weiteren bietet der ALS60 die Möglichkeit bis zu zwei Pulse (Multipuls) innerhalb sehr kurzer Zeit aufeinander folgend zu senden. Dadurch können mehr Daten innerhalb der gleichen Zeit aufgezeichnet werden, wodurch die Punktdichte nochmals erhöht wird.

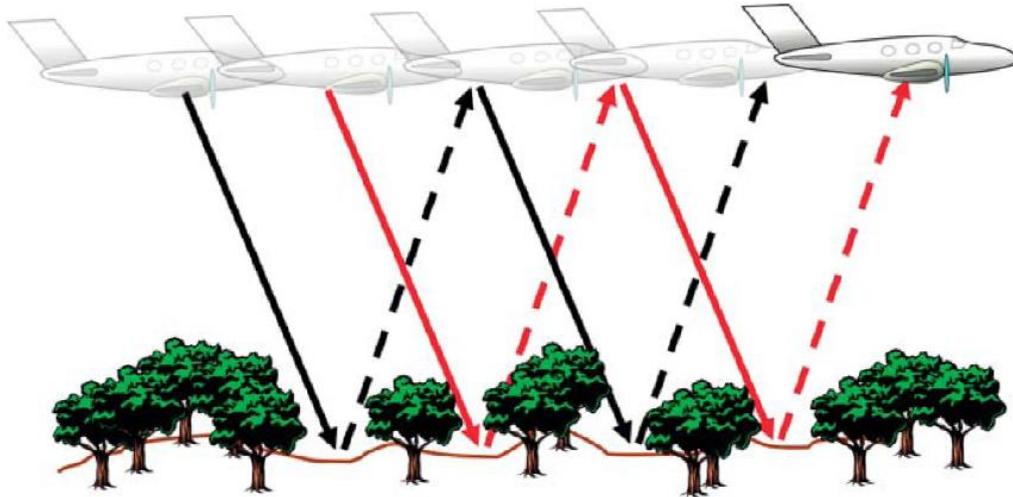


Abbildung 6: Multiple puls in the air (MpiA)

Die Pulsrate des ALS 60 ist eine Funktion der Flughöhe, bei größerer Flughöhe ist die maximale Pulsrate geringer. Diese Maßnahme ist notwendig, um Eindeutigkeiten bei der Zuordnung der Laserechos zu garantieren. Die maximale Pulsrate des ALS 60 von 200.000Hz wird stufenlos der Flughöhe angepasst.

Bei Laser-Messkampagnen in stark bewegtem Gelände können Messlücken im Bereich von tiefen Flusstälern und Schluchten entstehen, wenn eine entsprechende Reichweite des LIDAR's nicht gegeben ist. Der ALS 60 hat eine maximale Reichweite von über 6.000m und wurde in Flughöhen bis zu 5.000m vom Hersteller auf Genauigkeit und Zuverlässigkeit ausgiebig getestet. Die große Reichweite des ALS 60 erlaubt es, in Regionen mit stark bewegtem Gelände zu fliegen, ohne dass Datenausfälle entstehen. In Gebieten, in denen hohe Anforderungen an die Punktdichte und an die Höhen- und Lagegenauigkeit gestellt werden, wird deutlich unter der maximalen Reichweite geflogen.

Bei dem ALS 60 werden für jeden gesendeten Laserpuls bis zu 4 Echos empfangen. Dies ermöglicht unter Umständen eine sehr detaillierte Klassifizierung der gemessenen Daten. Die Registrierung von First- und Last-Echos stellt also für dieses Gerät kein Problem dar. Dabei speichert das System bei mehr als 4 Echos das tatsächlich letzte registrierte Echo als 4. Echo ab („Last-Puls-Garantie“). Zusätzlich wird die Intensität (Amplitude) der reflektierten Echos aufgezeichnet.

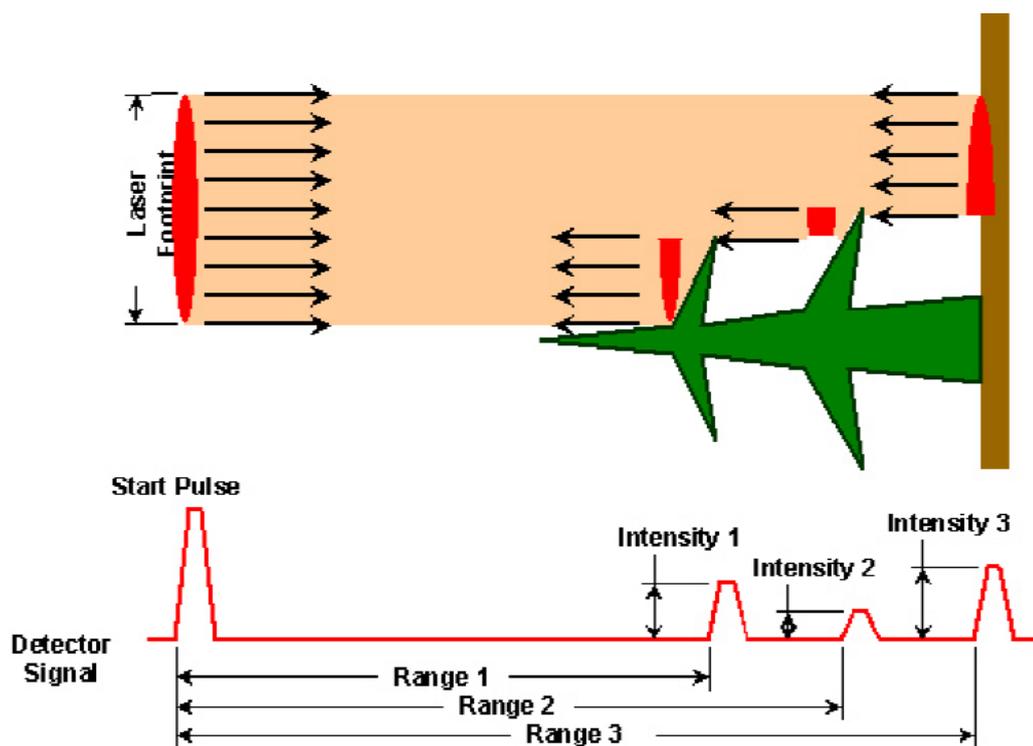


Abbildung 7: Multiple Echos eines Lasersignals

Systemparameter	
Reichweite des Lasers	bis 6000m
Empfohlene max. Flughöhe	bis 5000m über Grund
Laserpulsrate	22 - 200kHz
Scanfrequenz	0 - 100Hz
Öffnungswinkel (FOV)	11-75°
Divergenz	0,22mrad @ 1/e ²
Multiple Impuls	ja (bis zu 2)
Multiple Echos pro Impuls	1-4
Intensitätsaufzeichnung	ja
Rollwinkelkompensierung	ja
Bildaufzeichnung	ja

Abbildung 8: ALS 60 System-Spezifikationen

Für weitergehende Informationen zum ALS 60 verweisen wir auf die Prospekte der Firma Leica-Geosystems

2.2.2 Planung

Es wurden im Wesentlichen zwei Varianten detailliert untersucht. Die in der Offerte von Dezember 2010 vorgestellte Version wurde schlussendlich verworfen. Die Gefahr grosse Datenlöcher (Abschattungen) in den Wald- und Stadtgebieten bei einer Querüberdeckung von 30% wurde von der Flugfirma und von der Projektleitung als zu gross eingeschätzt. Deshalb wurde die Querüberdeckung auf minimal 55% erhöht („jeder Punkt im Projektgebiet wird aus mindestens zwei Blickrichtungen gescannt“). Die Anzahl der Flugstreifen wurde beibehalten, der Öffnungswinkel leicht verkleinert (23° statt 30°) und die Flughöhe AGL wurde erhöht (maximal 2100m statt 1500m). Die Erhöhung der Flughöhe bewirkt einen leicht grösseren Footprint des Laserscanningssystems (max. 0.43m statt 0.30m). Andererseits kann ein ruhigerer Flug (weniger Turbulenzen) und somit eine homogenere Punktverteilung erzielt werden.

Bei der Durchführung der Befliegung wurden folgende Einstellungen des Laserscanners Verwendet:

Parameter	Einstellung
Öffnungswinkel (FOV)	23.0°
Flughöhe über min Grund	max. 2100 m
Fluggeschwindigkeit (TAS)	max. 125 kn
Laser Pulse Rate	114600 Hz
Scan Frequenz	35.2 Hz

Abbildung 9: ALS60 Scanner Setup Berner Jura 2011

Die Einstellungen des Laserscanners resultieren für die Laserscanstreifen in folgenden Eigenschaften:

Gebietsgröße	646,2 km ²
Anzahl der Flugstreifen	209 (+11 Querstreifen)
Distanz zwischen den Flugachsen	Ca. 300 m
Breite eines Scanstreifens	ca. 800 m (Geländeabhängig)
Spotdurchmesser am Boden	max. 0.46 m
Resultierende Punktdichte	min 4 Pt. Pro m ²

Abbildung 10: Flugstreifeneigenschaften Berner Jura 2011

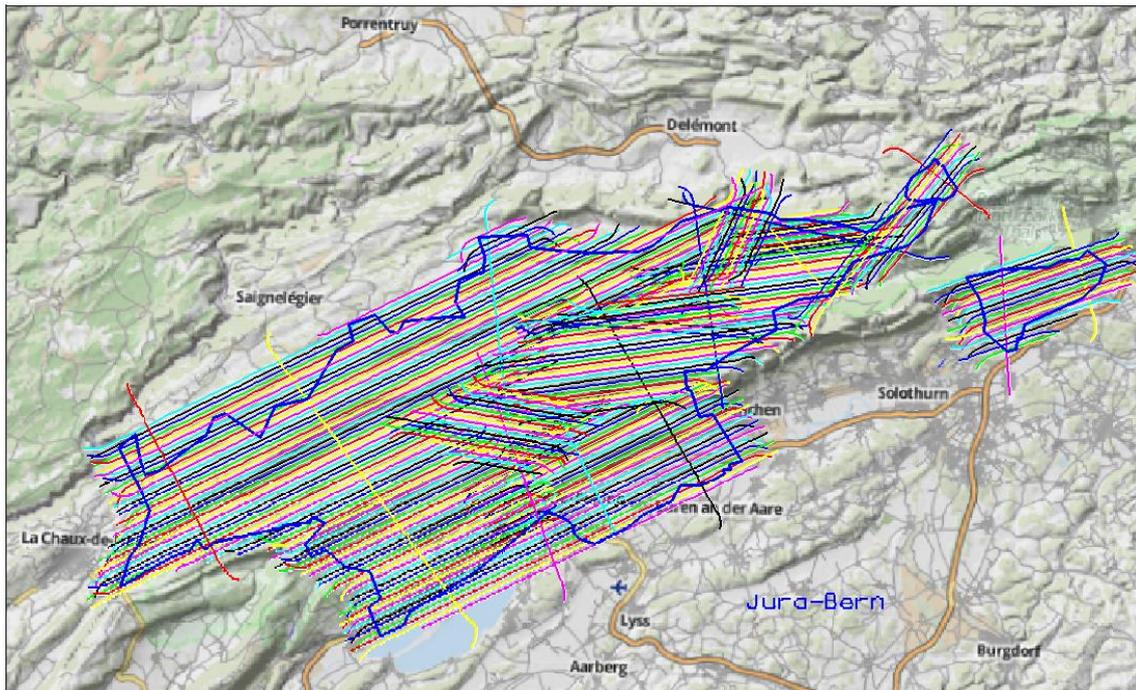


Abbildung 11: Flugstreifeneigenschaften Berner Jura 2011

Die resultierende Flugzeit aus der Flugplanung beträgt ca. 24 Flugstunden (ohne Transfer). Die Punktdichte von 4 Pkt/m² PRO Streifen kann nicht garantiert werden. Durch die hohe Querüberdeckung (55%) wird aber eine homogenere Punktverteilung erzielt und durch die Kombination der Flugstreifen wird das Endprodukt im Mittel eine Rohpunktdichte von ca. 6 Pkt/m² beinhalten. Die Punktdichte für Geländepunkte (DTM) im Wald sollte schlussendlich ca. 4 Pkt/m² betragen.

2.3 Befliegung - Durchführung

Die Befliegung konnte im Frühjahr 2011 erfolgreich durchgeführt werden. Das Projekt wurde auf Grund der Schweizerischen Gesetzgebung (Nachtflugverbot) nur bei Tageslicht befliegen. Das Messflugzeug war während dem Befliegungszeitpunkt (April 2011) im Wechsel für zwei Projekte im Einsatz (Nacht: Laserscanningbefliegung im Bundesland Hessen D, Tagsüber: Berner Jura). Die Tageeinsätze wurden allesamt von derselben Flugcrew geflogen. So konnte eine nahtlose Befliegung sichergestellt werden.

2.3.1 Realisierung der Flüge

Total wurden an 6 Flugtagen 9 Missionen geflogen (Totale Flugzeit im Projekt: 30.3h, siehe auch Abbildung 12). Zur Absicherung vor einem Ausfall des AGNES-Netzes von swipos wurden von der Firma Flotron AG in der Projektregion statische Referenzstationen betrieben (1 Station pro Flugtag). Diese Daten dienen zur Überprüfung der GNSS-Satellitengeometrie und –verfügbarkeit (jeweils direkt während des Fluges). Für die definitive Berechnung der Daten wurden die Stationen schlussendlich NICHT verwendet (Grund: Antennenmodell vom Leica 1200-Empfänger zu ungenau bekannt). Sämtliche Daten wurden mit AGNES-Stationsdaten berechnet (keine Datenlücken).

Um die Positionen des Airborne-Sensors zu bestimmen, wurden GPS-Daten mit einer Rate

von 2Hz und IMU-Daten mit 200Hz aufgezeichnet. Die GPS-Daten wurden jeweils im Anschluss des Flugtages bezüglich der lokalen Referenzstation provisorisch prozessiert um allfällige Datenlücken sofort zu erkennen.

Nach Fertigstellung der Befliegung wurden die GPS-Daten bezüglich der Referenzstationen AGNES prozessiert. Zusammen mit den IMU-Daten wurde die Flugbahn bestmöglich anschliessend bestmöglich rekonstruiert („Solution - SOL“ vgl. Abbildung 12) und somit die Positionen und Orientierungen des Sensors ermittelt.

Die daraus resultierenden erwarteten Positionsgenauigkeiten [RMS] der Messplattform für die Flugtage beträgt:

Gebiet	Flug-tag	Flugzeit (UTC)	GPS-Station	SOL North [cm]	SOL East [cm]	SOL High [cm]
Jura-Bern	07.04.2011	07:45 -23:30	BOU2, HUTT	± 1.6	± 1.4	± 2.2
Jura-Bern	08.04.2011	07:50 - 12:55	BOU2, NEUC	± 1.5	± 1.4	± 2.2
Jura-Bern	08.04.2011	14:25 - 16:40	BOU2, NEUC	± 1.9	± 1.6	± 2.1
Jura-Bern	09.04.2011	09:00 - 12:40	BOU2, NEUC	± 1.5	± 1.5	± 2.2
Jura-Bern	09.04.2011	14:00 - 17:20	BOU2, NEUC	± 1.7	± 1.4	± 2.2
Jura-Bern	10.04.2011	13:35 - 17:25	BOU2, NEUC	± 1.5	± 1.4	± 2.2
Jura-Bern	11.04.2011	09:35 - 13:45	BOU2, NEUC	± 1.6	± 1.6	± 2.4
Jura-Bern	11.04.2011	14:45 - 17:45	BOU2, NEUC	± 1.8	± 1.5	± 2.5
Jura-Bern	17.04.2011	08:50 - 11:50	BOU2, NEUC	± 1.5	± 1.4	± 2.2

Abbildung 12: Übersicht Flugtage, Missionszeiten (UTC), verwendete AGNES-Referenzstationen und innere Genauigkeit (RMS) der Trajektorien.

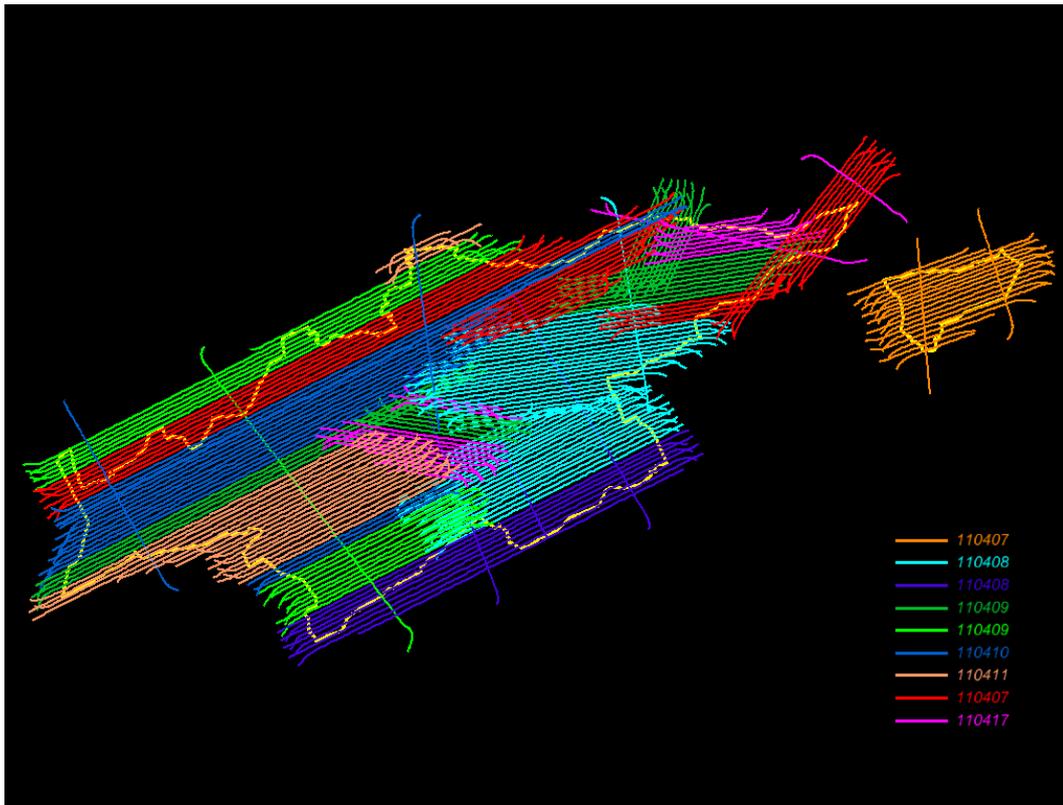


Abbildung 13: Übersicht Missionen

2.3.2 Vollständigkeit des Befliegung

Ausgehend von der nun bekannten Position des Messsystems, wurden mit den Daten des Laserscanners (Winkel und Distanz) die Koordinaten der aufgenommenen Punkte im System CHTRS95 berechnet, in ebene LV95-Koordinaten mit ellipsoidischer Höhe abgebildet und weiterverarbeitet.

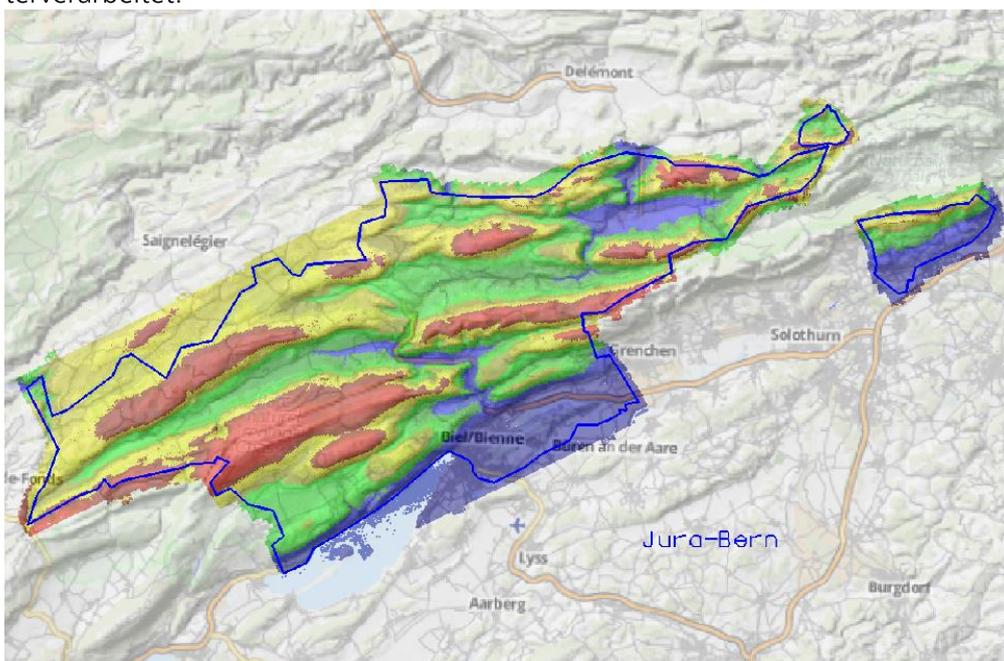


Abbildung 14: Gebietsabdeckung

Die Abdeckung des Gebietes wurde überprüft und keine Datenlücken ($> 500\text{m}^2$) durch fehlende Überlappung zwischen den Flugstreifen oder Bewölkung festgestellt. Lediglich im Umkreis von ca. 350m der Koordinate 2586660 E / 1234757 N wurde eine Aufzeichnungslücke (Fläche ca. 6000m^2) festgestellt.



Abbildung 15: Aufzeichnungslücke bei Koordinaten 2586660 E / 1234757 N

Die Datenlücke wurde am 28.6.2012 im Rahmen der Befliegung LiDAR BE 2012 – 1. Etappe nachgeflogen und eingearbeitet. Das eingesetzte System (ALS70 von ASTEC) entspricht in den wesentlichsten Eigenschaften dem ursprünglich im Rahmen der Befliegung 2011 eingesetzten System. Geometrisch konnten keine grösseren Unterschiede festgestellt werden.

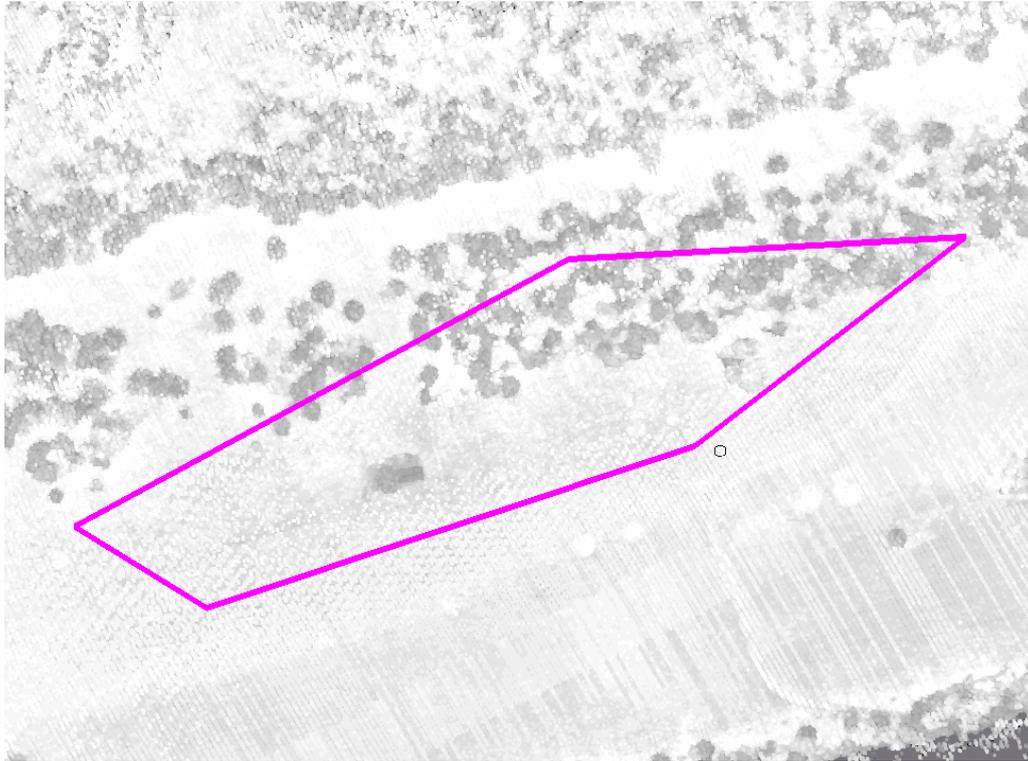


Abbildung 16: Aufzeichnungslücke bei Koordinaten 2586660 E / 1234757 N nach Nachflug vom 28.6.2012

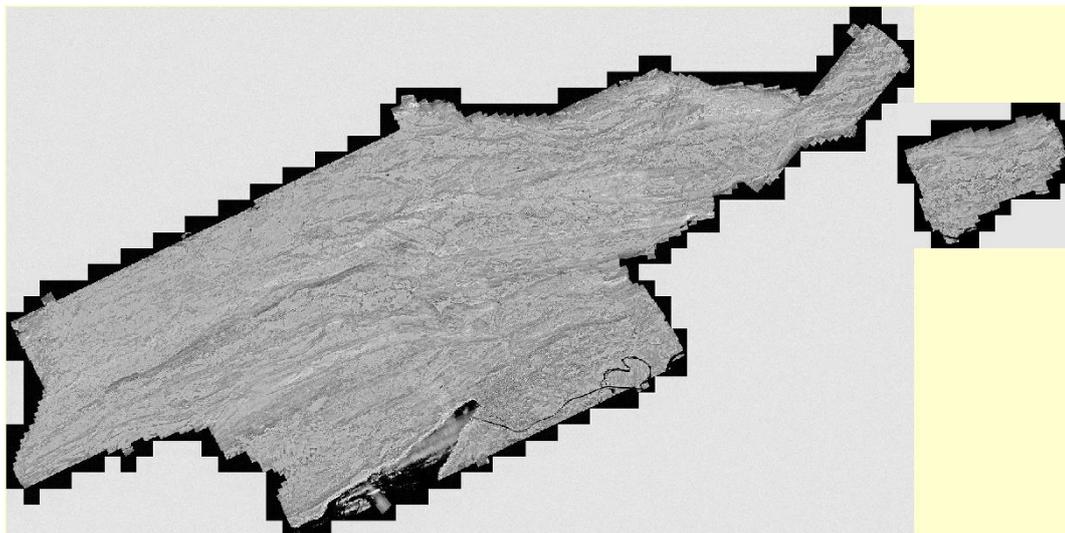


Abbildung 17: Übersicht der Punktwolke Berner Jura 2011 (eingefärbt nach Intensität)

2.3.3 Kalibrierung des Messsystems, Streifenanpassung (ASTEC)

Um systematische Fehler zu ermitteln und zu minimieren, wurden anhand der berechneten Daten innerhalb geeigneter Gebiete die Auswirkungen dieser Fehler beobachtet und Kalibrierparameter ermittelt. Dies betrifft insbesondere die Orientierungsdifferenzen zwischen Laserscanner und IMU, welche als Nick-, Roll- und Kurswinkeldifferenz ermittelt werden.

Rollwinkel [rad]	-0.0011871510
Nickwinkel [rad]	-0.0000711090
Kurswinkel [rad]	-0.0009218600

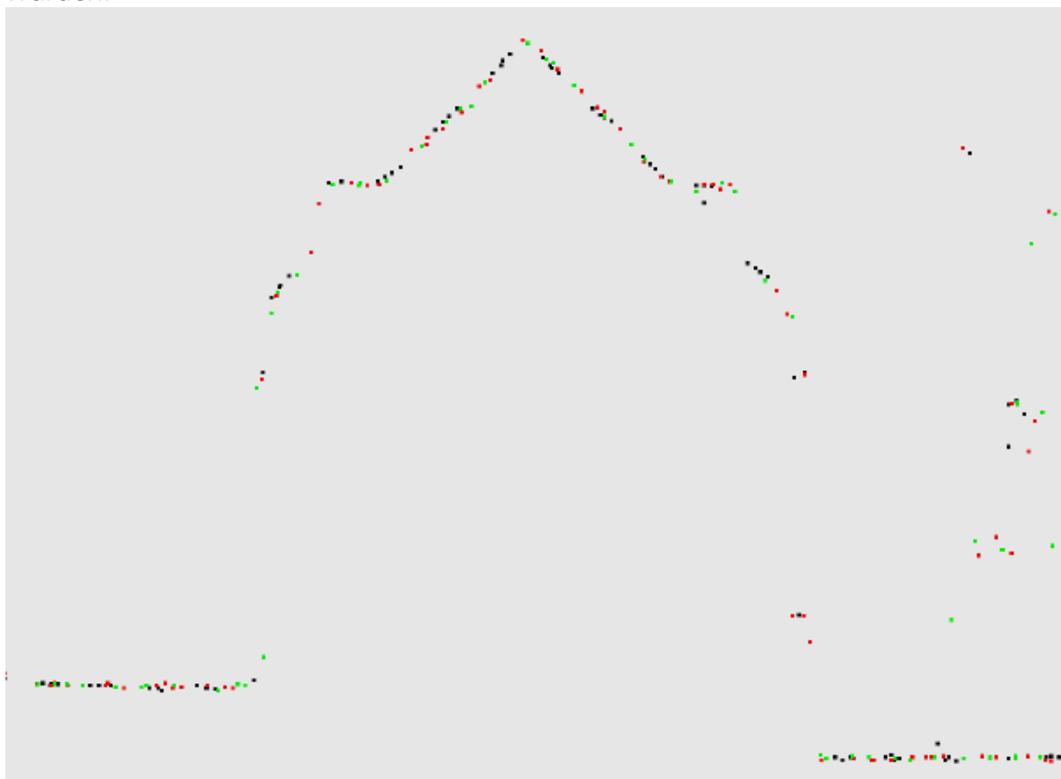
Abbildung 18: Kalibrierwerte

Mit den ermittelten Werten wurden zunächst die Koordinaten für das gesamte Projekt berechnet. Zusätzlich wurden nicht systematische Flugstreifendifferenzen durch weitere statistische Verfahren minimiert. Dabei wurden Differenzen im Überlappungsbereich der Flugstreifen im gesamten vermessenen Gebiet ermittelt, insbesondere unter Verwendung der Daten im Bereich der Querstreifen.

Diese Differenzen sind dann Ziel einer ausgleichenden Fehlerminimierung, bei der zu wählende Parameter (z. B. Höhendifferenzen, Roll-, Nick-, Kurswinkeldifferenzen) iterativ optimiert werden. So konnten individuelle Flugstreifen optimal und statistisch objektiv aneinander angepasst werden.

Erfahrungsgemäß betragen die verbleibenden Restklaffungen/Unterschiede zwischen den Flugstreifen für die Höhe < 10cm, für die Lage < 20cm.

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



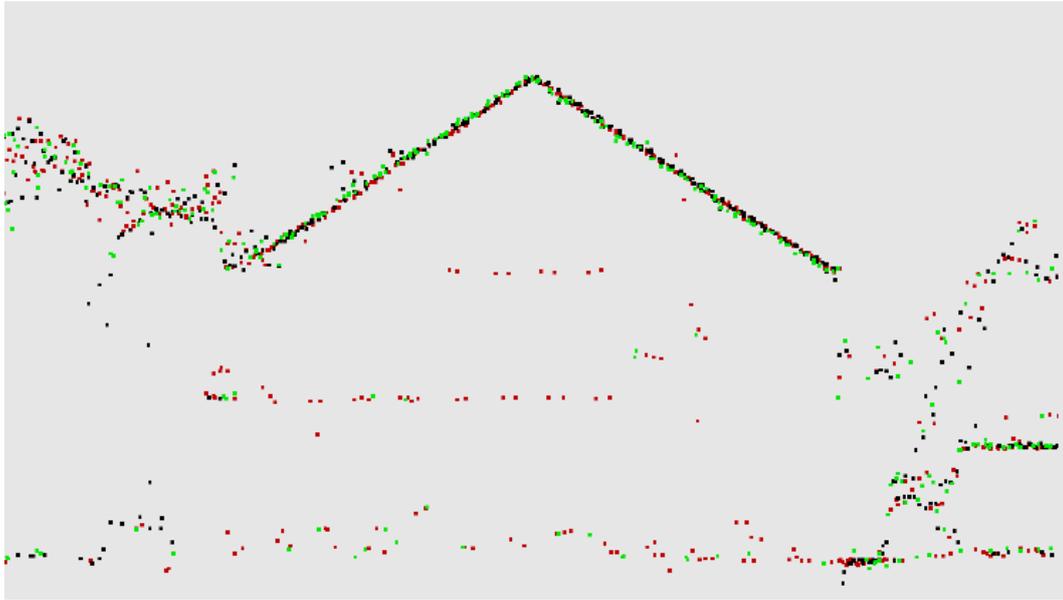


Abbildung 19: Kontrolle der relativen Lagegenauigkeit mittels geeigneter Querschnitte (Farbunterscheidung nach Flugstreifen)

2.3.4 Absolute Genauigkeitskontrolle der Laserdaten (Flotron AG)

Die Kontrolle der absoluten Genauigkeit der Laserscanningpunktwolke wurde von Flotron AG durchgeführt. Das heisst, es wurden während der Streifenanpassung (durchgeführt durch ASTEC GmbH) keine Korrektur auf absolute Höhenwerte durchgeführt.

2.3.4.1 Reduktion der Punktwolke auf Geoidhöhen (CHGeo2004)

Die Reduktion der von ASTEC mit ellipsoidischen Höhen gelieferten Punktwolke wurde mit Verwendung des Schweizer Geoidmodelles (CHGeo2004) durch Flotron AG durchgeführt. Damit wurde die definitive Georeferenzierung der Punktwolke erreicht.

2.3.4.2 Bestimmung Kontrollflächen

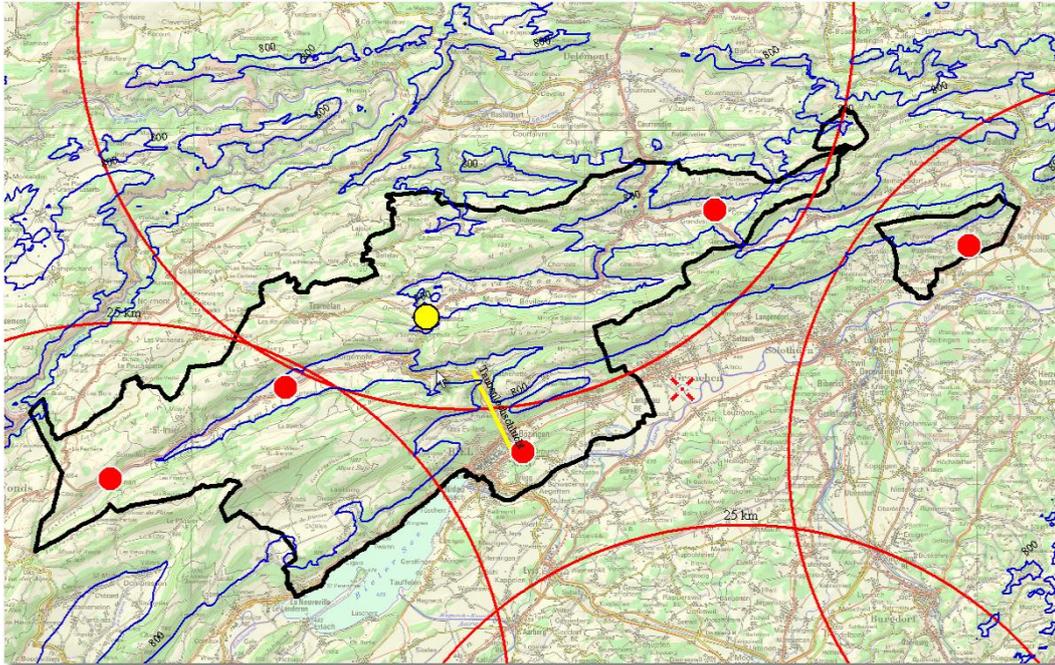


Abbildung 20: Verteilung der Kontrollflächen

Während der Befliegung wurden 6 gut verteilte Kontrollflächen im Projektgebiet eingemessen. Diese Flächen wurden mit einer Genauigkeit von ca. 5cm (Lage) und ca. 7cm (Höhe) im Projektionsystem LV95/LHN95 eingemessen.

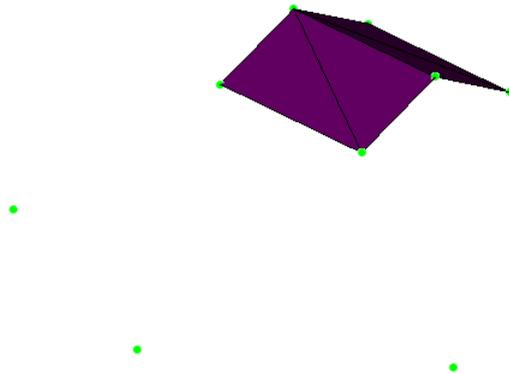


Abbildung 21: Dachflächen als 3D-Elemente (violett, Beispiel), die grünen Punkte sind eingemessene Bodenpunkte.



Abbildung 22: Beispiel einer Kontrollfläche (eingemessen wurden die geneigten Dachebenen in Lage und Höhe)

2.3.4.3 Vergleich der Dachflächen und der Punktwolke

Der Vergleich mit den Kontrollflächen wurde optisch in Terrasolid durchgeführt. Dabei wurde vor allem die Lage der Punkte kontrolliert.

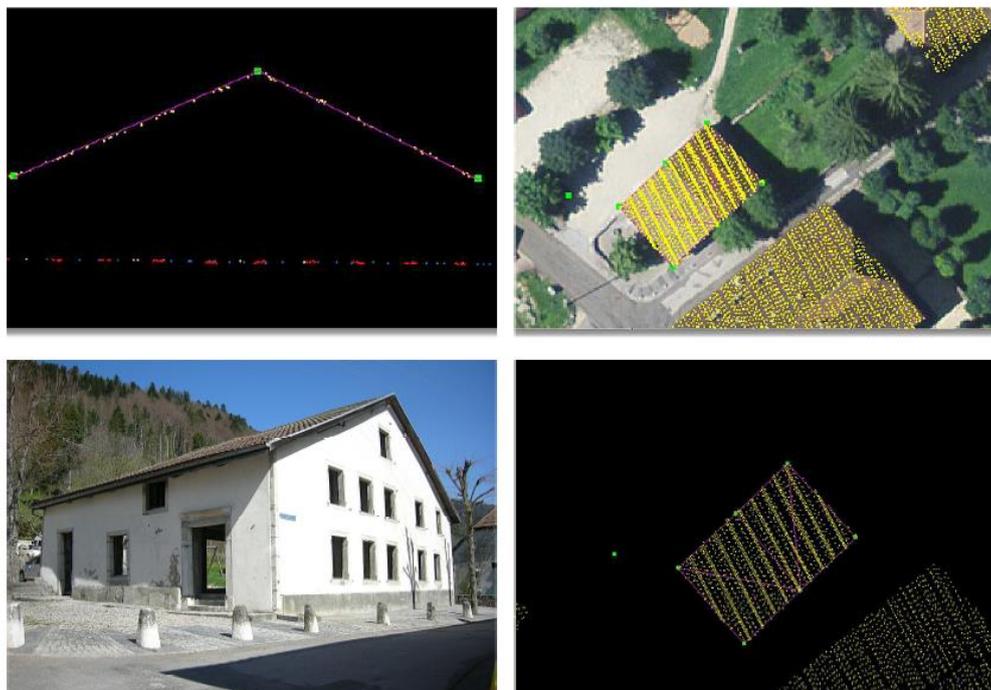


Abbildung 23: Beispiel für optische Geometriekontrolle

Die Ansichten gemäss obigem Beispiel aller Kontrollflächen sind im Anhang A1 dokumentiert.

2.3.4.4 Höhenkontrolle mittels Fixpunkte Kanton Bern

Als weitere unabhängige und vor allen Dingen flächenhafte Kontrolle wurden die verfügbaren Fixpunkte im Projektgebiet über den Fixpunkt-Datenservice (FPDS) von swisstopo verwendet. Alle verfügbaren Punkte wurden mittels einer Funktion in Terrasolid (Control Report) mit der automatisch klassierten Boden-Klasse verglichen. Die offensichtlich nicht in Boden enthaltenen Punkte (Kirchtürme, Fernziele, etc) wurden entfernt. Trotzdem bleibt eine grosse Unsicherheit was die Lage der Punkte anbelangt (zum Beispiel: LFP1 mit Steinkopf 10cm über Gelände, Nivellementsunkte an Hausfassaden etc.). Um eine flächenhafte Aussage zu ermöglichen wurden trotzdem möglichst viele Punkte in der Statistik belassen. Diese ist deshalb als eher pessimistisch anzusehen.

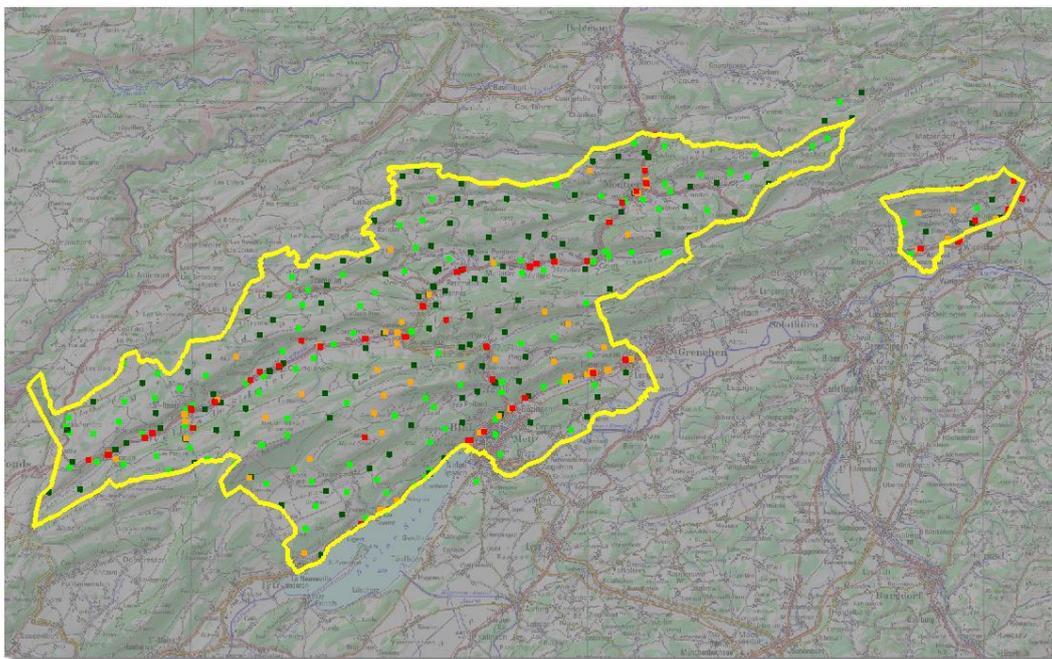


Abbildung 24: Verteilung mit Einfärbung nach Differenz zu (automatisch) klassiertem DTM: grün= <5cm, dunkelgrün= zw. 5 und 15cm, orange= zw. 15 und 30cm, rot= über 30cm (unklar ist teilweise die Identifikation der Punkte)

Trotz der teilweise ungewissen Identifikation der Punkte (die roten Punkte sind grösstenteils Nivellementsfixpunkte mit ungenauer Lage und/oder i.d.R. ca. 30cm über Terrain) resultierte ein mittlerer (Höhen-)Fehler von 14cm (verwendet wurden total 390 Punkte) über das gesamte Projektgebiet. Systematische Fehler können somit weitgehend ausgeschlossen werden.

2.4 Punktwolkenklassierung

Die Klassierung der Punktwolke wird durch ausgebildete Mitarbeiter der Flotron AG in Meiringen durchgeführt. Um ein homogenes Resultat zu erhalten, ist die Ausbildung der Operateure von zentraler Bedeutung. Hier werden regelmässige Arbeitsanweisungen und Kontrollen durchgeführt. Allerdings ist insbesondere die manuelle Bereinigung der Klasse „Boden“ je nach Gelände unterschiedlich und kann tlws. unterschiedlich aufgefasst werden.

2.4.1 Punktklassen

Für das gesamte Projekt gilt folgende Punktklassendefinition (nach ASPRS-LAS-Standard 1.3, angepasst für projektspezifische Klassen, wo ASPRS leer: eigene Definition):

Identifikator	Bezeichnung Deutsch	Bezeichnung ASPRS
0	Unklassiert	Created, never classified
1	Default	Unclassified
2	Boden	Ground
3	Vegetation tief (Rauschen)	Low Vegetation
4	Vegetation mittel	Medium Vegetation
5	Vegetation hoch	High Vegetation
6	Gebaeude	Building
7	Punkte unter Ground	Low Point (noise)
8	Modelkeypoints	Model Key-point (mass point)
9	Wasser	Water
10	Loeschungen und unbestaendig	
11	Luftpunkte	
12	Kehrpunkte	Overlap Points
13	Bruecken	
14	DOM	
15	Weitere Kunstbauten	
16	Temporäre Klasse (keine Zuweisung)	
17	ausserhalbPerimeter	
18	<i>Loeschungen und bestaendig</i>	
19	<i>Dachaufbauten</i>	

Anmerkung: Die Klassen 18 und 19 wurden auf Grund der Ergebnisse der Verifikation neu eingeführt. Details siehe Abschnitt 2.5.

Sämtliche Datensätze (Rohdaten, Punktwolke klassiert, DTM, DOM) sind mit dieser Klassenzuordnung versehen. D.h. zum Beispiel ein Punkt mit Identifikator 2 ist als Bodenpunkt klassiert worden.

2.4.2 Vorgehen - Kurzbeschreibung

Zur effizienteren Bearbeitung in Terrasolid werden Kacheln mit einem Flächeninhalt von 1km² verwendet. Bei der Bearbeitung werden immer die Nachbarkacheln mitgeladen. So wird sichergestellt, dass ein Blattschnittfreies DTM bzw. DOM entsteht.

Gemäss Erfahrungen der Firma ASTEC GmbH wurden als erstes die Randpunkte (bei Schwenkspiegelsystem von ALS60) jeder Fluglinie bis zu einem Öffnungswinkel von 19Grad getrennt klassiert in die Klasse „Kehrpunkte“.¹ Hauptgrund dieses Arbeitsschrittes ist die unregelmässige Verteilung dieser Kehrpunkte (eng zusammenliegende Scanlinien).

Das gesamte Projektgebiet wurde in einem automatischen Bearbeitungsgang in die Grundklassen (Boden, Vegetation tief, Vegetation hoch, Gebäude und unklassiert) bearbeitet. Die automatische Klassierung ist teilweise an die unterschiedlichen Bodenbeschaffenheiten angepasst worden (Kachel beinhaltet mehrheitlich Stadt bzw. Wald).

Anschliessend erfolgt die manuelle Durchsicht jeder Kachel der Klassen Boden, Gebäude, Brücken, und Vegetation). In einem zweiten Arbeitsgang erfolgt die Durchsicht nach unbeständigen und zu löschenden Objekten (Autos, Felder, Hochspannungsleitungen etc.). Diese zweite Durchsicht wird von einer anderen Person durchgeführt. Somit ist eine doppelte Kontrolle (Zwei-Augen-Prinzip) der klassierten Punktwolke gewährleistet.

Jeder am Projekt beteiligte Mitarbeiter erhält bei Beginn der Arbeit eine vertiefte Einführung und eine Arbeitsanweisung „Klassierung“. Der Projektleiter ist für die Problemfälle bei Bedarf zu konsultieren.

¹ Diese Kehrpunkte werden NUR bei der manuellen Durchsicht verwendet, falls nicht genügend übrige Punkte vorhanden sind (und wenn die geometrische Genauigkeit ausreicht).

2.4.3 Qualitätsnachweis Punktwolkenklassierung

Ein statistischen Nachweis über die flächendeckende Klassifikationsgenauigkeit ist auf Grund fehlender Referenzdaten ist nur schwer möglich. Bei der Klassifikation wurde daher sehr stark auf visueller Basis gearbeitet. Durch die Überlagerung einzelner Klassen mit dem vorhandenen Orthofoto (Swissimage) wurden grobe Fehler gesucht und allenfalls bereinigt.



Abbildung 25: Beispieldarstellung für die visuelle Überprüfung der Klassifikation (dargestellt ist die Klasse 6-Gebäude)

Diese visuelle Kontrolle wurde flächendeckend jeweils für die Klasse 2-Ground, 4-Hohe Vegetation, 6-Gebäude, 13-Brücken und 15-weitere Kunstbauten durchgeführt.

Stichprobenweise wurde anhand von 6 Referenzflächen die Daten per Feldbegehung überprüft. Fazit: die geforderte Klassifikationsgenauigkeit über sämtliche Klassen wird eingehalten bzw. teilweise übertroffen.

Eine Überprüfung durch die unabhängige Verifikationsstelle bestätigt dieses Fazit. Die im Verifikationsbericht beanstandeten Mängel (Dachaufbauten, Fassaden, bodennahe Punkte) wurden mit der Nachprozessierung so gut wie möglich behoben (siehe Abschnitt 2.6).

2.5 Verifikation

Die Ergebnisse der Verifikationsstelle wurden am 7.6.2012 in Meiringen besprochen. Auf Grund der Ergebnisse kann festgehalten werden, dass hinsichtlich der Geometrie (Lage- und Höhengenaugigkeit) der Punktwolke keine Bedenken festzuhalten sind. Bezüglich der Punktdichte existieren im Osten des Projektes mehrere Gebiete mit reduzierter Punktdichte (siehe Abbildung nachfolgend). Diese sind auf das bewegte Gelände zurückzuführen und werden nicht nachgeflogen. Die Dokumentation dieser Gebiete erfolgt in Form der abgegebenen Metadaten (insbesondere durch die Raster-Dokumentation der DOM-Punktdichte).

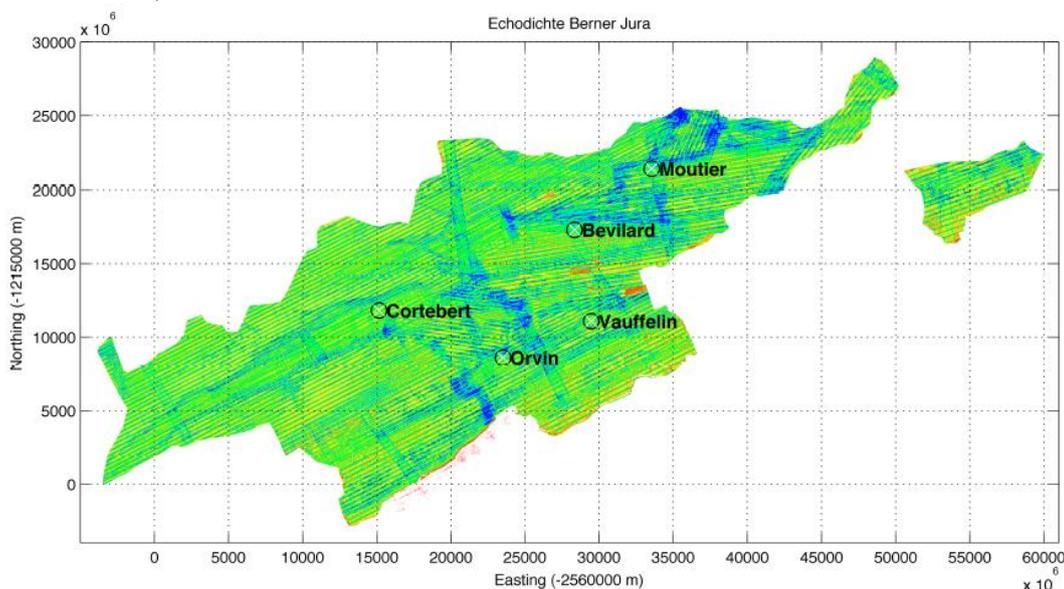


Abbildung 26: Übersicht über die Punktdichte Berner Jura 2011 (Quelle: Verifikationsbericht Felix Morsdorf, RSL Uni Zürich)

Bezüglich der Klassifikationsgenauigkeit wird auf die Probleme in Stadtgebieten eingegangen. Gemäss gemeinsamen Beschluss vom 7.6.2012 ist hier eine weitgehend automatische Nachprozessierung, sowie die Einführung von zwei weiteren Punktklassen (Klasse 18 und 19) angebracht. Diese Arbeiten wurden im Herbst 2012 durchgeführt und sind im folgenden Abschnitt 2.6 kurz beschrieben.

Am 2.7.2012 wurde der überarbeitete Verifikationsbericht dem Auftragnehmer zugestellt. Dieser ist in der definitiven Datenlieferung enthalten.

2.6 Nachprozessierung nach Verifikation

Im Rahmen der Einarbeitung des Nachfluges im Sommer 2012 wurde gemäss Verifikationsbesprechung folgende Arbeiten zusätzlich durchgeführt.

2.6.1 Problem Fassaden

Durch die hohe Querüberdeckung und den resultierenden grossen Öffnungswinkel wurden viele Punkte auf Fassaden gemessen. Diese Punkte wurden bei der Nachprozessierung in eine eigene Klasse 18-Loeschungen und beständig automatisch umklassiert.



Abbildung 27: Beispielausschnitt für die Klasse 18-Loeschungen und beständig (es sind nur diese Punkte rot dargestellt)

2.6.2 Problem Dachaufbauten

Viele Punkte auf Dächern (Antennen, Dachaufbauten geringer Grösse, Dachrinnen, Kamine etc) wurden fälschlicherweise als Vegetation klassiert. Mittels eines ausgetüftelten Makros wurden diese innerhalb von Gebäuden liegenden Punkte umklassiert in die Klasse 19–Dachaufbauten. Dies geschah ohne flächendeckende visuelle Kontrolle.



Abbildung 28: Beispielausschnitt für die Klasse 19-Dachaufbauten
(es sind nur diese Punkte rot dargestellt)

2.6.3 Problem tiefe Vegetation/Rauschen

Bei der ersten Datenlieferung wurden gemäss Pflichtenheft alle Punkte zwischen 0 und 3.0 Meter über dem DTM der Klasse 3-Vegetation tief zugewiesen. Dies führte in städtischen Gebieten zu Verwirrung, da hier auch viele Punkte enthalten waren, welche eigentliches Messrauschen (entweder durch Scannersystem und/oder durch natürlich bedingte Begebenheiten) enthalten waren. Diese Klasse wurde nachträglich in die Klasse 3-Vegetation tief (enthält alle Punkte zwischen 0 und 0.3 m über DTM) und die Klasse 4-Vegetation mittel eingeteilt. Dadurch wird das Messrauschen besser separierbar.



Abbildung 29: Beispielausschnitt für die Klasse 3-Vegetation tief (bzw. Rauschen, links) und Klasse 4-Vegetation mittel (rechts)

Mit dieser Nachprozessierung konnte die Qualität der Klassifikation in städtischen Bereichen erheblich verbessert werden. Die Vorgaben des Pflichtenheftes werden damit übererfüllt.

2.6.4 Problem verringerte Punktdichte

Im östlichen Teil des Projektes sind teilweise auf Grund der schwierigen Topographie Probleme mit der Punktdichte aufgetaucht.

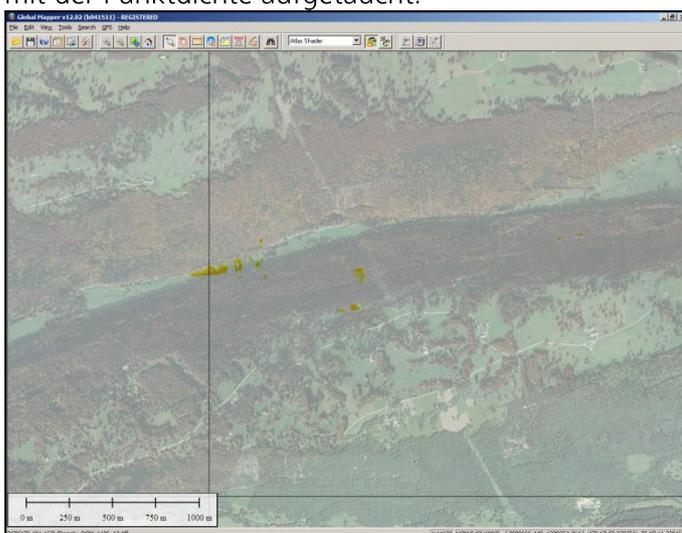


Abbildung 30: Beispielausschnitt für Problemgebiete mit Punktdichte $< 4 \text{ Pt/m}^2$ (orange: zwischen 1 und 4 Pt/m^2)

Diese Probleme wurden mithilfe einer georeferenzierten Rasterkarte (siehe Ordner „Punktdichte_DOM“ dokumentiert.

2.7 Definitive Datenlieferung

Die definitive Datenlieferung umfasst folgende Produkte und Qualitätssicherungs-Dokumente:

2.7.1 Digitales Oberflächenmodell DOM

- Projektionssystem und Höhenbezug: CH1903plus/LHN95 und CH1903/LN02
- Rohformat: LAS und ASCII XYZCI
- Rasterformat: ArcInfo ASCII Grid und XYZ (Rasterauflösung: 50cm)
 - Gridberechnung: pro 0.5m Raster wird der höchste Punkt gewählt. Bei fehlenden Punkten werden die Nachbarzellen gewichtet gemittelt (bis zu 10 Pixel).
- Kacheleinteilung: 1/16 LK-Raster
- Enthaltene Klassen: Boden (2), Vegetation tief (3), Vegetation mittel (4), Vegetation hoch (5), Gebaeude (6), Wasser (9), Bruecken (13), weitere Kunstbauten (15), Loeschungen und beständig (18) und Dachaufbauten (19)

2.7.2 Digitales Geländemodell DTM

- Projektionssystem und Höhenbezug: CH1903plus/LHN95 und CH1903/LN02
- Rohformat: LAS und ASCII XYZ
- Rasterformat: ArcInfo ASCII Grid und XYZ (Rasterauflösung: 50cm)
 - Gridberechnung: die Punkte werden trianguliert und für jede Rasterzelle eine Höhe interpoliert, dabei wird auf eine lückenlose Triangulation geachtet
- Kacheleinteilung: 1/16 LK-Raster
- Enthaltene Klassen: Boden (2)

2.7.3 Punktwolke

- Projektionssystem und Höhenbezug: CH1903plus/LHN95 und CH1903/LN02
- Rohformat: LAS und ASCII XYZCI
- Kacheleinteilung: 1 km² Raster
- Enthaltene Klassen: default (1), Boden (2), Vegetation tief (3), Vegetation mittel (4), Vegetation hoch (5), Gebaeude (6), Punkte unter Ground (7), Wasser (9), Loeschungen und unbeständig (10), Luftpunkte (11), Kehrpunkte (12), Bruecken (13), weitere Kunstbauten (15), Loeschungen und beständig (18) und Dachaufbauten (19)

Hinweis: Hier sind sämtliche gemessenen Punkte vorhanden. Die Attribute Fluglinie (sourceID, Intensität, Scanwinkel etc. sind ebenfalls enthalten)

2.7.4 Flugwege / Trajektorien

- Projektionssystem und Höhenbezug: CHTRS95/ellipsoidische Höhen
- Format: SBET Format

Erläuterung: Hier sind die Trajektorien welche zur Berechnung der Punktwolke verwendet wurden gemäss Pflichtenheft dokumentiert.

2.7.5 Datenlücken

- Projektionssystem: CH1903plus
- Format: ESRI Shape

Erläuterung: die fehlenden Gebäude sind als Vektoren erfasst und als eine Gesamtdatei ausgegeben worden. Datenlücken >500 m² sind keine vorhanden (innerhalb des Projektperimeters).

2.7.6 Punktdichte

- Projektionssystem: CH1903plus
- Format: GeoTIFF mit zusätzlichem Rasterheader (.tifw)

Erläuterung: Zur Qualitätskontrolle und zur Dokumentation des Datensatzes wurden Rasterkarten mit der Punktdichte pro Quadratmeter erstellt. Diese sind im Ordner Punktdichte_DOM bzw. Punktdichte_DTM gesammelt.



Abbildung 31: Dichtekarte von DTM (weiss/transparent: >4 Pkt/m², gelb: zw. 2 und 4 Pkt/m², orange: 1Pkt/m², rot= keine Punkte)

Hinweis: die Dichtekarte soll Problemgebiete aufzeigen. Der „Sample radius“ ist mit acht Metern relativ hoch gewählt um ein „glätteres“ Bild zu bekommen.



Abbildung 32: Dichtekarte von DOM (weiss/transparent: >4 Pkt/m², gelb: zw. 2 und 4 Pkt/m², orange: 1Pkt/m², rot= keine Punkte) -> bei DOM: nur Wasserflächen (oder Erfassungslücken).

Zusätzlich zu diesen Plots der Punktdichte wurden Datenlücken auf Grund fehlender Reflektanz von Gebäudedächern als Vektorelemente erfasst. Diese Vektorelemente sind in der Datei „FehlendeGebaeude.shp“ dokumentiert.

2.8 Beurteilung Berner Jura 2011

- Das Pilotprojekt darf als gelungen bezeichnet werden. Die Datenqualität erfüllt die hohen Anforderungen des Pflichtenheftes.
- Die grössten Probleme liegen (erwartungsgemäss) bei der Punktdichte vom DTM. Im Wald sind doch teilweise erhebliche Datenlücken am Boden vorhanden. Dies ist aber primär naturbedingt und kann mit Airborne Laserscanning auch mit höherer Punktdichte auftreten (dichter Nadelwald ist fast undurchdringbar). Der Entscheid höher zu fliegen mit höherer Querüberdeckung hat dieses Problem entschärft (allerdings weniger als zunächst erwartet).
- Ein weiteres Problem liegt bei den Differenzen zwischen den Flugstreifen. Hier sind bereits kleinste Abweichungen rasch im DTM (und DOM) sichtbar. Obwohl die Vorgabe (weniger als 15cm) mehrheitlich eingehalten wurde, sind die „Scanstreifen“ in der schattierten Ansicht teilweise deutlich sichtbar. Dies liegt daran, dass das Streifenmatching in ländlichen Gebieten relativ wenig ebene Flächen findet. Daher ist dort fast überall mit diesen minimalen Effekten zu rechnen. Die Klassierung der Kehrpunkte hat dieses Problem etwas entschärft, aber leider nicht zu 100% zufriedenstellend gelöst.
- Auf Grund von idealen Bedingungen bei der Befliegung 2011 konnte eine ausgezeichnete Qualität der Produkte gewährleistet werden. Dies ist dem Umstand der relativ geringen Projektgrösse und der sehr guten Witterungsbedingungen im Frühjahr 2011 zuzuschreiben. Gesamtheitlich kann das Projektergebnis als gut bis sehr gut bezeichnet werden und entspricht dem aktuellen Stand der Technik.

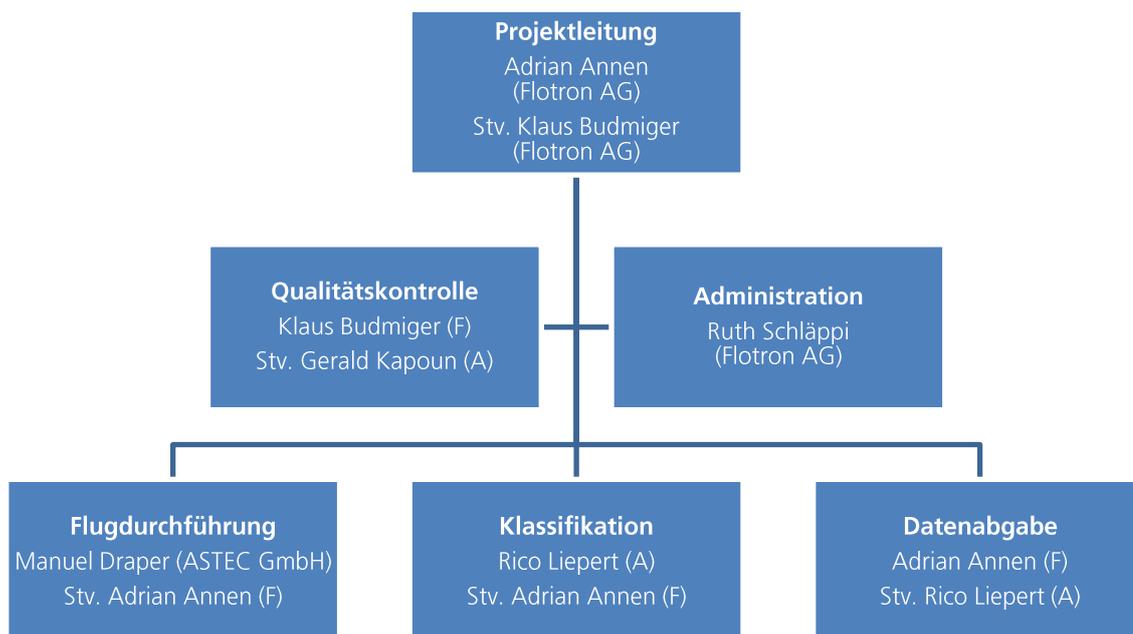
3 Etappe 1 – östlicher Kantonsteil 2012

3.1 Ausgangslage

Als Grundlage für die technische Ausführung des Projektes gelten die Offerte vom 8.8.2011 und die Ausschreibungsunterlagen (inkl. Pflichtenheft) vom 21.6.2011 (Version 1.0).

3.1.1 Projektorganisation

Beteiligte Firmen / Projektorganigramm LiDAR BE 2012 1. Etappe:



Dieses Organigramm zeigt die für die Projektausführung verantwortlichen Personen. Für die Arbeitsausführung können diese Personen auf genügend Mitarbeiter der ASTEC GmbH (A) und der Flotron AG (F) zurückgreifen.

Funktion	Beschreibung
Projektleitung	<ul style="list-style-type: none"> - Hauptansprechpartner gegenüber dem Kunden - Terminkontrolle - Finanzkontrolle - Einsatzplanung Personal - Kommunikation intern - Redaktion des technischen Berichtes - Projektorganisation
Qualitätskontrolle	<ul style="list-style-type: none"> - Unabhängiges Überprüfen ob die internen Qualitätskontrollen festgelegt wurden, eingehalten und dokumentiert werden - Unabhängige Kontrolle der Termine und Finanzen

Flugdurchführung	<ul style="list-style-type: none">- Durchführung des Fluges- Berechnung der Punktwolke in LV95/LHN95- Kontrolle anhand von Passflächen
Klassifikation	<ul style="list-style-type: none">- Verarbeitung der Punktwolke zu DTM und DOM- Erstellung Endprodukte LV95/LHN95
Datenabgabe	<ul style="list-style-type: none">- Geometrische Kontrollen und überprüfen der Klassifikation (Endkontrolle, nach internen Richtlinien)- Transformation nach LV03/LN02- Lieferung der Daten an Auftraggeber

3.1.2 Perimeter / Projektanforderungen (Zusammenfassung)

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

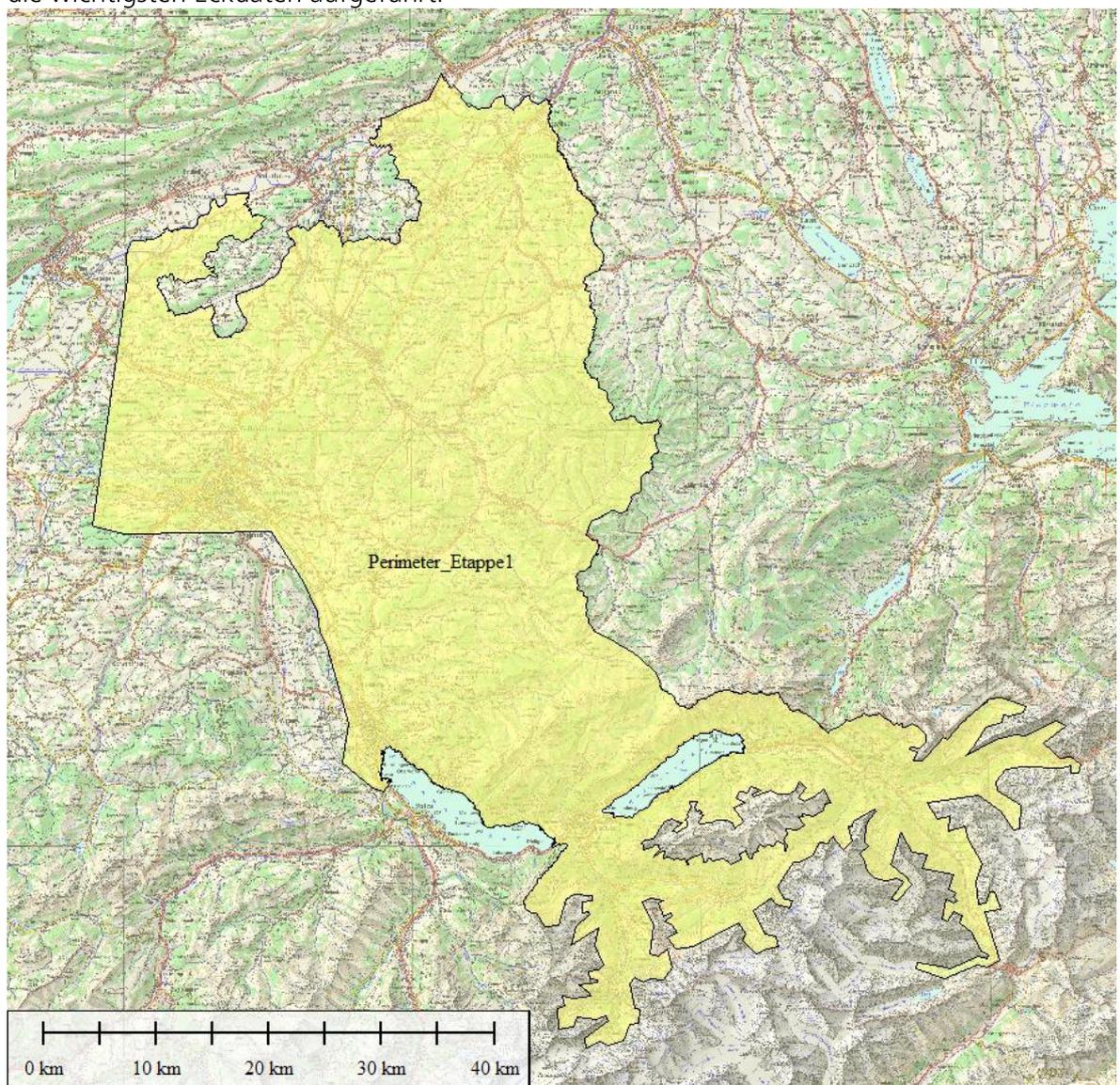


Abbildung 33: Perimeter Projektgebiet (Fläche ca. 2519 km²)

Punktdichte	mind. 4 Pt / m ²
Höhengenauigkeit ausserhalb Wald	< ±0.2 m
Höhengenauigkeit Baumkronen	< ±1.0 m
Lagegenauigkeit	< ±0.3 m
Höhendifferenz zwischen Linien	< ±0.15 m
Projektionssystem	CH03+ / LHN95
zusätzliches Projektionssystem	CH03 / LN02
5 Klassen	Boden, Vegetation tief und hoch, Gebäude, Brücken und weitere Kunstbauten

3.2 Flugplanung

Nachfolgend sind das zur Verfügung stehende Messsystem und die Flugplanung vorgestellt und die wichtigsten Überlegungen dokumentiert.

Auf Grund der schwierigen Topographie wird das Projektgebiet in zwei Perimeter unterteilt. Die flacheren Gebiete (Seeland, Gürbetal und Emmental) werden mit einem Flächenfliegersystem befliegen. Die Gebiete im Berner Oberland werden mit einem Hubschraubergestützten System befliegen. Zudem wird das „Hubschraubergebiet“ unterteilt in tiefe Lagen (unter 1400 m.ü.M.) und hohe Lagen. Diese Unterteilung soll einen optimalen Befliegungszeitpunkt (ohne Laub) ermöglichen. Witterungsbedingte lokale Anpassungen sind im Hubschraubergebiet unumgänglich. Deshalb wird die Planung der Fluglinien der hohen Lagen nach Abschluss der Befliegung der tiefen Lagen fertiggestellt.

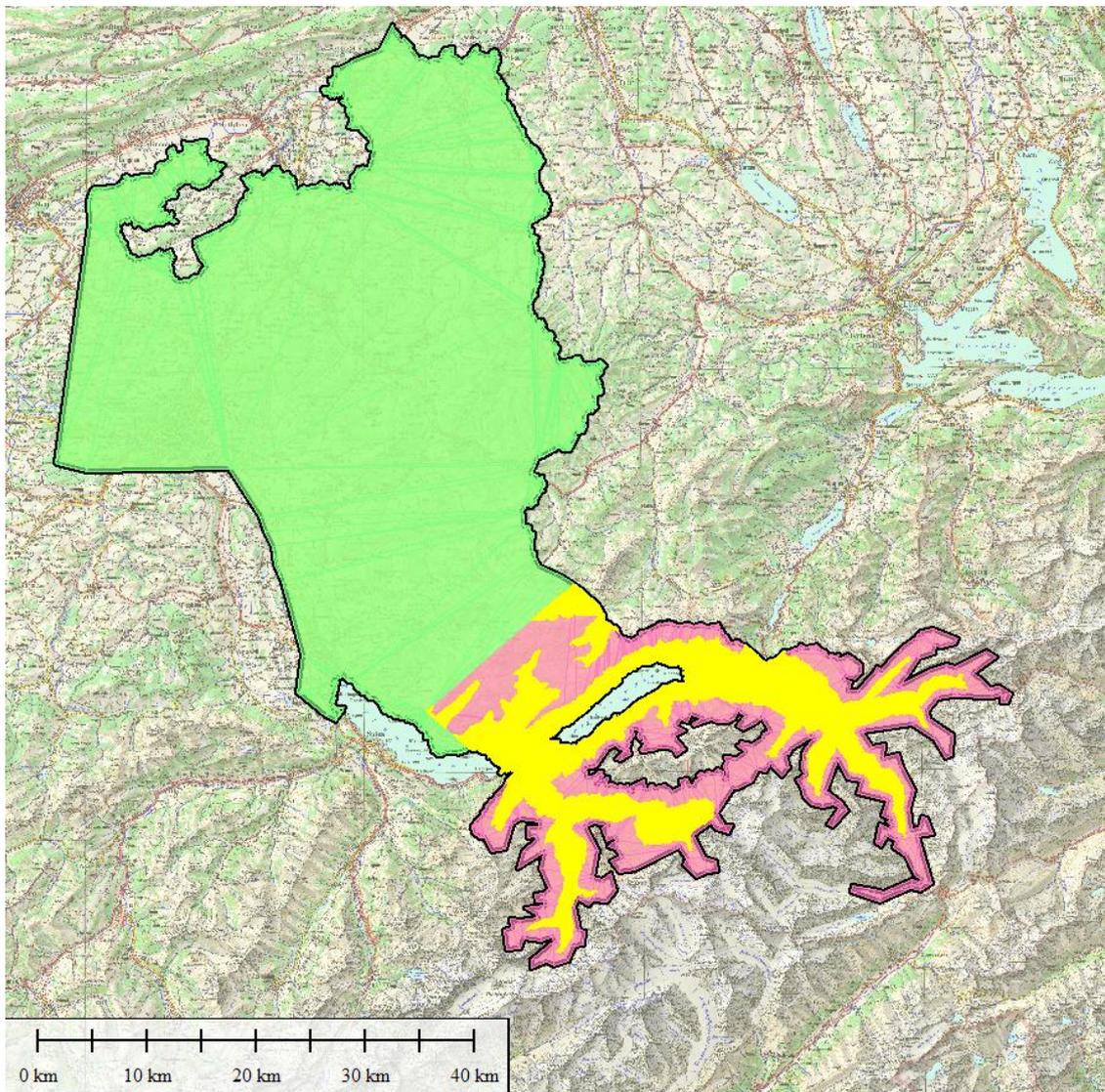


Abbildung 34: Unterteilung der Gebiete (grün: Flächenflieger, pink/gelb: Hubschrauber)

3.2.1 Systembeschreibung Leica ALS70

Im Befliegungszeitraum steht das folgende Equipment zur Verfügung (Eigentum und betrieben durch ASTEC GmbH):

Flugzeug	Partenavia (Hochdecker)
Laser Scanner	Leica ALS70
GPS	GPS/INS-unit von Leica
IMU	IPAS20 (CUS6 IMU / GPS/GLONASS)
GPS / INS processing	Leica IPAS TC-software
Software	TerraScan, TerraModeler, TerraMatch von TerraSolid FI
GPS für Feldvermessung	Trimble R8 GNSS
GPS Auswertprogramm	Trimble Business Studio

Systemparameter	
Reichweite des Lasers	bis 6000m
Empfohlene max. Flughöhe	bis 5000m über Grund
Laserpulsrate	22 – 200kHz
Scanfrequenz	0 – 100Hz
Öffnungswinkel (FOV)	11-75°
Divergenz	0,22mrad @ 1/e ²
Multiple Impuls	ja (bis zu 2)
Multiple Echos pro Impuls	1-4
Intensitätsaufzeichnung	ja
Rollwinkelkompensierung	ja
Bildaufzeichnung	ja

Abbildung 35: ALS 70 System-Spezifikationen (Auswahl)

Für weitergehende Informationen zum ALS 70 verweisen wir auf die Prospekte der Firma Leica-Geosystems

3.2.2 Systembeschreibung TopEye MKIII

Die wichtigsten Kenndaten des gemäss Änderungsantrag vom 1.3.2012 eingesetzten Systems sind:

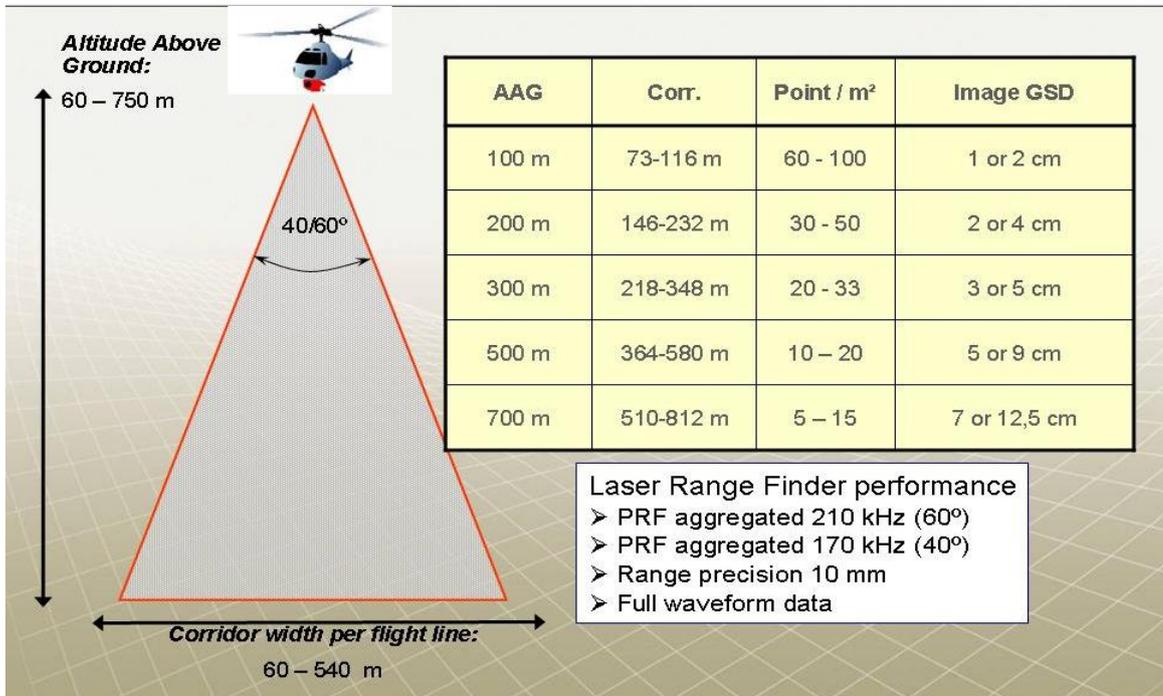


Abbildung 36: Übersicht TopEye MK-III

Das System TopEye MKIII arbeitet mit einem Laserscanner Riegl LMS-Q560 (Wellenlänge 1550nm). Der Laserscanner arbeitet mit einem rotierenden Spiegel (Rotating Mirror) welcher parallele Linien abbildet.

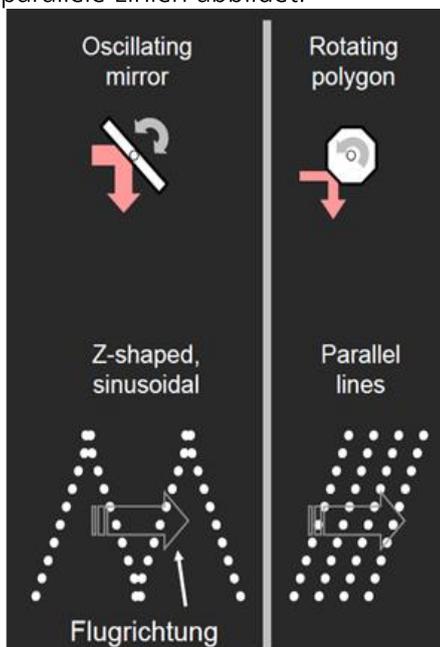


Abbildung 37: Übersicht der eingesetzten Scan-Muster (links ALS70, rechts Riegl LMS-Q560)

Das System wurde von Flotron AG (in Zusammenarbeit mit Blom SWE) bereits erfolgreich in mehreren Befliegungen für Hochspannungsleitungen in gebirgigem Gelände eingesetzt.

Die detaillierten Spezifikationen des eingesetzten Laserscanners sind auf Anfrage erhältlich aufgeführt. Integraler Bestandteil des Systems ist zudem eine kalibrierte Framekamera (Leica RCD 30) mit welcher georeferenzierte Luftbilder simultan erfasst werden. Diese Bilder sind für die Klassifikation der Punktwolke hilfreich sind aber aus diversen Gründen nicht Bestandteil des abzuliefernden Produktes.

3.2.2.1 Begründung Einsatz System TopEye

Vorteile:

- Die (voraussichtlich kurze) Phase der Schneefreiheit vor dem Laubaustrieb kann optimal mit zwei gleichzeitig eingesetzten Systemen genutzt werden.
- Das System TopEye MKIII ist besser geeignet für langsam fliegende Plattformen (Hubschrauber). Wir erhalten eine homogenere Punktverteilung und die Gefahr Datenlöcher in schwierigem Gelände zu erhalten vermindert sich erheblich.
- Die Punktdichte wird bei der vorgesehenen Flughöhe über Grund von 700m ca. 5 Pkt/m² (im Streifen) betragen. Dies ist mehr als im Pflichtenheft verlangt. Zudem werden durch die Wahl der Querüberdeckung von 30% grosse Teile des Projektgebietes mit einer deutlich höheren Punktdichte abgedeckt.

Nachteile:

- Es wird nicht dasselbe System für die gesamte Befliegung eingesetzt

3.2.3 Flugplanung Flächenflieger

Bei der Durchführung der Befliegung werden folgende Einstellungen des Laserscanners verwendet:

Parameter	Einstellung
Öffnungswinkel (FOV)	23.0°
Flughöhe über min Grund	Max. 1680 m
Fluggeschwindigkeit (Max. über Grund)	Max. 120 kn
Laser Pulse Rate	Ca. 169000 Hz
Scan Frequenz	Ca. 66 Hz

Abbildung 38: ALS70 Scanner Setup LiDAR BE 2012 Flächenflieger

Die Einstellungen des Laserscanners resultieren für die Laserscanstreifen in folgenden Eigenschaften:

Kenndaten Gebiet „Flächenflieger“	
Gebietsgrösse	1811.8 km ²
Anzahl der Flugstreifen	280 (+12 Querstreifen)
Totale Länge der Flugstreifen	5621.9 km
Distanz zwischen den Flugachsen	Mittel ca. 350 m

Querüberdeckung	30%
Breite eines Scanstreifens	Max. 558m
Resultierende Punktdichte	Min. 4 Pt/m ²
Spotdurchmesser am Boden	Max. 40cm

Abbildung 39: Flugstreifeneigenschaften Gebiet „Flächenflieger“

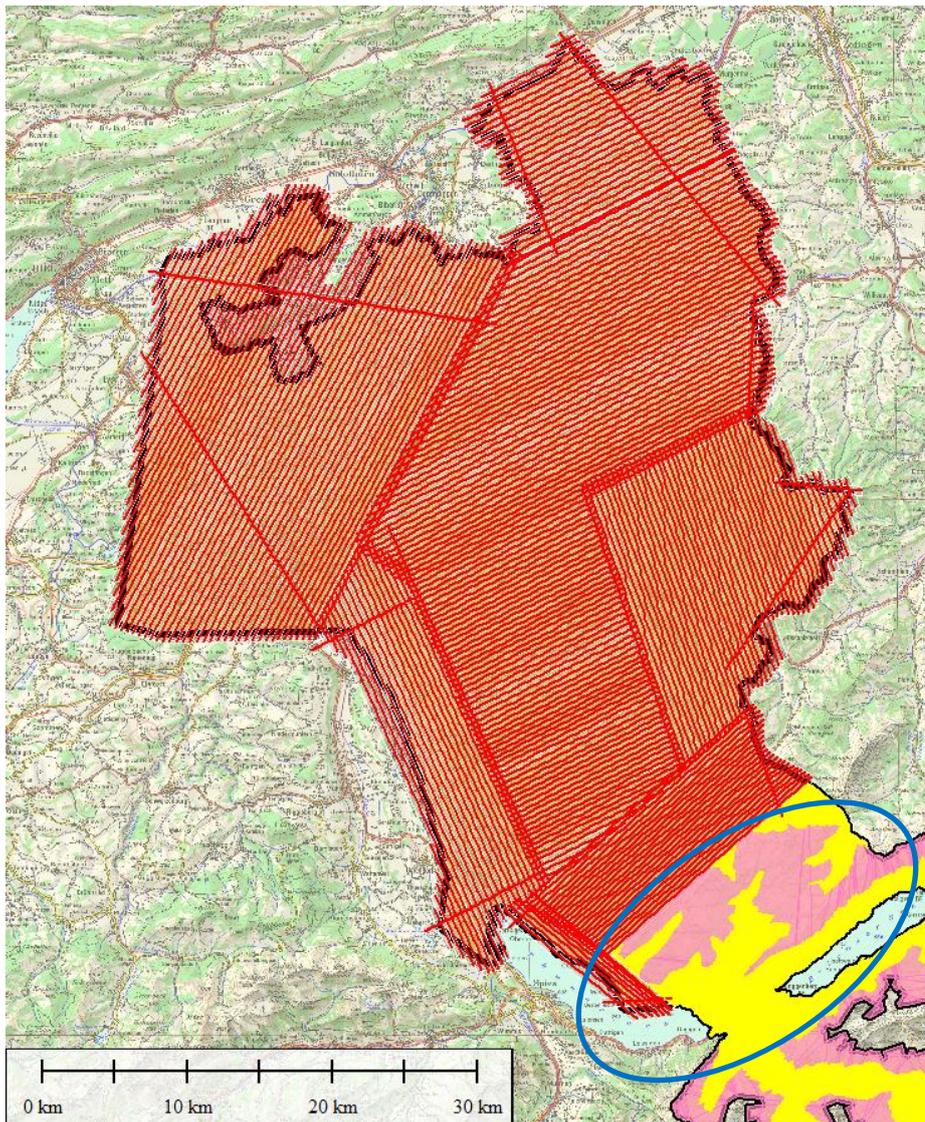


Abbildung 40: Flugplanung Flächenflieger, blau eingekreister Block: angepasste Parameter (siehe unten)

Auf Grund der anspruchsvollen Topografie im Emmental (höhere Lagen) wurde für den in Abbildung 6 blau eingekreisten Block die Flugparameter leicht angepasst. Hier werden folgende Parameter verwendet:

Parameter	Einstellung
-----------	-------------

Öffnungswinkel (FOV)	15.0°
Flughöhe über min Grund	2120 m
Fluggeschwindigkeit (Max. über Grund)	Max. 120 kn
Laser Pulse Rate	Ca. 136500 Hz
Scan Frequenz	Ca. 63 Hz

Abbildung 41: ALS70 Scanner Setup LiDAR BE 2012 Flächenflieger (Teilblock Emmental hoch)

Diese angepassten Flugparameter gelten für die 23 Flugstreifen in den höheren Lagen des Emmentals.

Die Teilblöcke wurden so angeordnet um die Befliegung nach Vegetationsstand gestaffelt durchführen zu können. Ausserdem wird so eine stufenweise Prozessierung ermöglicht.

3.2.4 Flugplanung Hubschrauber – tiefe Lagen

Mit dem Hubschrauber wird versucht dem Gelände entlang zu fliegen (konstante Höhe über Grund). D.h. es gibt keine einheitliche Flughöhe pro Linie. Der Operateur im Fluggerät entscheidet allenfalls sehr kurzfristig die Fluglinie den lokalen Gegebenheiten anzupassen (in Zusammenarbeit mit dem Piloten). Mit geeigneten Bordmitteln wird auch die Abdeckung während dem Flug überprüft und gegebenenfalls kurzfristig angepasst bzw. nachgeflogen.

Parameter	Einstellung
Öffnungswinkel (FOV)	Max. 60°
Flughöhe über min Grund	Max. 700 m
Fluggeschwindigkeit (TAS)	Max. 80 kn
Laser Pulse Rate	Ca. 150'000 Hz
Scan Frequenz	Max. 100 Hz

Abbildung 42: Scanner Setup LiDAR BE 2012 Hubschrauber (Hinweis: die Laser Pulse Rate, die Scan Frequenz und u.U. die Fluggeschwindigkeit wird dem Gelände angepasst).

Kenndaten Gebiet „Hubschrauber – tiefe Lagen“	
Gebietsgrösse	319.5 km ²
Anzahl der Flugstreifen	174 (inkl. Querstreifen)
Totale Länge der Flugstreifen	Ca. 1400 km
Distanz zwischen den Flugachsen	Mittel ca. 320 m
Querüberdeckung	Min. 30%
Breite eines Scanstreifens	Ca. 650 m
Resultierende Punktdichte	Min. 4 Pt/m ²
Spotdurchmesser am Boden	Max. 20cm

Abbildung 43: Flugstreifeneigenschaften Gebiet „Hubschrauber“

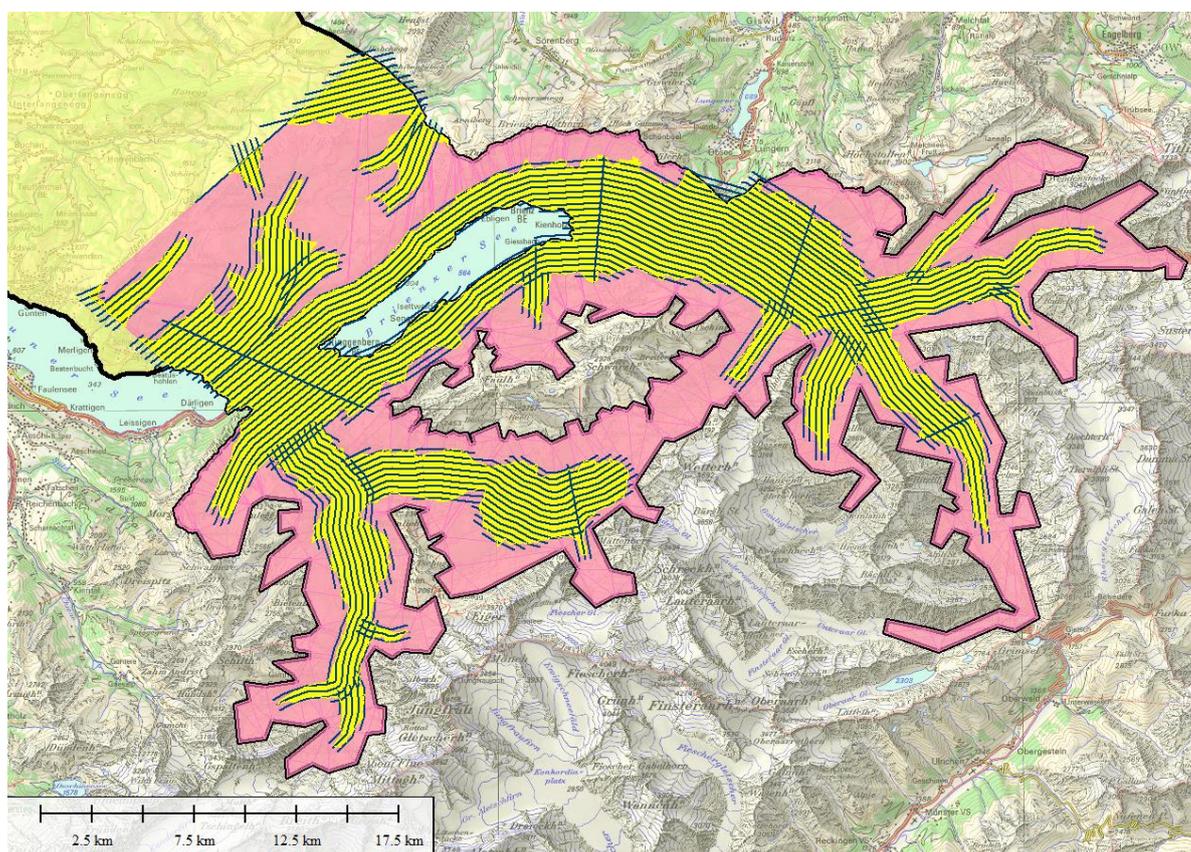


Abbildung 44: Flugplanung Hubschrauber – tiefe Lagen (vergleiche auch angehängtes KMZ-File „A2_Flugplanung_Hubschrauber_tief.kmz“)

3.2.5 Flugplanung Hubschrauber – hohe Lagen

Diese wurde im Anschluss an die Befliegung der tiefen Lagen erstellt. Auf Grund der grossen Schneemengen in den Schattenhängen mussten grosse Gebiete des Fluges der tiefen Lagen nachgeflogen werden.

Die Flugplanung wurde vom Subunternehmer Blom ausgeführt.

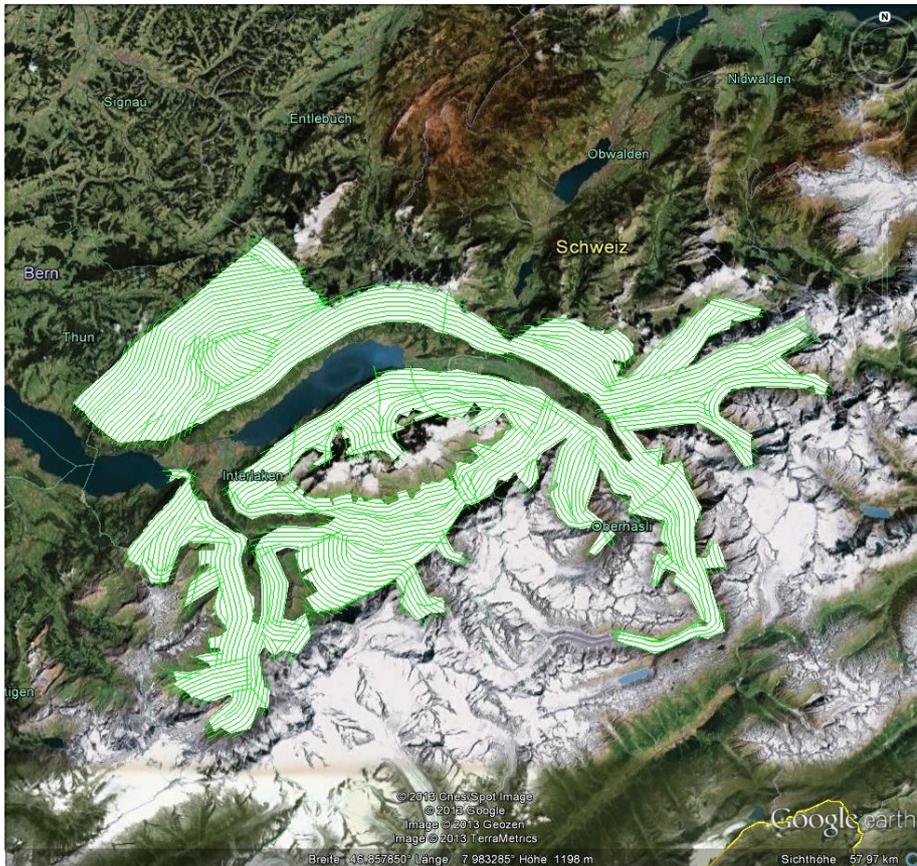


Abbildung 45: Flugplanung Hubschrauber – hohe Lagen (man beachten den hohen Überlappungsbereich zur Planung der tiefen Lagen)

3.3 Befliegung – Durchführung

Die gesamte Befliegung mit dem Flächenflieger und dem Hubschrauber konnte im Frühjahr/Sommer 2012 erfolgreich durchgeführt werden. Bei der Befliegung mit dem Hubschrauber in den hohen Lagen wurden jedoch noch Schneestellen festgestellt, die grösser als 500m² sind. Somit war eine Nachbefliegung dieser Stellen notwendig.

Das Projektgebiet wurde auf Grund der Schweizerischen Gesetzgebung (Nachtflugverbot) nur bei Tageslicht befliegen. Auf Grund der hohen Anzahl an Flugstunden wurden aber teilweise auch bei nichtidealen Bedingungen (zum Beispiel Föhnlagen, starke Winde, Turbulenzen und teilweise Schnee in Gräben etc.) geflogen.

3.3.1 Realisierung der Flüge

Total wurden an 24 Flugtagen 33 Missionen geflogen (siehe Abbildung 11). Diese sind aus der Befliegung mit dem Flächenflieger und dem Hubschrauber zusammengesetzt.

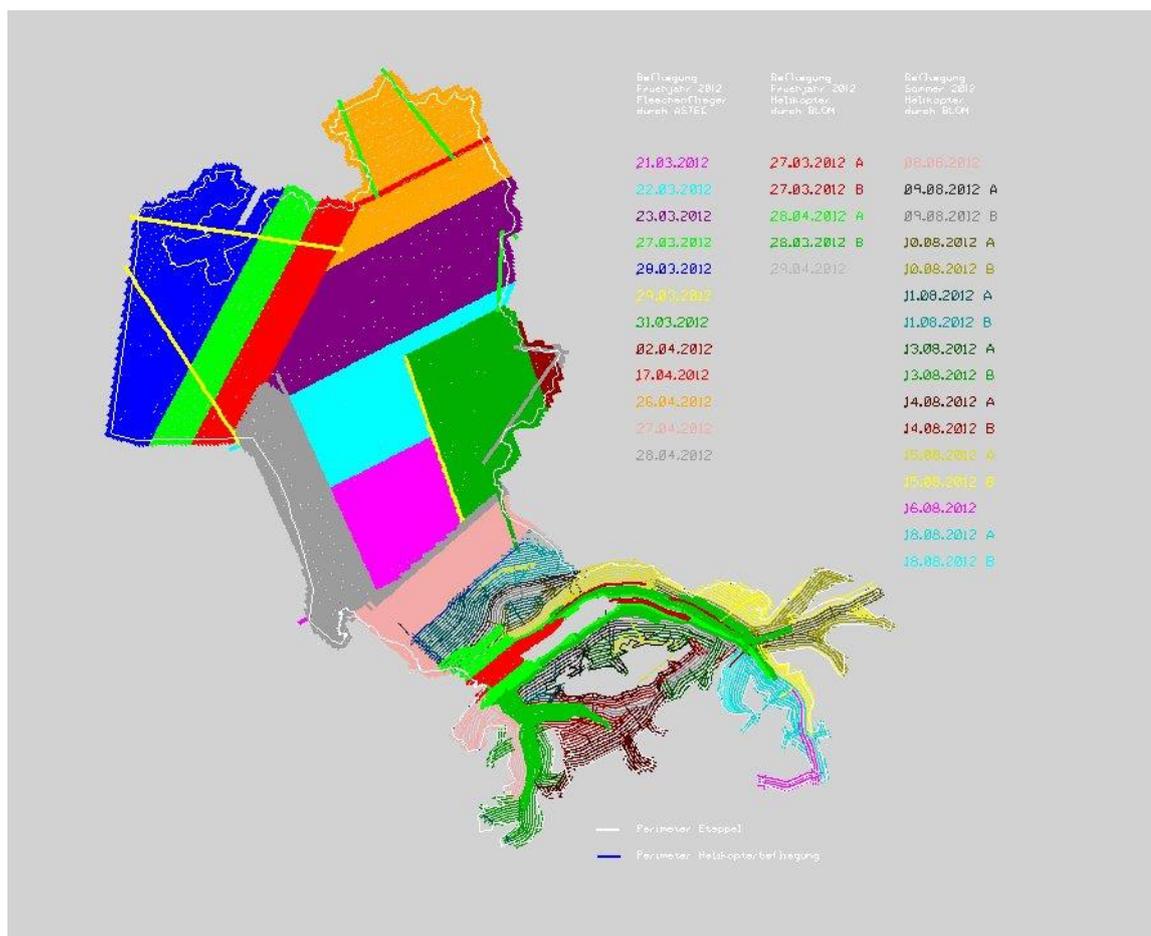


Abbildung 46: farbliche Darstellung der Flugstreifen an den unterschiedlichen Bildflugtagen

Um die Positionen des Airborne-Sensors zu bestimmen, wurden GPS-Daten mit einer Rate von 2Hz und IMU-Daten mit 200Hz aufgezeichnet. Die GPS-Daten wurden jeweils im Anschluss des Flugtages bezüglich der lokalen Referenzstation provisorisch prozessiert um allfällige Datenlücken sofort zu erkennen.

Nach Fertigstellung der Befliegung wurden die GPS-Daten bezüglich der Referenzstationen von Swipos (AGNES) prozessiert. Zusammen mit den IMU-Daten wurde die Flugbahn anschliessend bestmöglich rekonstruiert („Solution - SOL“) und somit die Positionen und Orientierungen des Sensors ermittelt.

Die daraus resultierenden erwarteten Positionsgenauigkeiten [RMS] der Messplattform für die Flugtage ist im angehängten Projektbericht des Projektpartners ASTEC GmbH (Anhang A2) dokumentiert.

3.3.2 Vollständigkeit und Punktverteilung der Befliegung

Ausgehend von der nun bekannten Position des Messsystems, wurden mit den Daten des Laserscanners (Winkel und Distanz) die Koordinaten der aufgenommenen Punkte im System CHTRS95 berechnet, in ebene LV95-Koordinaten mit ellipsoidischer Höhe abgebildet und weiterverarbeitet.

Es wurde für beide Befliegungsgebiete (Flächenflieger und Helikopter) jeweils eine Karte mit der Punktverteilung und Punktabdeckung erstellt, um diese zu prüfen.

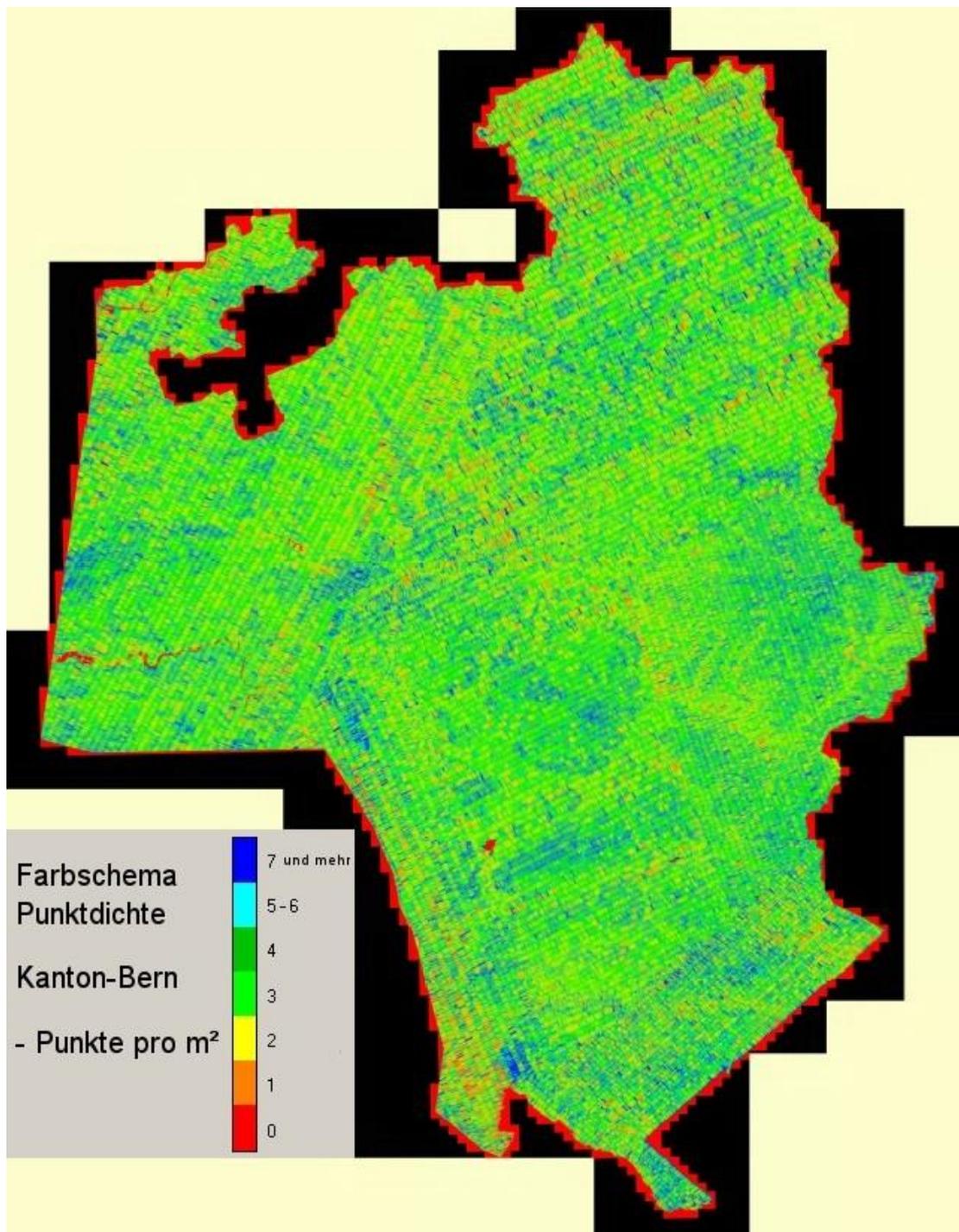


Abbildung 47: Karte zur Punktverteilung im Nordteil (Flächenflieger)

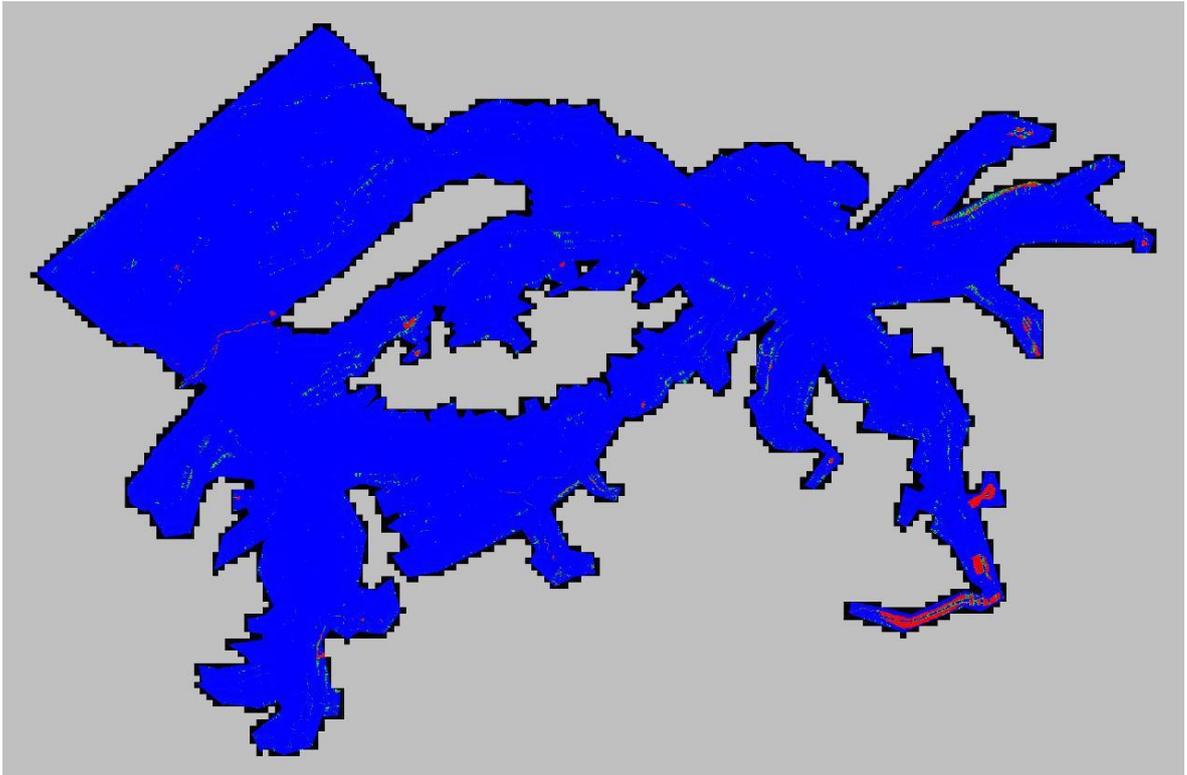


Abbildung 48: Karte zur Punktverteilung in Südteil (Helikopter, VOR definitiver Datenverarbeitung), Legende analog Abbildung 47

3.3.3 Vollständigkeit der Daten

In einer ersten Prüfung der Abdeckung des Gebietes durch die Befliegung im Frühjahr wurde festgestellt, dass mehrere Datenlücken ($> 500\text{m}^2$) durch noch vorhandene Schneebedeckungen $< 1400\text{m}$ vorhanden sind. Daher wurden alle Stellen markiert und im Sommer 2012 nachgeflogen und nachbearbeitet.



Abbildung 49: Beispiel von Lücken $>500\text{m}^2$ durch Schneeflächen in tiefen Lagen (Hinweis: wurde im Sommer 2012 nachgeflogen und eingearbeitet)

Bei der Prüfung der Befliegung im Sommer auf Vollständigkeit wurden bei der definitiven Prozessierung leider noch einzelne Lücken festgestellt. Diese sind bis auf wenige Ausnahmen auf kleine Wasser- und Gletscherstellen zurückzuführen und lassen sich selbst im Hochsommer nicht vermeiden. Es muss erwähnt werden, dass hier die Topographie in Form von Steilhängen sich als sehr schwierig erweist und nicht immer zu 100% abgedeckt werden kann. Probleme machten u.a. auch die schwierig zu erfassenden Schnee- und Gletscherflächen.



Abbildung 50: Datenlücke in der Nähe von Konolfingen
(Hinweis: wurde im Herbst 2014 nachgeflogen und eingearbeitet)

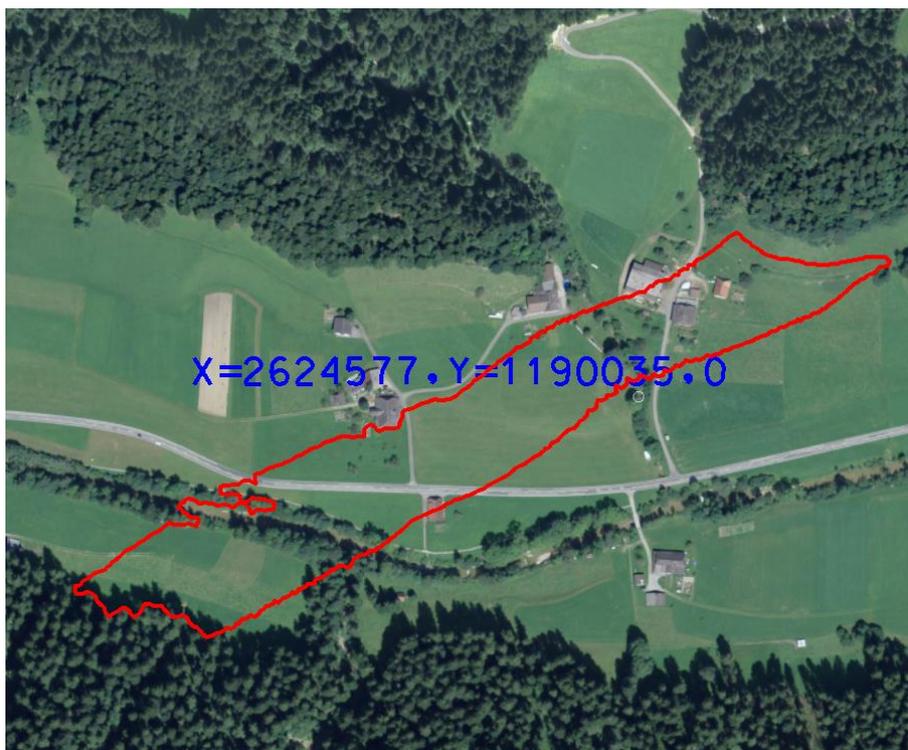


Abbildung 51: Datenlücke im Emmental
(Hinweis: wurde im Herbst 2014 nachgeflogen und eingearbeitet)

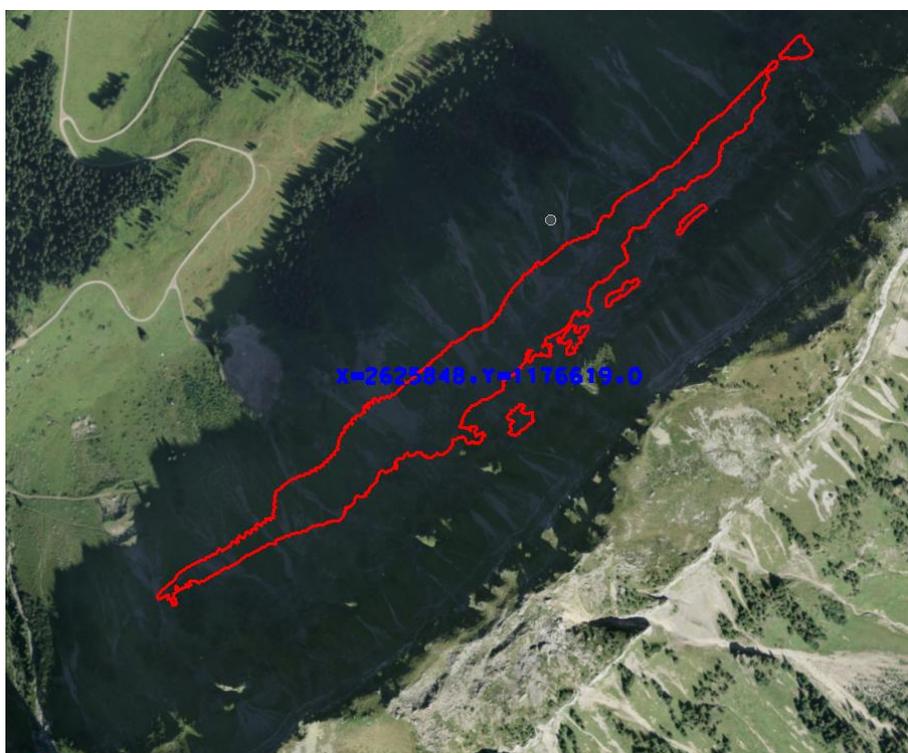


Abbildung 52: Datenlücke im Justistal
(Hinweis: wurde im Herbst 2014 nachgeflogen und eingearbeitet)

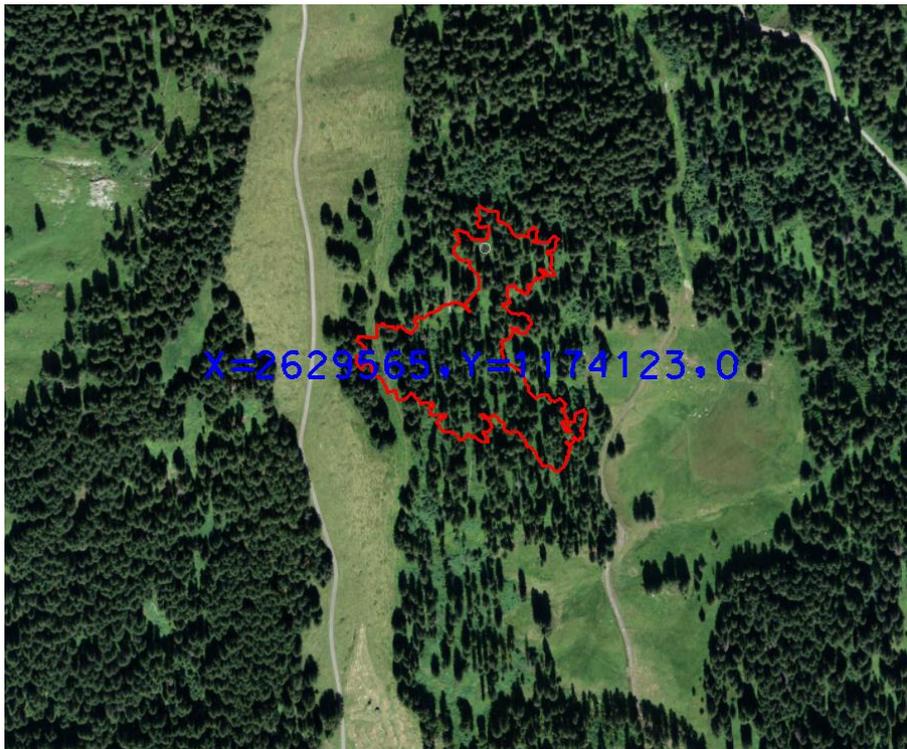


Abbildung 53: Datenlücke zwischen Beatenberg und Habkern
(Hinweis: wurde im Herbst 2014 nachgeflogen und eingearbeitet)

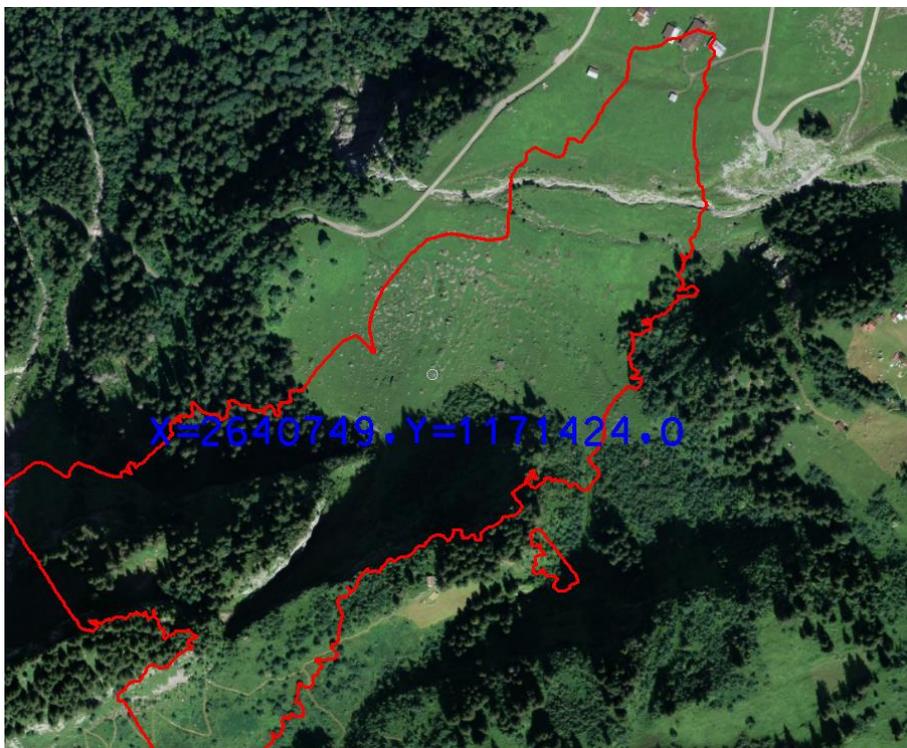


Abbildung 54: Datenlücke bei Iseltwald
(Hinweis: wurde im Herbst 2014 nachgeflogen und eingearbeitet)

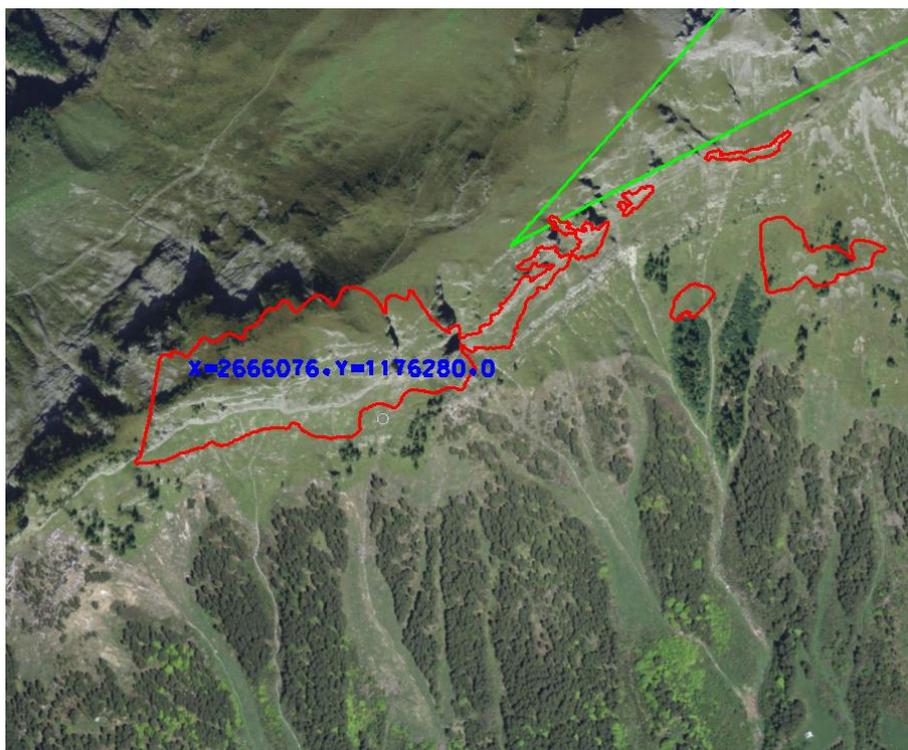


Abbildung 55: Datenlücken oberhalb Gadmen I auf Grund Schnee

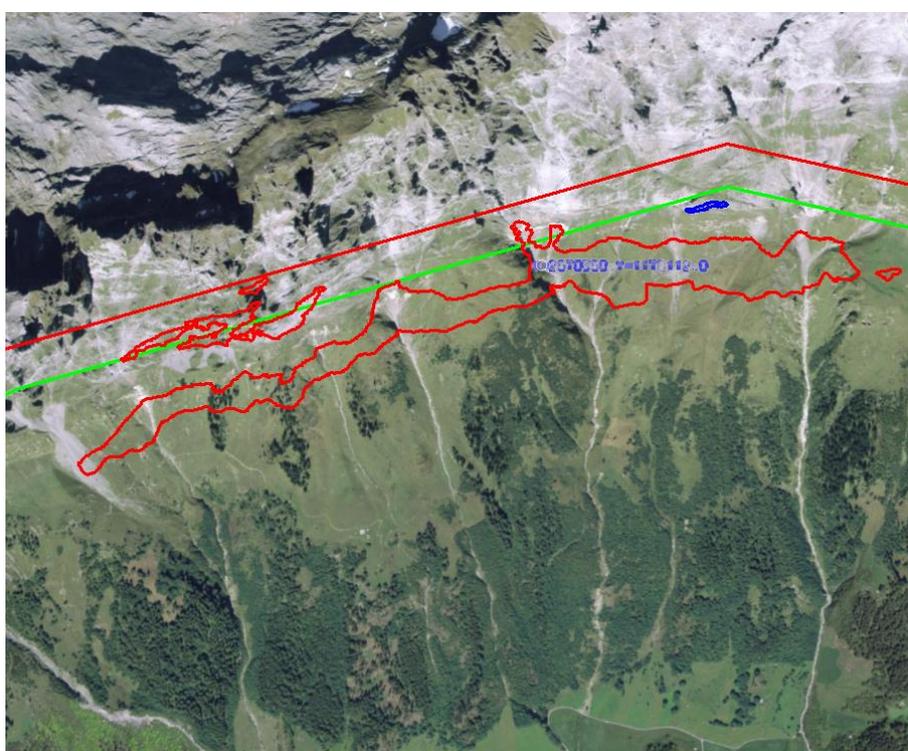


Abbildung 56: Datenlücken oberhalb Gadmen II auf Grund Schnee

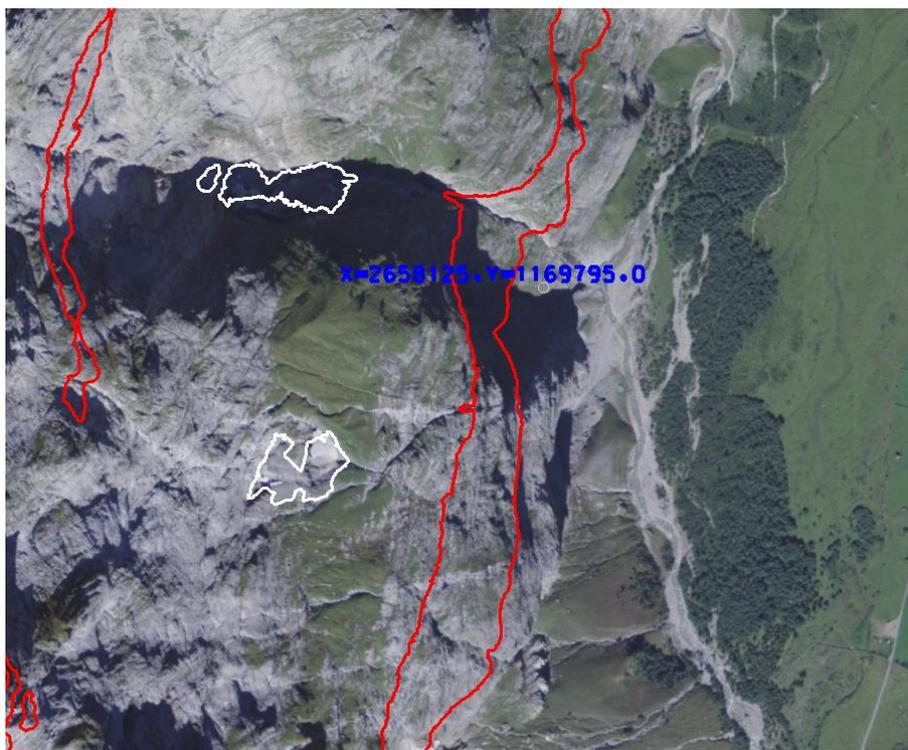


Abbildung 57: Datenlücken im Urbachtal (Ausschnitt)

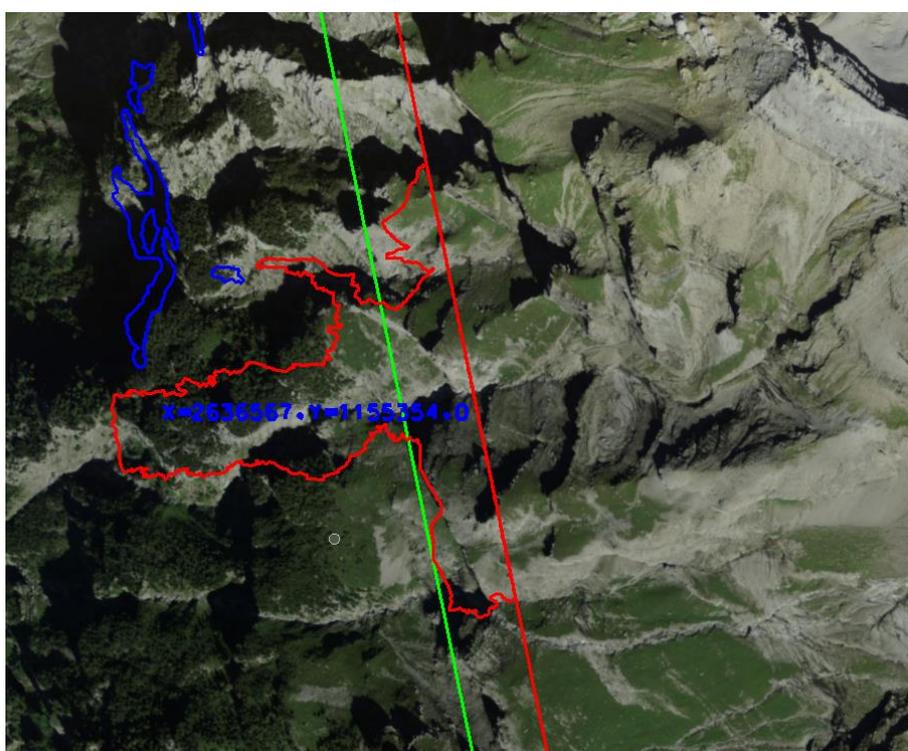


Abbildung 58: Datenlücke oberhalb Stechelberg auf Grund Schnee

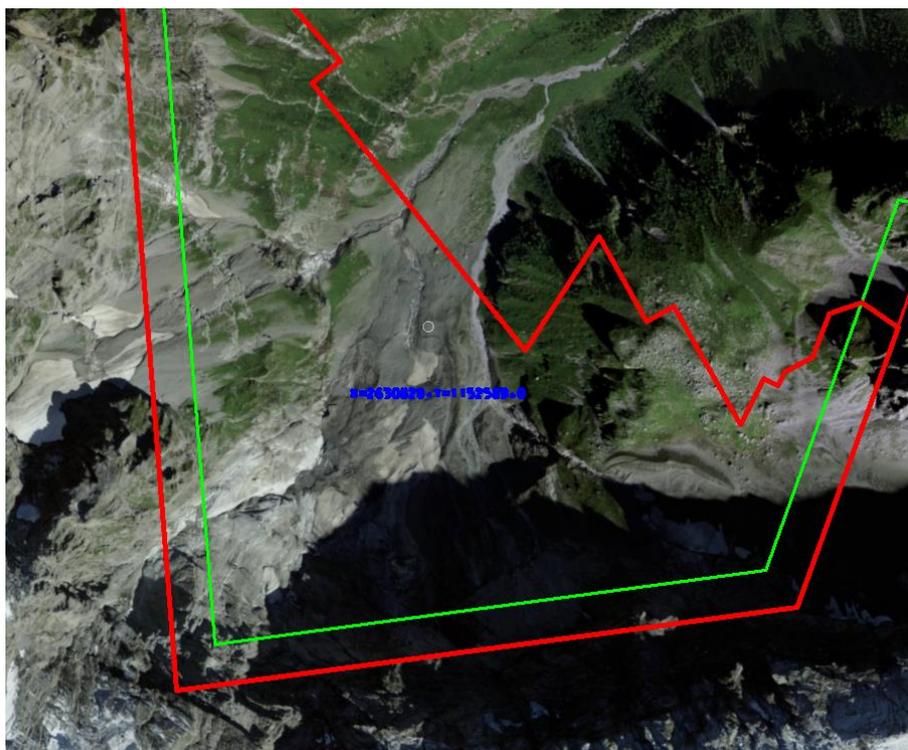


Abbildung 59: Datenlücke oberhalb Stechelberg

Die Datenlücken sind mehrheitlich auf schwierige Bedingungen bei der Befliegung zurückzuführen.

3.3.4 Punktverteilung der Daten

Bei der Punktverteilung der Daten von den Helikopterflügen kann gesagt werden, dass im Durchschnitt 4 Punkte pro Quadratmeter mehr als erreicht werden konnten (s. Abb. 14, blaue Farbe). Lediglich an den schon angesprochenen Steilhängen kommt es zu einer geringeren Punktverteilung (grüne Farbe) und zu teilweisen Lücken (rote Farbe).

Für das Gebiet des Flächenfliegers ist auch im Durchschnitt eine Punktverteilung von 4 Punkten pro Quadratmeter erreicht worden, jedoch nicht so homogen verteilt wie gewünscht. Gerade im zuerst beflogenen Nordteil (Inhalt Lieferung 2) wurden teilweise die Punktdichten auf Grund von schwierigen Flugbedingungen nicht erreicht (siehe auch Verifikationsbericht zur Lieferung 2 und zugehörige Stellungnahme von ASTEC). Teilweise werden nur 3 oder sogar 2 Punkte in Gebieten erreicht, die als nicht kritisch zu bezeichnen sind z.B. aufgrund von Wasserstellen, Tallagen ohne Wald oder sehr steilen Gebirgshängen. Dies ist sicherlich nicht optimal jedoch nach den technischen Spezifikationen noch im Rahmen, wenn man dort vom Gesamtdurchschnitt ausgeht.

Es ist einzuräumen, dass bei der Planung KEINE Sicherheiten berücksichtigt worden sind und es während des Fluges auch zu Schwankungen kommen kann.

Beim Helikopterteil (TopEye) wurde eine mittlere Punktdichte (inkl. Überlappungen und Nachflüge von ca. 23 Punkten pro Quadratmeter erreicht). Doch leider ist auch hier die Punktverteilung nicht optimal. Es gibt einige Stellen wo durch den Einsatz des Riegl-Scanners nicht das Gelände abgebildet wurde, sondern „virtuelle Geisterpunktwolken“ erzeugt wurden. Diese Stellen wurden erst bei der definitiven Datenprozessierung bemerkt und sind oben abgebildet bzw. im zugehörigen CAD-File, A6_2012_KantonBern_LV95_LHN95_Datenluecken_500sqm.dgn' dokumentiert.

3.4 Geometriekontrolle

Neben den im Projektbericht ASTEC (Anhang A2) erwähnten Kontrollzonen (welche teilweise für die Georeferenzierung verwendet wurden) führte die Flotron AG eine unabhängige Kontrolle der Georeferenzierung durch. Hierzu wurden diverse Datensätze verwendet welche im Besitz der Flotron AG sind.

3.4.1 Höhenkontrolle mittels HFP und LFP Kanton Bern

Als unabhängige und vor allen Dingen flächenhafte Kontrolle wurden die verfügbaren Fixpunkte im Projektgebiet über den Fixpunkt-Datenservice (FPDS) von swisstopo verwendet. Alle verfügbaren Punkte wurden mittels einer Funktion in Terrasolid (Control Report) mit der automatisch klassierten Boden-Klasse verglichen. Die offensichtlich nicht in Boden enthaltenen Punkte (Kirchtürme, Fernziele, etc) wurden entfernt. Trotzdem bleibt eine grosse Unsicherheit was die Lage der Punkte anbelangt (zum Beispiel: LFP1 mit Steinkopf 10cm über Gelände, Nivellementspunkte an Hausfassaden etc.). Um eine flächenhafte Aussage zu ermöglichen wurden trotzdem möglichst viele Punkte in der Statistik belassen. Diese ist deshalb als eher pessimistisch anzusehen.

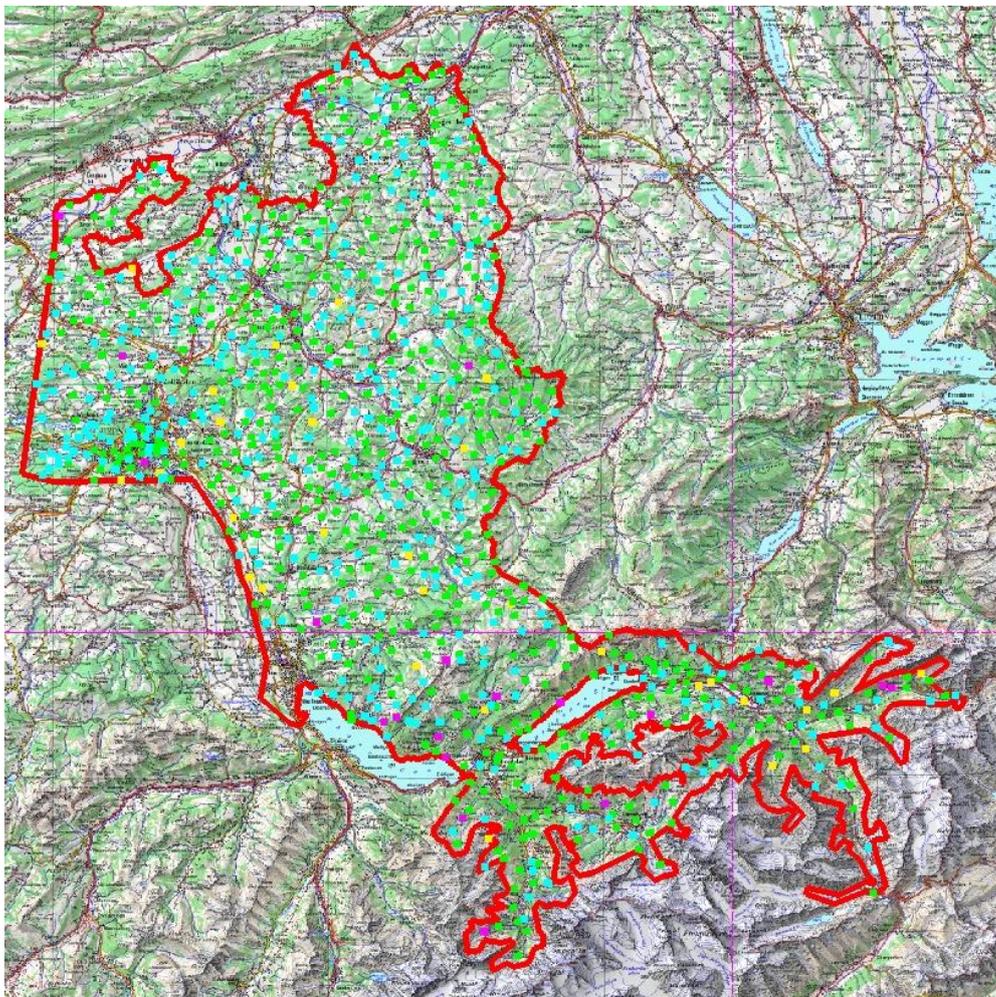


Abbildung 60: Verteilung mit Einfärbung nach Differenz zu klassiertem DTM: grün= $< 20\text{cm}$, cyan= $> -20\text{cm}$, gelb= zw. 25 und 50cm, Magenta= zw. -25 und -50cm (unklar ist teilweise die Identifikation der Punkte)

Trotz der teilweise ungewissen Identifikation der Punkte (die gelben Punkte sind grösstenteils Nivellementsfixpunkte mit ungenauer Lage und/oder i.d.R. ca. 30cm über Terrain, Magenta sind tlws Punkte in Schächten etc.) resultierte ein mittlerer (Höhen-)Fehler von 13cm (verwendet wurden total 903 Punkte) über das gesamte Projektgebiet. Systematische Fehler können somit weitgehend ausgeschlossen werden.

3.4.2 Vergleich mit Passpunkten aus diversen PNF-Projekten

Ein Vergleich mit von Flotron AG verwendeten Passpunkten für diverse Projekte der Periodischen Nachführung des Kantons Bern ergab ein ähnliches Bild. Es konnten keine systematischen Höhenfehler erkannt werden.

3.4.3 Lagekontrolle (visuell)

Die Lagekontrolle wurde stichprobenweise anhand vorhandener Daten der amtlichen Vermessungen (Ebene Bodenbedeckung) durchgeführt. Dabei wurden nur die Endprodukte DTM und DOM detaillierter untersucht. In problematischen Zonen wurde zudem die Punktwolke angeschaut.

Nachfolgend sind einige Beispielgebiete aufgeführt. Dargestellt sind die DOM als Slope-Shader (grün schattiert).



Abbildung 61: Lagekontrolle mit Daten amtliche Vermessung Region Meiringen



Abbildung 62: Lagekontrolle mit Daten amtliche Vermessung Region Bern



Abbildung 63: Lagekontrolle mit Daten amtliche Vermessung Region Thun/Gunten

Es ist allgemein bekannt, dass die Lagegenauigkeit bei der Erfassungsmethode Airborne Laserscanning grössere Probleme bereitet. Gleichzeitig ist diese schwieriger zu quantifizieren als die Höhengenaugigkeit. Systematische Fehler können auf Grund der nicht flächendeckenden Verfügbarkeit von Referenzdaten weitgehend (aber nicht gänzlich) ausgeschlossen werden.

3.5 Punktwolkenklassierung

Das Vorgehen ist im Projektbericht der ASTEC GmbH (Anhang A2) beschrieben. Die Qualitätssicherung der Flotron AG bestand in der detaillierten Anleitung der Anforderungen des Kunden. Stichprobenweise wurden Kontrollen durchgeführt und allfällige Ergänzungen von ASTEC am Datensatz angebracht. Die Ergebnisse entsprechen der Datenqualität der im Rahmen des Projektes LiDAR Berner Jura 2011 durchgeführten Klassifikation. Wesentliche Änderungen sind die „auf Stoss“ zurückgeschnittenen Fluglinien, welche eine „in Sich“ homogenere Punktqualität ermöglichen. Die vereinzelt sichtbaren Versätze zwischen den Fluglinien bewegen sich im Bereich der Ausschreibungsunterlagen (Höhendifferenz zwischen den Fluglinien < 15 cm) und sind als sehr gut zu betrachten. Einzelne Ausreisser sind auch hier auf Grund der Erfassungsmethoden nicht zu vermeiden.

3.6 Datenabgabe

Die Datenstruktur ist im Projektbericht der ASTEC GmbH (Anhang A2) beschrieben. Die Daten wurden bei Flotron AG formal geprüft und bei Vollständigkeit an die Verifikationsstelle geliefert.

3.7 Beurteilung Etappe 1 2012

- Die Befliegung wurde im Frühjahr / Sommer 2012 durchgeführt. Anpassung an der Flugplanung mussten wetter- und situationsbedingt vorgenommen werden.
- Probleme mit der Punktverteilung und teilweise der mangelnden Punktdichte wurden während der Prozessierung aufgedeckt und werden so gut wie möglich im Rahmen der 2. Etappe behoben.
- Die Datenqualität kann als durchwegs zufriedenstellend beurteilt werden. Abstriche sind bei der Punktverteilung und der (zu spät) entdeckten Datenlücken zu machen.
- Die Datenprozessierung verlief vor allem auf Grund der enormen Punktdichte im Berner Oberland harzig. Leider kam es zu wesentlichen Terminverzögerungen bei der Datenlieferung. Auch einzelne Nachflüge sind in Absprache mit dem Auftraggeber notwendig (Thuner Westamt, Region Konolfingen, Datenlücken im Berner Oberland).
- Die Transformation der Daten nach CH1903/LN02 ist abgeschlossen. Die Daten wurden am 13. März 2013 der Verifikationsstelle (AGI) abgegeben.
- Die Verifikation der Datenlieferung 5 steht noch aus.
- Die Lehren für die Flugplanung der 2. Etappe werden gezogen und die Flugplanung und die Parameter werden entsprechend angepasst.

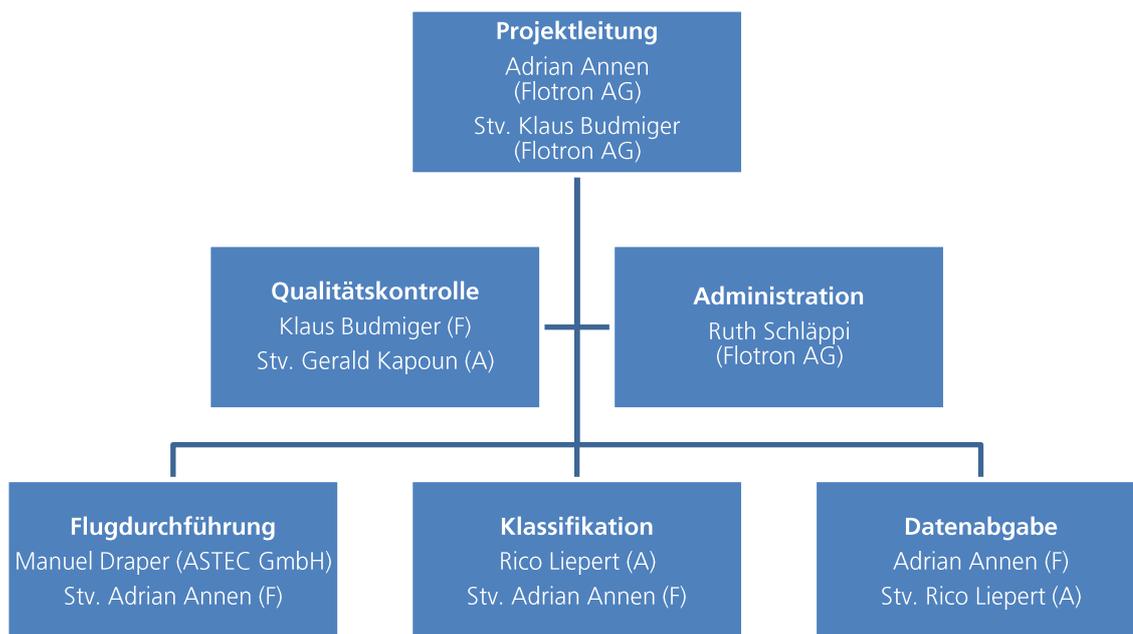
4 Etappe2 – westlicher Kantonsteil 2013/2014

4.1 Ausgangslage

Als Grundlage für die technische Ausführung des Projektes gelten die Offerte vom 8.8.2011 und die Ausschreibungsunterlagen (inkl. Pflichtenheft) vom 21.6.2011 (Version 1.0). Diese sind identisch mit den Vorgaben zu Etappe 1

4.1.1 Projektorganisation

Beteiligte Firmen / Projektorganigramm LiDAR BE 2012 2. Etappe:



Dieses Organigramm zeigt die für die Projektausführung verantwortlichen Personen. Für die Arbeitsausführung können diese Personen auf genügend Mitarbeiter der ASTEC GmbH (A) und der Flotron AG (F) zurückgreifen.

Funktion	Beschreibung
Projektleitung	<ul style="list-style-type: none"> - Hauptansprechpartner gegenüber dem Kunden - Terminkontrolle - Finanzkontrolle - Einsatzplanung Personal - Kommunikation intern - Redaktion des technischen Berichtes - Projektorganisation
Qualitätskontrolle	<ul style="list-style-type: none"> - Unabhängiges Überprüfen ob die internen Qualitätskontrollen festgelegt wurden, eingehalten und dokumentiert werden - Unabhängige Kontrolle der Termine und Finanzen

Flugdurchführung	<ul style="list-style-type: none">- Durchführung des Fluges- Berechnung der Punktwolke in LV95/LHN95- Kontrolle anhand von Passflächen
Klassifikation	<ul style="list-style-type: none">- Verarbeitung der Punktwolke zu DTM und DOM- Erstellung Endprodukte LV95/LHN95
Datenabgabe	<ul style="list-style-type: none">- Geometrische Kontrollen und überprüfen der Klassifikation (Endkontrolle, nach internen Richtlinien)- Transformation nach LV03/LN02- Lieferung der Daten an Auftraggeber

4.1.2 1Perimeter / Projektanforderungen (Zusammenfassung)

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

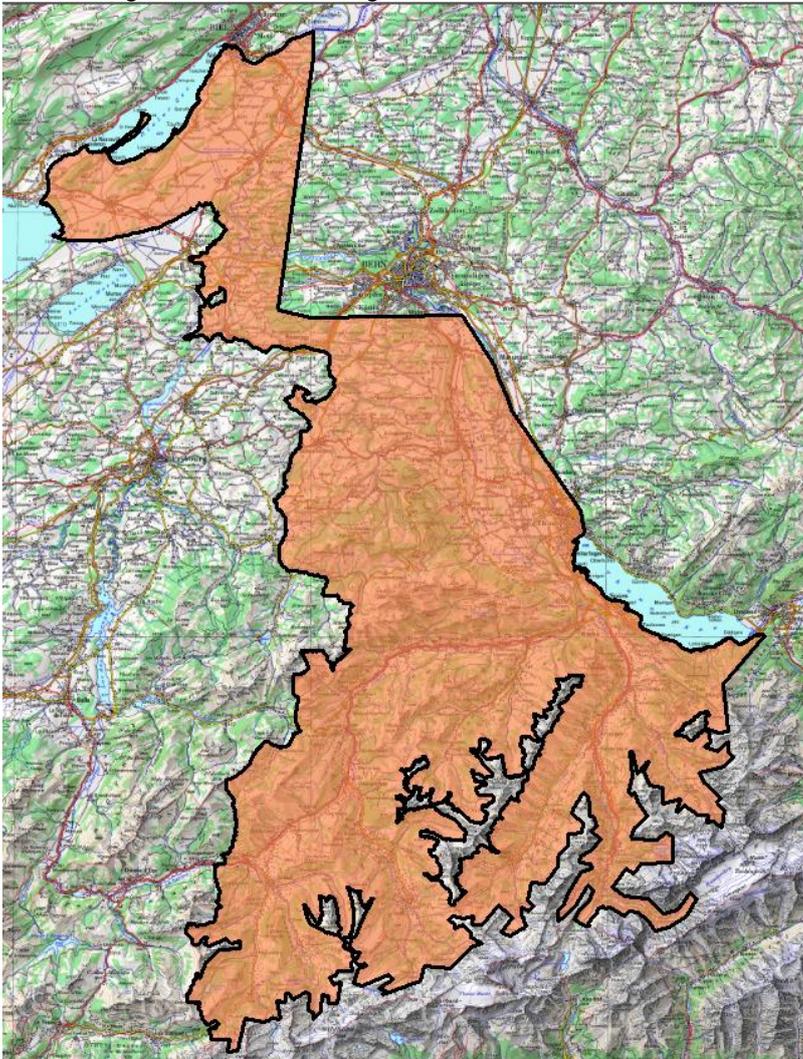


Abbildung 64: Perimeter Projektgebiet (Fläche ca. 1867 km²)

Punktdichte	mind. 4 Pt / m ²
Höhengenauigkeit ausserhalb Wald	< ±0.2 m
Höhengenauigkeit Baumkronen	< ±1.0 m
Lagegenauigkeit	< ±0.3 m
Höhendifferenz zwischen Linien	< ±0.15 m
Projektionssystem	CH03+ / LHN95
zusätzliches Projektionssystem	CH03 / LN02
7 Klassen im Endprodukt DOM	Boden, Vegetation tief, mittel und hoch, Gebäude, Brücken und weitere Kunstbauten

4.2 Flugplanung

Nachfolgend sind das zur Verfügung stehende Messsystem und die Flugplanung vorgestellt und die wichtigsten Überlegungen dokumentiert.

Auf Grund der schwierigen Topographie wird das Projektgebiet in zwei Perimeter unterteilt. Die flacheren (ALS70) Gebiete (Seeland, Gürbetal und Gantrischregion) werden mit einem Flächenfliegersystem befliegen. Das Gebiet im Berner Oberland sollte ursprünglich zudem in tiefe Lagen Sonnseite (unter 1400 m.ü.M.) und hohe Lagen und Schattseiten unterteilt werden. Diese Unterteilung sollte einen optimalen Befliegungszeitpunkt (ohne Laub) ermöglichen. Witterungsbedingte Anpassungen sind im Berner Oberland unumgänglich. Deshalb wird die Planung der Fluglinien der hohen Lagen nach Abschluss der Befliegung der tiefen Lagen fertiggestellt.

4.2.1 Systembeschreibung Leica ALS70

Im Befliegungszeitraum steht das folgende Equipment zur Verfügung (Eigentum und betrieben durch ASTEC GmbH):

Flugzeug	Partenavia (Hochdecker)
Laser Scanner	Leica ALS70
GPS	GPS/INS-unit von Leica
IMU	IPAS20 (CUS6 IMU / GPS/GLONASS)
GPS / INS processing	Leica IPAS TC-software
Software	TerraScan, TerraModeler, TerraMatch von TerraSolid FI

Systemparameter	
Reichweite des Lasers	bis 6000m
Empfohlene max. Flughöhe	bis 5000m über Grund
Laserpulsrate	22 – 200kHz
Scanfrequenz	0 – 100Hz
Öffnungswinkel (FOV)	11-75°
Divergenz	0,22mrad @ 1/e ²
Multiple Impuls	ja (bis zu 2)
Multiple Echos pro Impuls	1-4
Intensitätsaufzeichnung	ja
Rollwinkelkompensierung	ja
Bildaufzeichnung	ja

Abbildung 65: ALS 70 System-Spezifikationen (Auswahl)

Für weitergehende Informationen zum ALS 70 verweisen wir auf die Prospekte der Firma Leica-Geosystems.

4.2.2 Flugplanung Flächenflieger Teil Mittelland

Bei der Durchführung der Befliegung werden im Mittelland folgende Einstellungen des Laserscanners verwendet:

Parameter	Einstellung
Öffnungswinkel (FOV)	20.0°
Scanmuster	Triangle Scan
Flughöhe über Grund	Max: 1700m
Fluggeschwindigkeit (geplant / kn über Grund)	125 kn
Laser Pulse Rate	Ca. 168.5 kHz
Scan Frequenz	Ca. 66 Hz
Nadir Point Density	Min. 4.0 pt/m ²
Multiple Puls in Air	ON (ein)

Abbildung 66: ALS70 Scanner Setup LiDAR BE 2013 Flächenflieger

Die Einstellungen des Laserscanners resultieren für die Laserscanstreifen in folgenden Eigenschaften:

<i>Kenndaten Gebiet „Flächenflieger“</i>	
Anzahl der Flugstreifen	212 (inkl. Querstreifen)
Totale Länge der Flugstreifen	2895 km
Distanz zwischen den Flugachsen	Siehe Flachland_Streifen_LV95.shp
Querüberdeckung	Ca. 27%
Breite eines Scanstreifens	Max. 600 m
Spotdurchmesser am Boden	Max. 40cm

Abbildung 67: Flugstreifeneigenschaften Gebiet „Flächenflieger Mittelland“

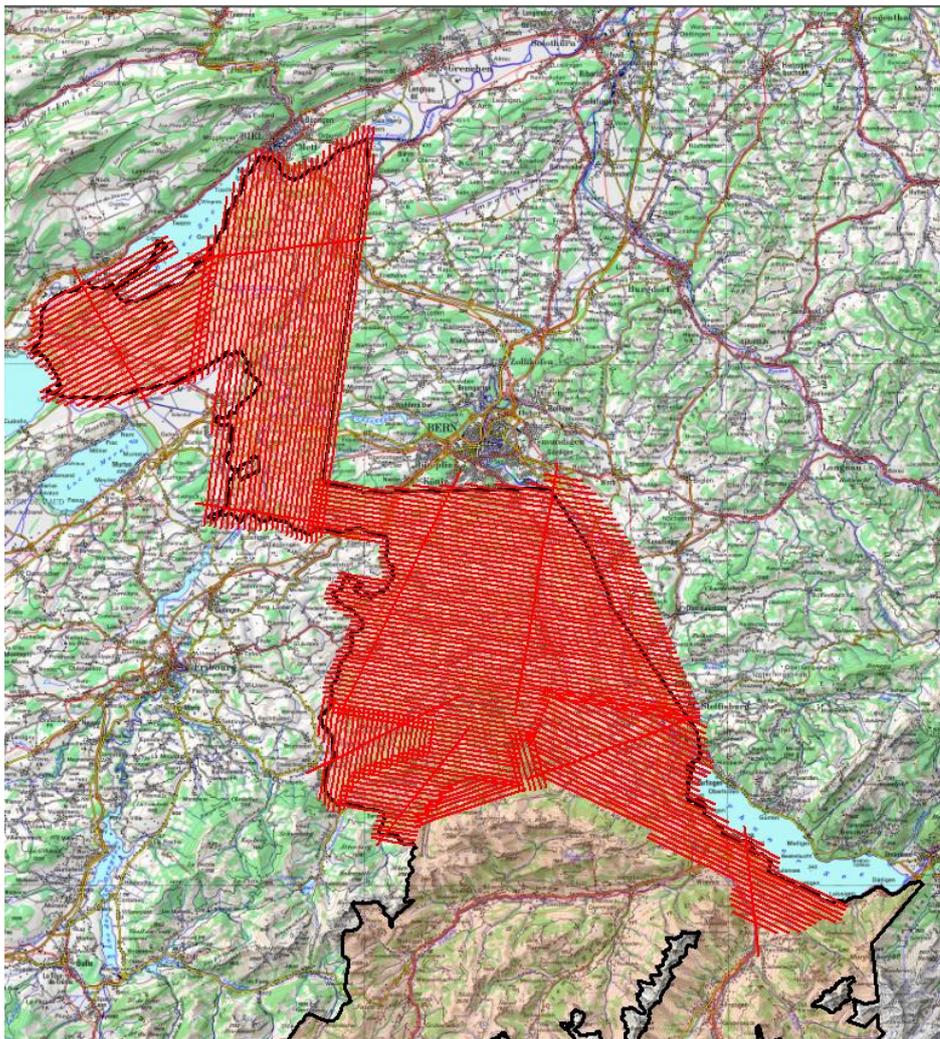


Abbildung 68: ursprünglich vorgesehene Flugplanung Flächenflieger

Die Teilblöcke wurden so angeordnet um eine Befliegung nach Vegetationsstand gestaffelt zu ermöglichen.

4.2.3 Flugplanung Alpin (Berner Oberland)

Auf Grund der Ausgangslage, dass die Punktwolke möglichst laub- und schneefrei erfasst werden soll, wurde vom Unternehmer ursprünglich eine Befliegung der Tallagen im Berner Oberland mit demselben System und mit Flächenflieger vorgeschlagen. Auf Grund der speziellen Wettersituation im Frühjahr 2013 konnte diese Befliegung nicht durchgeführt werden. Stattdessen wurde im Juni 2013 ein Änderung des Konzeptes durchgeführt und das gesamte Oberland wurde mit Hubschrauber geflogen. Zum Einsatz kam ein System Riegl LMS Q780 von der Firma Flycom. Dieses war kurzfristig verfügbar und wurde für den Einsatz im Berner Oberland als tauglich empfunden.

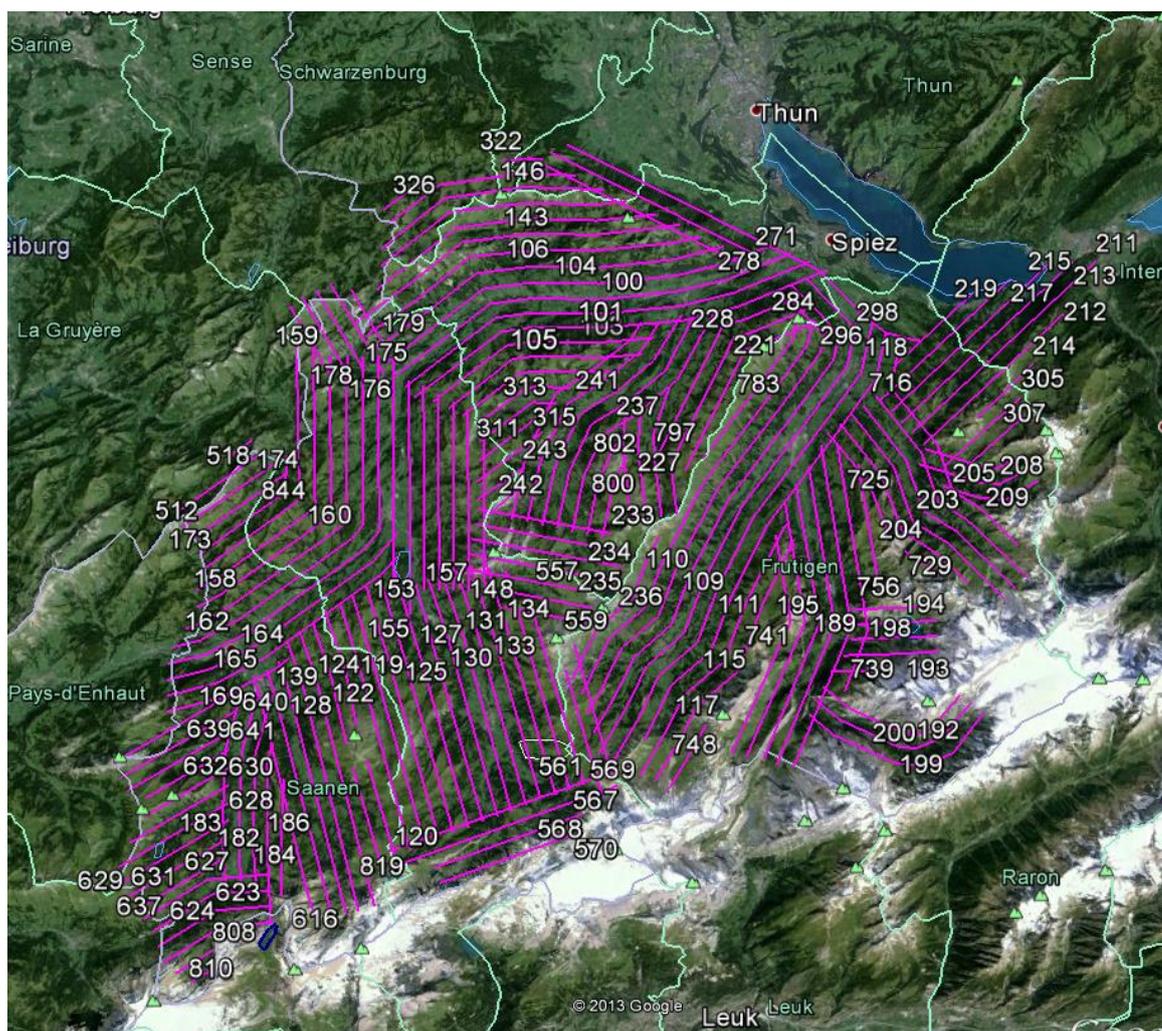


Abbildung 69: Flugplanung Hubschrauber Alpin (Flycom)

Folgende Parameter wurden geplant:

Parameter	Einstellung
Öffnungswinkel (FOV)	Max. 60 deg
Flughöhe über Grund	Max: 1400m
Fluggeschwindigkeit (geplant / kn über Grund)	60 kn
Laser Pulse Rate	Ca. 266.6 kHz
Scan Frequenz	Ca. 78 Hz
Nadir Point Density	Min. 4.5 pt/m ²
Multiple-Time-Around (MTA)	ON

Abbildung 70: Riegl Q780i Scanner Setup LiDAR BE 2013 Hubschrauber

Daraus resultieren folgende Kenndaten:

Kenndaten Gebiet „Hubschrauber“	
Anzahl der Flugstreifen	171 (inkl. Querstreifen)
Totale Länge der Flugstreifen	1750 km
Distanz zwischen den Flugachsen	Mittel ca. 800m.
Querüberdeckung	Min. 25%
Breite eines Scanstreifens	Max. 1380 m
Spotdurchmesser am Boden	Max. 30cm

Abbildung 71: Flugstreifeneigenschaften Gebiet „Hubschrauber Alpin“

Die Flugplanung wurde im Juni 2013 von Flycom durchgeführt und von ASTEC GmbH validiert. Auf Grund der kurzfristigen Entscheidung die Firma Flycom einzusetzen, wurde diese Flugplanung nicht verifiziert.

4.3 Durchführung der Befliegung 2013

Das Frühjahr 2013 war aussergewöhnlich feucht und mit vielen Schlechtwetterperioden ausgestattet. Nachfolgend ist kurz dokumentiert, warum der Flächenflieger-Teil im Jahr 2013 NICHT durchgeführt werden konnte.

4.3.1 Flächenflieger Mittelland

Die Wetterlage im Frühjahr 2013 gestaltete sich sehr schwierig. Die Firma ASTEC war Anfang Mai 2013 mit dem System ALS70 flugbereit auf dem Flughafen Bern-Belp stationiert. Für die Durchführung der Flüge hätten wir ca. 5 optimale Flugtage am Stück benötigt. Einzelne Tage waren „fliegar“, allerdings nie länger als 3 Tage am Stück. In Absprache mit dem Amt für Wald musste schlussendlich die Befliegung auf Grund der bereits weit fortgeschrittenen Belaubung auf die nächste laubfreie Periode verschoben werden.



Abbildung 72: Beispiel Wetterlage aus Frühjahr 2013

Oben stehendes Beispiel soll zeigen, dass die Wetterkapriolen wirklich aussergewöhnlich waren. Zudem lag im obersten Teil des Projektteils „Flächenflieger Mittelland“ (ca. 1600 m.ü.M.) aussergewöhnlich viel Altschnee. Dieser schmolz dieses Jahr nur sehr langsam. In Kombination mit dem in tiefen Lagen bereits weit fortgeschrittenen Laubaustrieb war leider eine Befliegung zu den vorgegebenen Bedingungen NICHT möglich.

4.3.2 Hubschrauber Alpin

Anfang Juni 2013 entwickelte sich ein kurzfristiges, stabiles Hoch. In Absprache mit dem Amt für Wald wurde entschieden das ursprüngliche Konzept der Zweiteilung des Berner Oberlandes abzuändern und das gesamte Berner Oberland mit Hubschrauber so schnell wie möglich zu fliegen. Dies wurde mit der Firma Flycom und dem System Riegl LMS Q780 (siehe oben) innerhalb von zwei Wochen umgesetzt.

Die Befliegung fand zwischen 15. Juni 2013 und 19. Juni 2013 statt. Leider waren die Bedingungen einigermassen turbulent, so dass die Scanlinien teilweise recht schwanken.

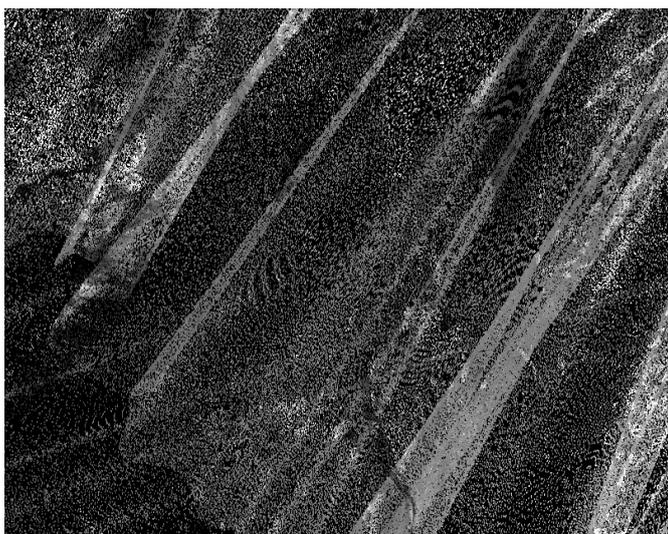


Abbildung 73: Punktdistribution auf Grund Turbulenzen (Beispiel vom Projektrand)

Insgesamt wurde die geforderte Punktdichte deutlich übertroffen. Die Punktverteilung ist auf Grund der Plattform (Hubschrauber) und der turbulenten Flugbedingungen nicht optimal. Dies ist teilweise auf die fehlenden Erfahrungen mit dem neuen Scanner zurückzuführen. Insgesamt ist aber die Punktwolke nach unserer Einschätzung von genügender Qualität.

Bei der Datenprozessierung bei der Firma Flycom wurde leider ein Problem mit der GNSS-Lösung entdeckt. Dieses Problem wurde der Projektleitung (Flotron AG) zum Zeitpunkt des Entdeckens NICHT kommuniziert. Stattdessen wurde selbständig entschieden eine Nachbefliegung zu organisieren. Diese fand zwischen 11.8.2013 und 12.8.2013 statt. Dabei wurden vor allem Linien in Tallagen nachgeflogen. Gemäss nachträglicher mündlicher Kommunikation lag das Problem bei einer fehlerhaften GNSS-Antenne auf dem System. Die genauen Ursachen sind bei ASTEC und Flycom auf Nachfrage abzuklären. Leider wurden KEINE Flugrapporte geführt. Ein Nachvollziehen der Probleme gestaltet sich als schwierig.

4.3.3 Datenprozessierung 2013

Die Daten wurden von der Firma Flycom georeferenziert und streifenangepasst. Anschliessend erfolgte die Klassierung bei der Firma ASTEC GmbH. Im Anhang A3 sind das Vorgehen und die Resultate pragmatisch dokumentiert.

Die Firma Flotron AG hat die Georeferenzierung überprüft. Dabei wurden die eingemessenen Kontrollflächen der ASTEC GmbH zur Verfügung gestellt. An diesen Kontrollflächen konnten keine Unstimmigkeiten festgestellt.

4.3.3.1 Höhenkontrolle mittels HFP und LFP Kanton Bern

Als unabhängige und vor allen Dingen flächenhafte Kontrolle wurden die verfügbaren Fixpunkte im Projektgebiet über den Fixpunkt-Datenservice (FPDS) von swisstopo verwendet. Alle verfügbaren Punkte wurden mittels einer Funktion in Terrasolid (Control Report) mit der automatisch klassierten Boden-Klasse verglichen. Die offensichtlich nicht in Boden enthaltenen Punkte (Kirchtürme, Fernziele, etc) wurden entfernt. Trotzdem bleibt eine grosse Unsicherheit was die Identifikation der Punkte anbelangt (zum Beispiel: LFP1 mit Steinkopf 10cm über Gelände, Nivellementspunkte an Hausfassaden etc.). Um eine flächenhafte Aussage zu ermöglichen wurden trotzdem möglichst viele Punkte in der Statistik belassen. Diese ist deshalb als eher pessimistisch anzusehen.

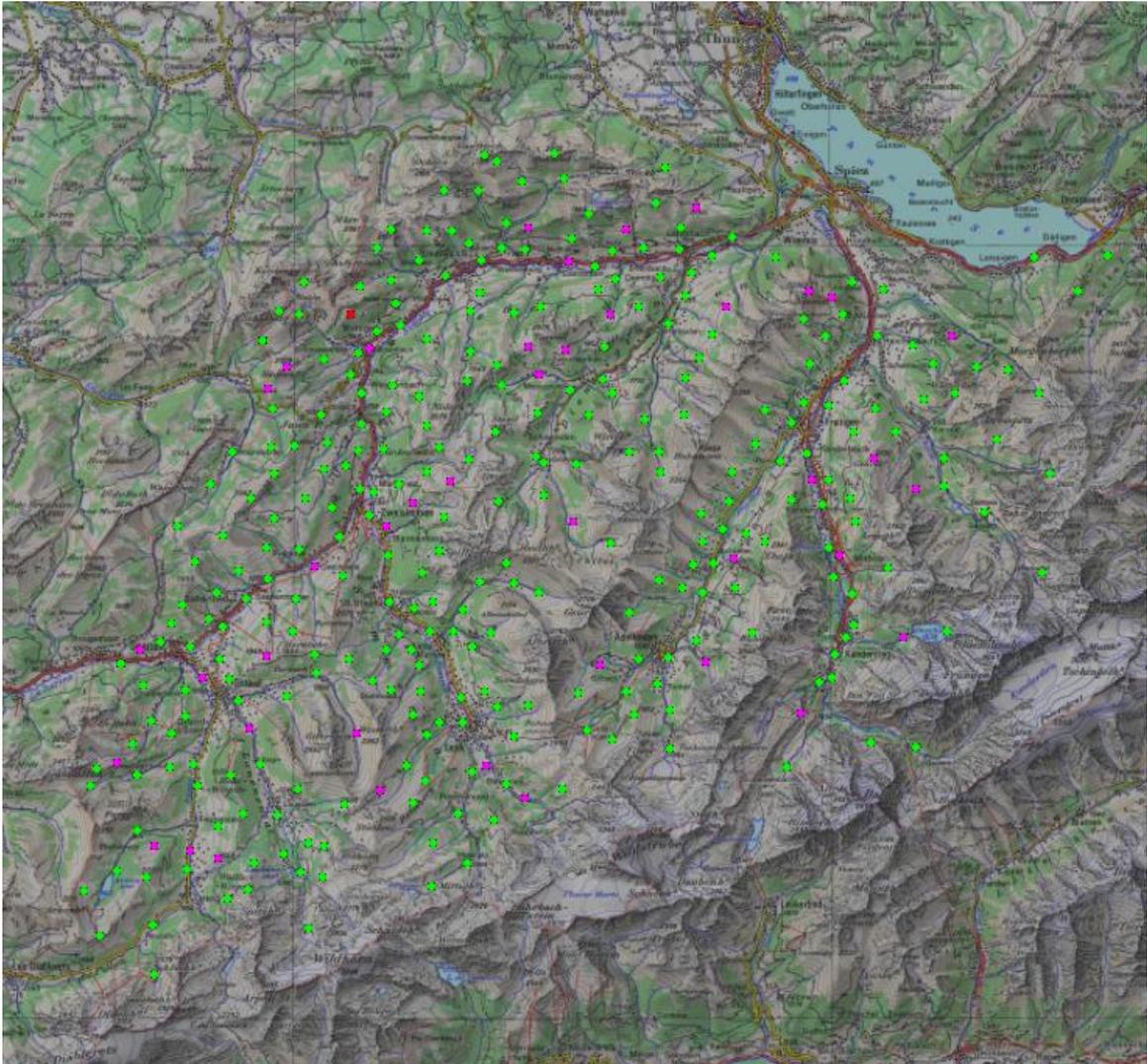


Abbildung 74: Verteilung mit Einfärbung nach Differenz zu klassiertem DTM: grün= <20cm, Magenta= zw. 20 und 50cm, Rot= zw. 50 und 100cm (unklar ist teilweise die Identifikation der Punkte)

Trotz der teilweise ungewissen Identifikation der Punkte (einige Punkte sind grösstenteils Nivellementsfixpunkte mit ungenauer Lage und/oder i.d.R. ca. 30cm über Terrain, Magenta sind tlws Punkte in Schächten etc.) resultierte ein mittlerer (Höhen-)Fehler von 10cm (verwendet wurden total 335 Punkte) über das gesamte Projektteilgebiet. Systematische Fehler können somit weitgehend ausgeschlossen werden

4.3.3.2 Lagekontrolle (visuell)

Die Lagekontrolle wurde stichprobenweise anhand vorhandener Daten der amtlichen Vermessungen (Ebene Bodenbedeckung) durchgeführt. Dabei wurden nur die Endprodukte DTM und DOM detaillierter untersucht. In problematischen Zonen wurde zudem die Punktwolke angeschaut.

Nachfolgend sind einige Beispielgebiete aufgeführt. Dargestellt sind die DOM als Slope-Shader (grau schattiert).

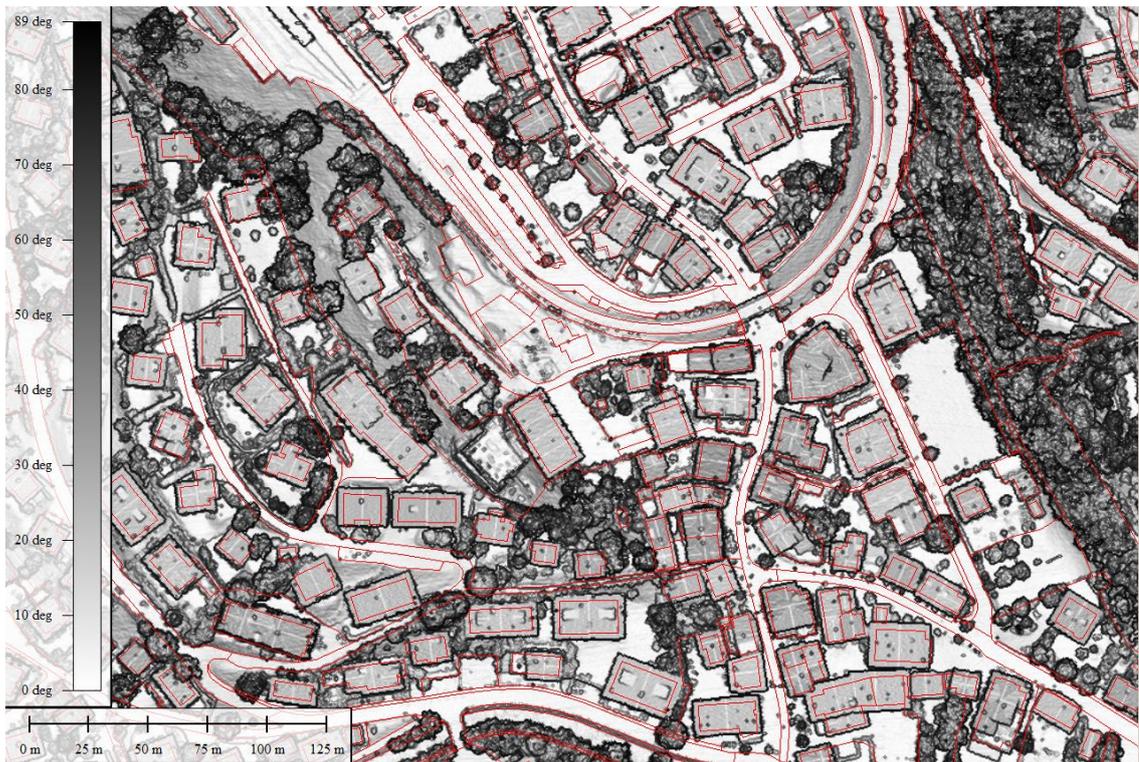


Abbildung 75: Lagekontrolle mit Daten amtliche Vermessung Region Gstaad

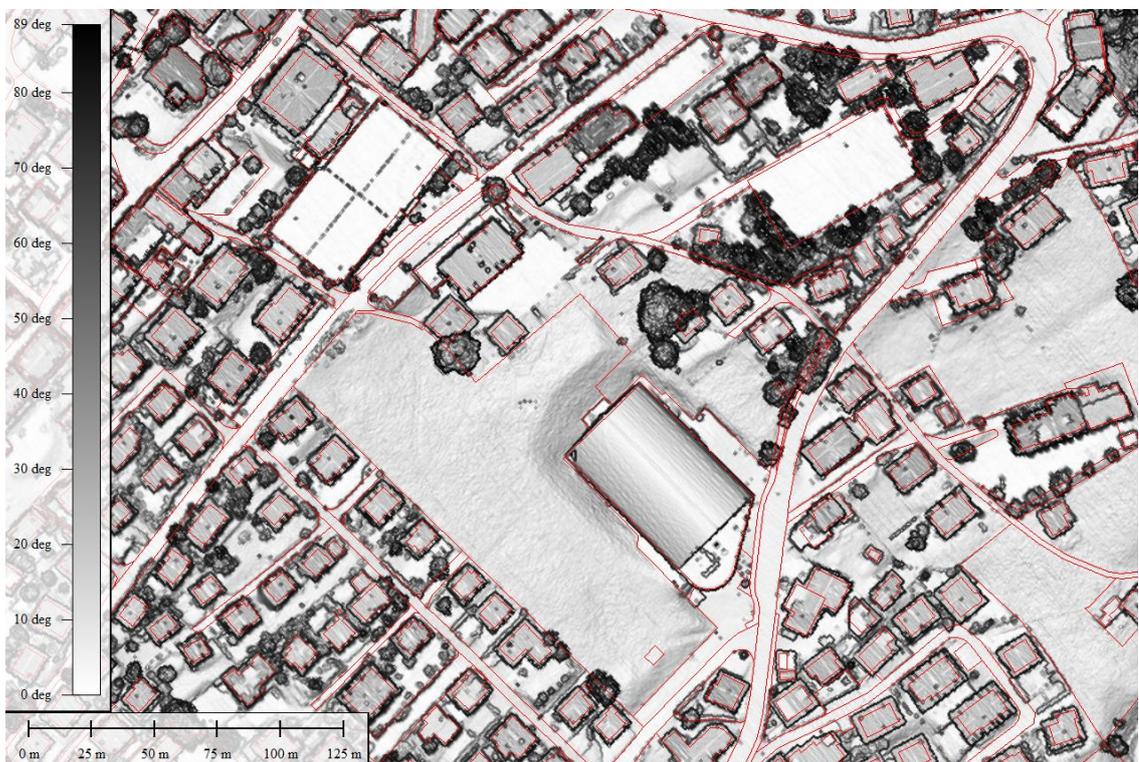


Abbildung 76: Lagekontrolle mit Daten amtliche Vermessung Region Adelboden

Es ist allgemein bekannt, dass die Lagegenauigkeit bei der Erfassungsmethode Airborne Laserscanning grössere Probleme bereitet. Gleichzeitig ist diese schwieriger zu quantifizieren als

die Höhengenaugigkeit. Systematische Fehler können auf Grund der nicht flächendeckenden Verfügbarkeit von Referenzdaten weitgehend (aber nicht gänzlich) ausgeschlossen werden.

4.3.3.3 Festgestellte Probleme Georeferenzierung 2013

Auf Grund von Problemen bei der Installation des Systemes auf dem Hubschrauber, konnten nicht alle hochfrequenten Vibrationen sauber gedämpft werden. Dies wirkt sich in der Punktwolke auf den Abstand zwischen den einzelnen Scanlinien aus. Trotz enormer Anstrengungen bei der Streifenanpassung sind diese Differenzen zum Teil im Endprodukt sichtbar.

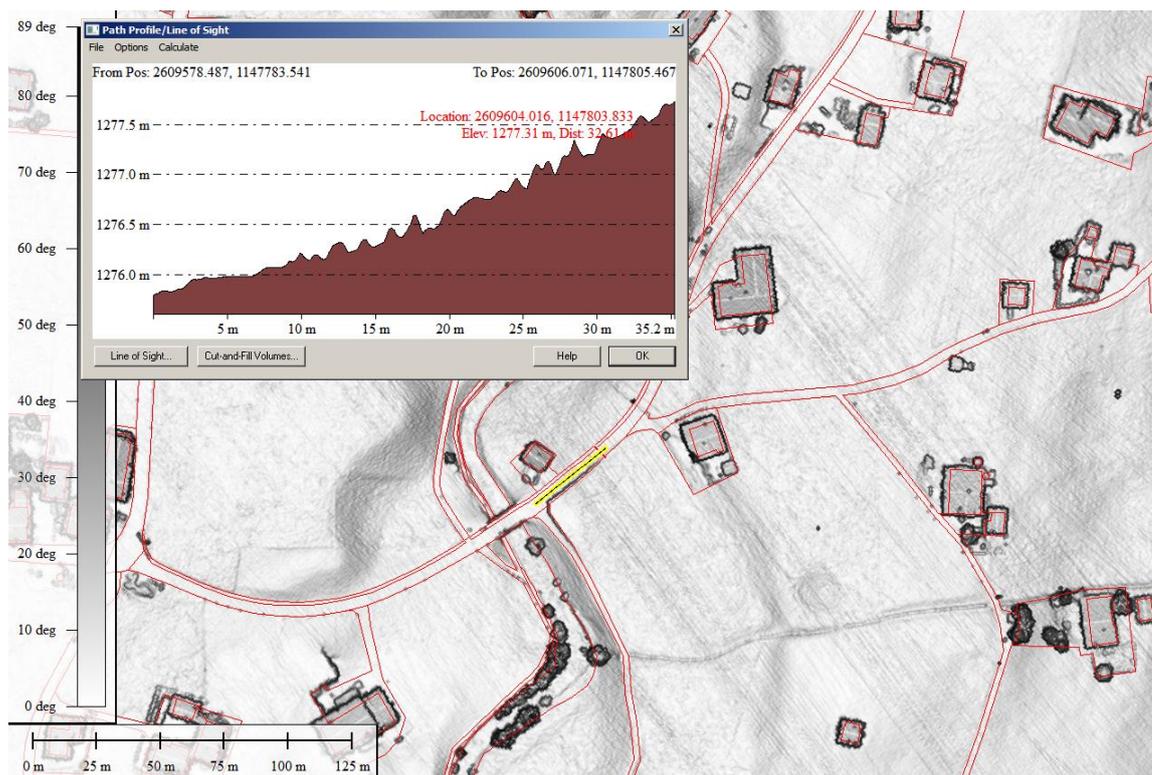


Abbildung 77: sichtbare Differenzen zwischen Scanstreifen mit Profilsicht auf Strasse

Die Vorgabe gemäss Pflichtenheft lassen zwischen den Scanlinien Höhenversätze bis maximal 15cm zu. Die Quantifizierung der oben erwähnten Versätze bewegt sich über das gesamte Gebiet in diesem Bereich. Das Resultat ist unschön, aber erfüllt haarscharf die Anforderungen des Pflichtenheftes.

4.3.3.4 Klassifikationsgenauigkeit 2013

Die Genauigkeit der Klassierung wurde von ASTEC mit Kontrollplots ausgewiesen. Eine Quantifizierung ob die Vorgaben des Pflichtenheftes erfüllt wurden, ist nur schwer rechnerisch nachzuweisen.

Bei der Verifikation der Klassierung wurde teilweise die ungenügende Genauigkeit bei temporären Objekten (Hochspannungsleitungen, Autos, etc.) bemängelt. Hier wurde durch die ASTEC GmbH nachbearbeitet und der korrigierte Datensatz wurde am 2.5.2014 erneut geliefert. Die teilweise groben Fehler wurden korrigiert. Das Gesamtergebnis entspricht nun dem geforderten Standard.

4.4 Durchführung der Befliegung Frühjahr 2014

Die Firma ASTEC Geodata GmbH hat im Frühjahr 2014 einen Teil des geplanten Gebietes mit ALS70 befliegen. Die Daten wurden anschliessend im Sommer 2014 durch ASTEC bearbeitet und am 26.7.2014 an das Amt für Geoinformation Kanton Bern geliefert. Leider konnte auf Grund der Schneesituation im Gebiet Gantrisch im Frühjahr 2014 nicht der gesamte Perimeter fertiggestellt werden.

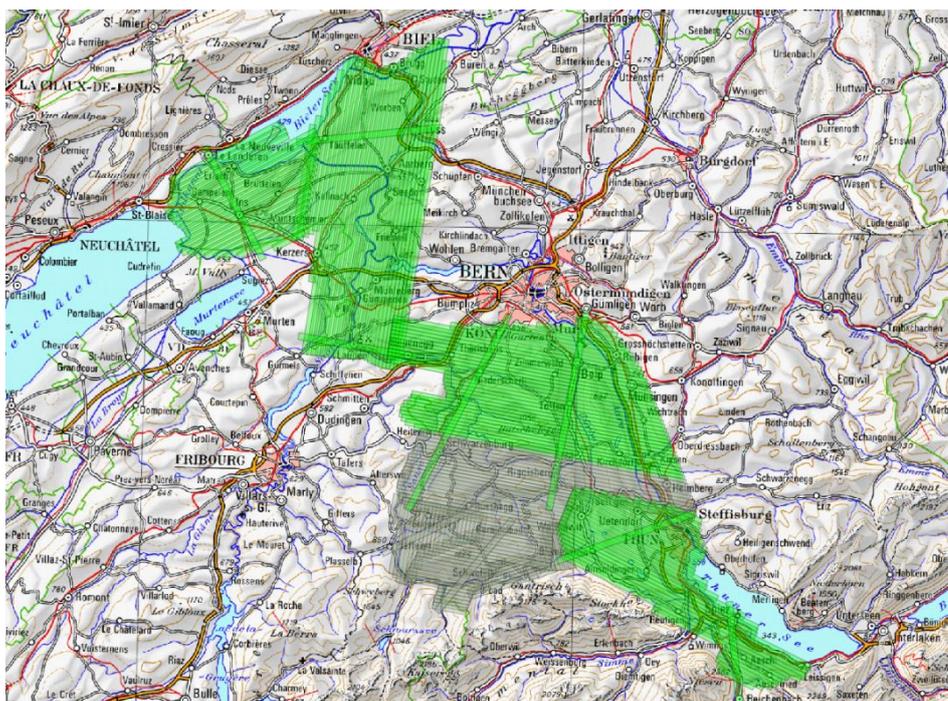


Abbildung 78: Stand Befliegung am 20.3.2014 (grün=beflogen durch ASTEC, grau: tlws befliegen aber mit Schnee -> diese Linien wurden schlussendlich NICHT verwendet).

Die Daten wurden im Sommer 2014 durch ASTEC klassiert und geliefert. Die Höhen- und Lagekontrolle wird im Kapitel 4.5 dokumentiert. Die Klassierung wurde gemäss den bisherigen Projektteilen von ASTEC durchgeführt.

4.5 Durchführung der Befliegung Herbst 2014

Im Sommer 2014 wurden mehrere Schönwetterphasen von ASTEC NICHT genutzt. Zum Teil mit fadenscheinigen Ausreden gegenüber dem Projektpartner Flotron AG. Durch die Nichterfüllung des Auftrages war das gesamte Projekt kurzfristig gefährdet. Schlussendlich wurde Ende Oktober die Zusammenarbeit von Flotron AG mit ASTEC gekündigt und Anfangs November die Befliegung der Region Gantrisch mit einem eingemieteten System Riegl Q780 (baugleiches System zur Sommerbefliegung 2013) durch die Flotron AG in Zusammenarbeit mit Swiss Flight Services (SFS) geflogen.

4.5.1 Anpassung Flugplanung / Durchführung Befliegung

Innerhalb von einer knappen Arbeitswoche wurde anschliessend ein System organisiert, die Flugplanung angepasst und die Befliegung durchgeführt. Hierzu wurde in Absprache mit dem Amt für Wald, Herr Michael Sautter das Konzept mit einfachen Fluglinien und Querüberlappung 50% gewählt. Dies um das Risiko von grossen Datenlücken zu minimieren.

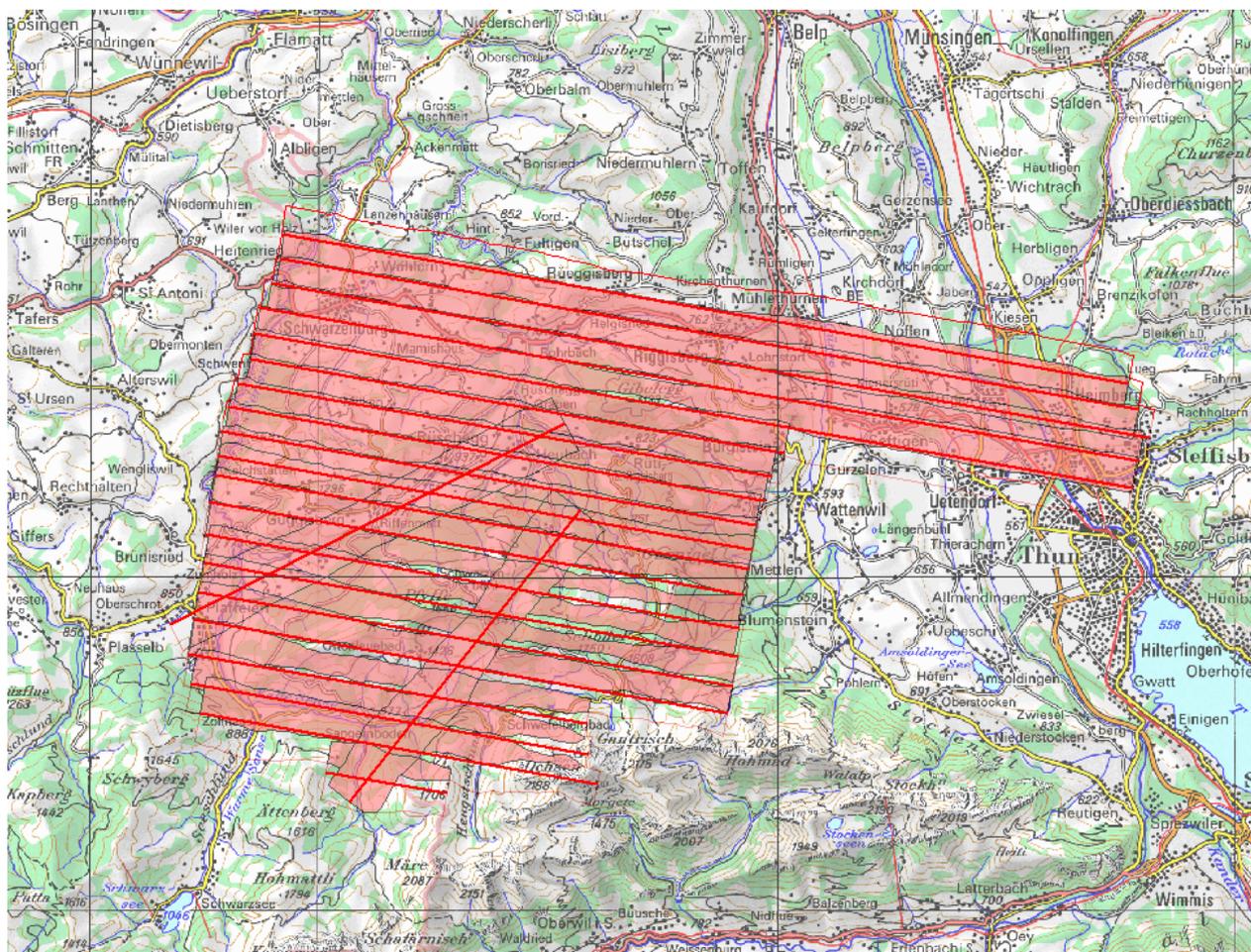


Abbildung 79: auf Riegl Q780 angepasste Flugplanung für Restgebiet „Gantrisch“

Folgende Parameter wurden für die Planung verwendet:

Parameter	Einstellung
Öffnungswinkel (FOV)	Max. 60 deg
Flughöhe über Grund	Max: 1900m AGL
Fluggeschwindigkeit (geplant / kn über Grund)	110 kn
Laser Pulse Rate	Ca. 266.6 kHz
Scan Frequenz	Ca. 40 Hz (angepasst an Fluggeschwindigkeit)
Nadir Point Density	2 pt/m ² @1900m AGL 4 pt/m ² @1000m AGL
Multiple-Time-Around (MTA)	ON

Abbildung 80: Riegl Q780i Scanner Setup LiDAR BE 2014 Flächenflieger Gantrisch

Daraus resultieren folgende Kenndaten:

Kenndaten Gebiet „Hubschrauber“	
Anzahl der Flugstreifen	22 (inkl. Querstreifen)
Totale Länge der Flugstreifen	350 km
Distanz zwischen den Flugachsen	Mittel ca. 700m.
Querüberdeckung	>50%
Breite eines Scanstreifens	Max. 1700 m @ 1900m AGL
Spotdurchmesser am Boden	Max. 48cm @ 1900 AGL

Abbildung 81: Flugstreifeneigenschaften Gebiet LiDAR BE 2014 Flächenflieger Gantrisch

Es wurde mit einer maximalen Flughöhe über Grund von 1900m und einem FOV 60deg gerechnet. Damit resultieren an der tiefsten Stelle des Streifens ca. 2pt/m² im Streifen. Durch die hohe Querüberlappung (grösstenteils >50%) resultiert am Schluss eine Punktdichte > 4pt/m² an jeder Stelle des Projektes.

4.5.1.1 Erreichte Punktdichte

Die erreichte Rohpunktdichte über das Gebiet Herbst 2014 ergibt gute Resultate.

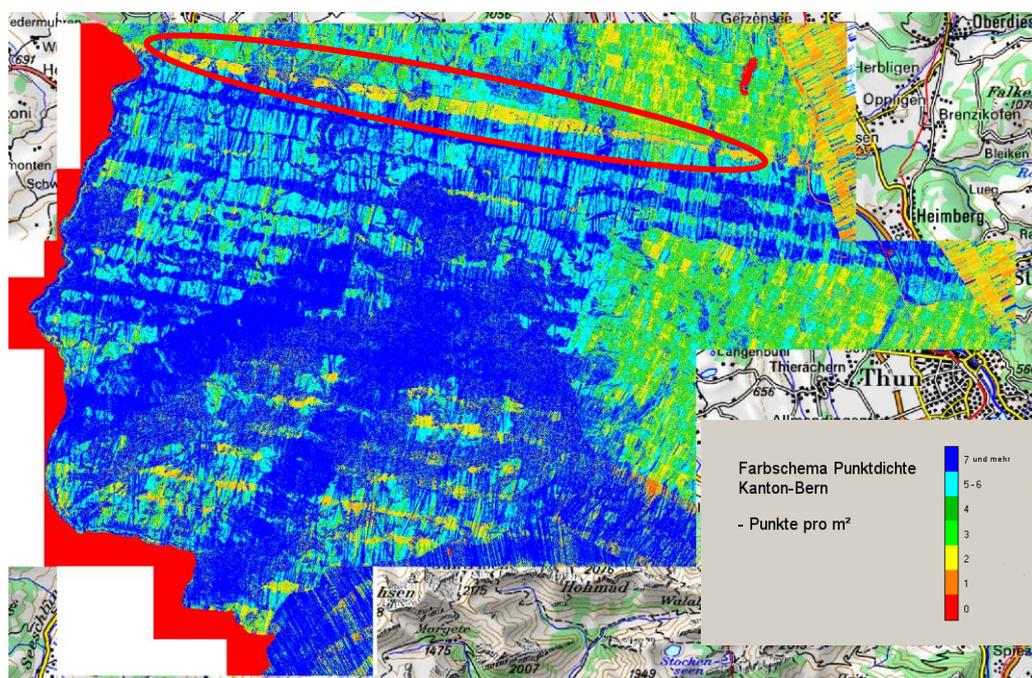


Abbildung 82: erreichte Punktdichte Restgebiet „Gantrisch“

Im Vergleich zur Befliegung ASTEC wurden wesentlich höhere Punktdichten erzielt (grösstenteils 7pt/m² und mehr).

Leider wurde im nördlichen Anschluss an das ASTEC-Gebiet (rot umrandet) ein Planungsfehler gemacht und dort ist ein Streifen vorhanden, welcher „nur“ ca. 2-3 pt/m² beinhaltet (in Abbildung 82 rot markiert). Dieser ist durch die unklare Situation um ASTEC entstanden.

In höheren Lagen sind vereinzelte Stellen mit knapp ungenügender Punktdichte vorhanden, welche aber die Qualität des Produktes nur unwesentlich schmälern.

4.5.1.2 Trajektorienberechnung und Streifenanpassung Gebiet Gantrisch

Die Trajektorienberechnung wurde von Flotron AG mit Novatel Inertial Explorer durchgeführt und die Streifenanpassung mit der Software RiProcess (bzw. RiWorld) von Riegl durchgeführt. Auf Grund des hohen Zeitdruckes der Fertigstellung des Projektes wurde hier bei vorliegen einer genügenden Lösung diese nicht verbessert. Stattdessen wurde die Klassierung der Punktwolke so rasch wie möglich durchgeführt.

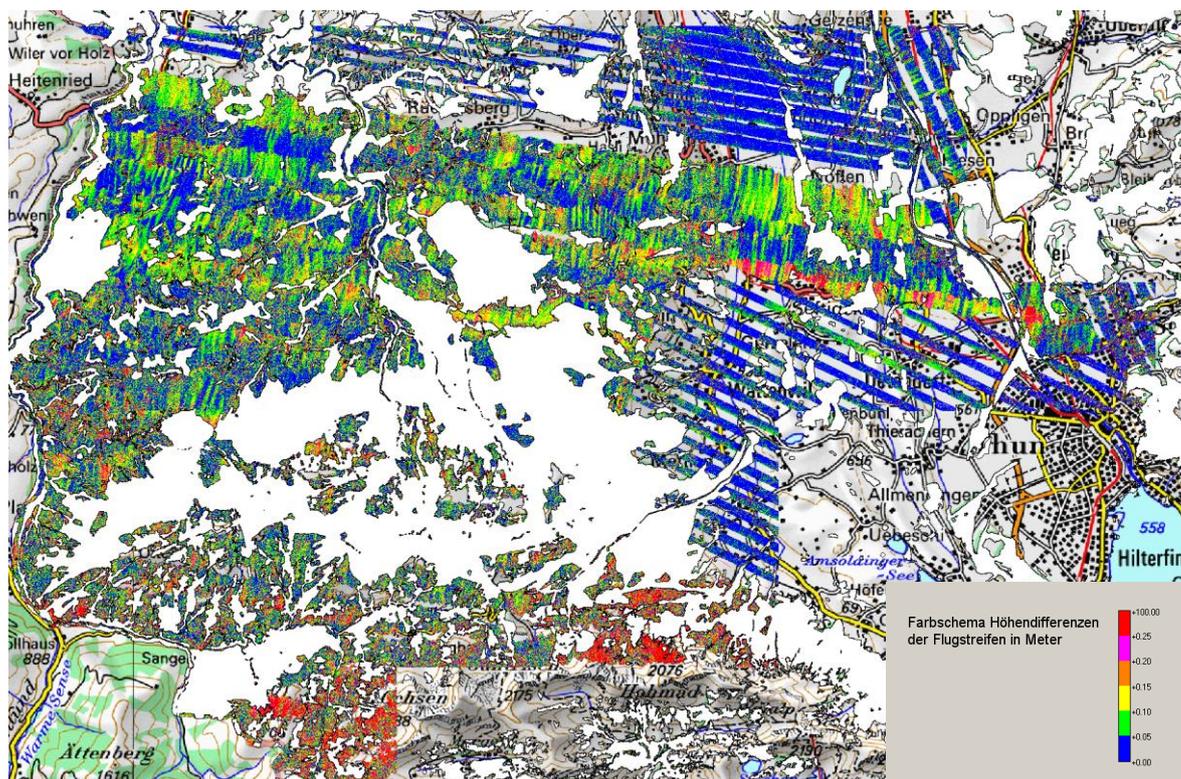


Abbildung 83: Streifendifferenzen Restgebiet „Gantrisch“ (Hinweis: Waldgebiete wurden mit weisser Fläche „überblendet“)

Problematisch war die Prozessierung in höheren Lagen. Hier ist der Anschluss an das Gebiet „Frühjahr 2013“ und „Frühjahr 2014“ nicht sehr gut. Die Anforderungen an die Höhengenaugigkeit des Endproduktes sind aber erfüllt (siehe weiter unten).

4.5.2 Georeferenzierung Herbst 2014 und Frühjahr 2014

Von ASTEC waren keine Informationen mehr erhältlich über die Georeferenzierung des Frühjahrsfluges 2014. Die berechneten Streifendifferenzbilder waren die einzigen Informationen.

Für die Überprüfung der Höhengenaugigkeit wurden total 10 Kontrollzonen à je 3 doppelt bestimmte Bodenpunkte verwendet. Die resultierende Standardabweichung beträgt hier 5.3 cm. Somit kann von einer guten Höhengenaugigkeit ausgegangen werden. Allerdings wurden diese Punkte gleichzeitig als Kalibrierpunkte verwendet. Daher ist diese Genauigkeit nicht unabhängig bestimmt.

Für die Lagegenauigkeit wurden visuelle Tests anhand der in denselben Kontrollzonen vermessenen Hausdächer durchgeführt. Diese wurden für in Ordnung befunden. Die Lagegenauigkeit (gefordert war 30cm einfache Standardabweichung) sollte eingehalten werden.

4.5.2.1 Höhenkontrolle mittels HFP und LFP Kanton Bern

Als unabhängige und vor allen Dingen flächenhafte Kontrolle wurden die verfügbaren Fixpunkte im Projektgebiet über den Fixpunkt-Datenservice (FPDS) von swisstopo verwendet. Alle verfügbaren Punkte wurden mittels einer Funktion in Terrasolid (Control Report) mit der automatisch klassierten Boden-Klasse verglichen. Die offensichtlich nicht in Boden enthaltenen Punkte

(Kirchtürme, Fernziele, etc) wurden entfernt. Trotzdem bleibt eine grosse Unsicherheit was die Identifikation der Punkte anbelangt (zum Beispiel: LFP1 mit Steinkopf 10cm über Gelände, Nivellementsunkte an Hausfassaden etc.). Um eine flächenhafte Aussage zu ermöglichen wurden trotzdem möglichst viele Punkte in der Statistik belassen. Diese ist deshalb als eher pessimistisch anzusehen.

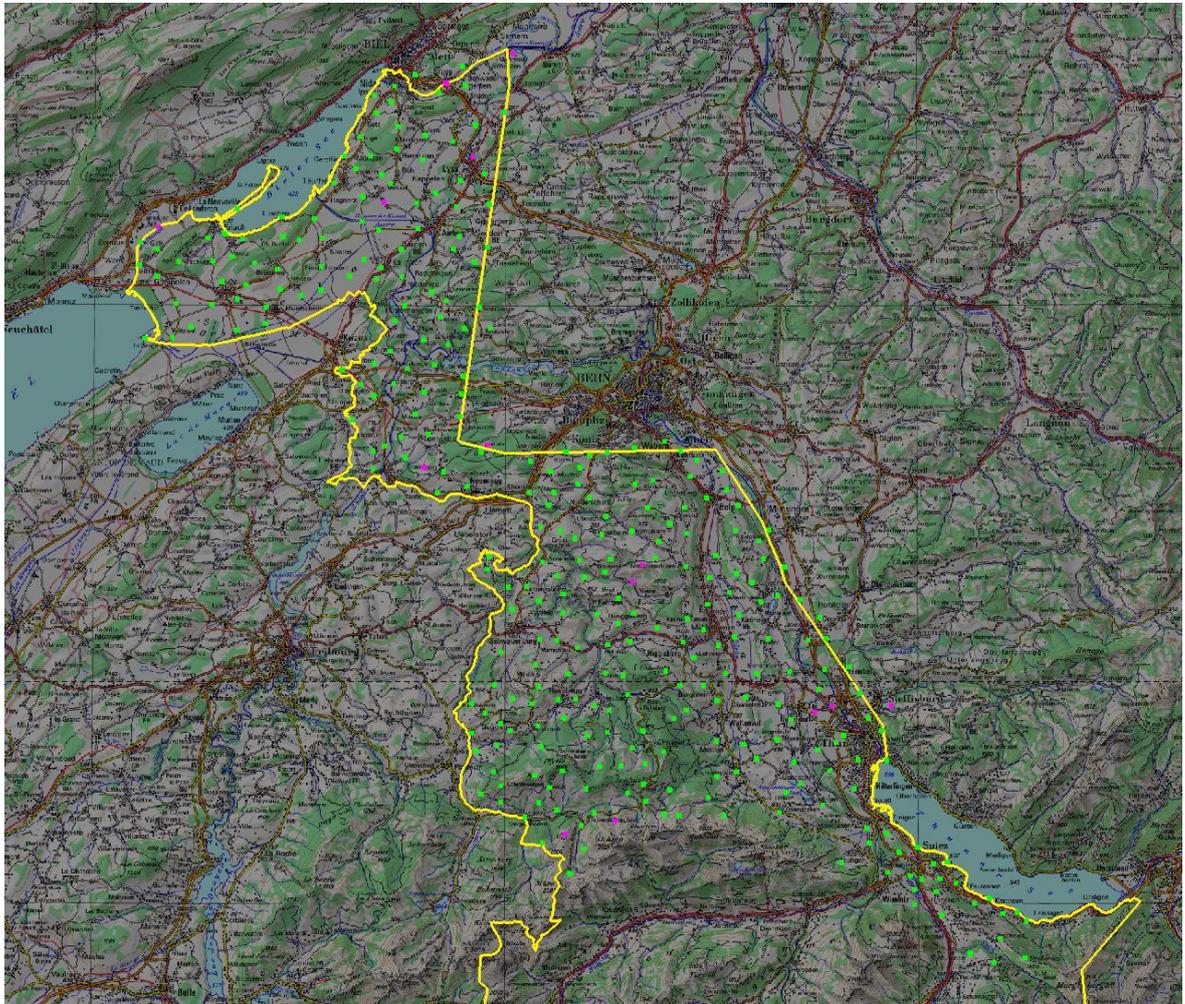


Abbildung 84: Verteilung mit Einfärbung nach Differenz zu klassiertem DTM: grün= <20cm, Magenta= zw. 20 und 50cm (unklar ist teilweise die Identifikation der Punkte)

Trotz der teilweise ungewissen Identifikation der Punkte (einige Punkte sind grösstenteils Nivellementsfixpunkte mit ungenauer Lage und/oder i.d.R. ca. 30cm über Terrain, Magenta sind tlws Punkte in Schächten etc.) resultierte ein mittlerer (Höhen-)Fehler von 10.4cm (verwendet wurden total 328 Punkte für diesen Teil des Projektes) über das gesamte Projektgebiet. Systematische Fehler können somit weitgehend ausgeschlossen werden

4.5.2.2 Lagekontrolle (visuell)

Die Lagekontrolle wurde stichprobenweise anhand vorhandener Daten der amtlichen Vermessungen (Ebene Bodenbedeckung) im Projektionssystem LV95 durchgeführt. Dabei wurden nur die Endprodukte DTM und DOM detaillierter untersucht. In problematischen Zonen wurde zudem die Punktwolke angeschaut.

Nachfolgend sind einige Beispielgebiete aufgeführt. Dargestellt sind die DOM als Slope-Shader (grau schattiert).



Abbildung 85: Lagekontrolle mit Daten amtliche Vermessung Region Riggisberg



Abbildung 86: Beispiel Lagekontrolle mit Daten amtliche Vermessung

Es ist allgemein bekannt, dass die Lagegenauigkeit bei der Erfassungsmethode Airborne Laserscanning grössere Probleme bereitet. Gleichzeitig ist diese schwieriger zu quantifizieren als die Höhengenaugkeit. Systematische Fehler können auf Grund der nicht flächendeckenden Überprüfung der Referenzdaten weitgehend (aber nicht gänzlich) ausgeschlossen werden.

4.5.3 Datenprozessierung 2014

Die Genauigkeit der Klassierung wurde von ASTEC und Flotron AG mit Kontrollplots ausgewiesen. Eine Quantifizierung ob die Vorgaben des Pflichtenheftes erfüllt wurden, ist nur schwer rechnerisch nachzuweisen.

Im Gebiet Gantrisch wurde eine Klasse „tiefe Vegetation“ mitgeliefert. Diese beinhaltet alle als NICHT_Boden klassierten Punkte mit einer Höhe über Grund von weniger als 50cm. Diese Klasse kann als Messrauschen bezeichnet werden und verbessert das Produkt DTM tendenziell. Es wird empfohlen diese Klasse im Projekt zu behalten (entspricht der Konfiguration im Projekt Berner Jura 2011).

Es wurden einige nicht reflektierende Gebäude auf Grund von montierten Solarzellen und/oder nicht reflektierenden Oberflächenmaterialien gefunden. Diese sind in den entsprechenden Metadaten dokumentiert.

4.6 Nachflug Etappe 1

Im Rahmen der Befliegungen zur ersten Etappe im Jahr 2012 sind leider einige Erfassungslücken vorhanden. Diese wurden grösstenteils von der Firma ASTEC GmbH verursacht, da hier teilweise mit einem Geländemodell basierend auf WGS84-ellipsoidischen Höhen die Flugplanung gemacht wurde. Diese Tatsache wurde der Firma Flotron AG erst im Jahr 2014 „gebeichtet“. Da der ALS70 mit dem „Multiple pulse in the air“-Konzept äusserst heikel auf das Nichteinhalten der maximalen Flughöhe reagiert, sind so die grösseren Datenlücken im Raum Konolfingen entstanden. Bei den Datenlücken im Berner Oberland (verursacht durch Blom) sind vor allem topografische Schwierigkeiten zur Begründung heranzuziehen.

Im Rahmen der Restbefliegung Region Gantrisch wurden die wichtigsten Datenlücken durch Flotron AG mit dem Scanner Riegl Q780 nachbeflogen. Dies sind insbesondere die Lücken „Konolfingen“, „Habkern“ und „Iseltwald“. Die Lücken am Projektrand, welche im Hochgebirge lagen umfassen alle keinen Wald und konnten auf Grund des späten Befliegungszeitpunktes (November 2014) nicht mehr abgedeckt werden. Nachfolgend sind die NICHT beflogenen Gebiete abgebildet:

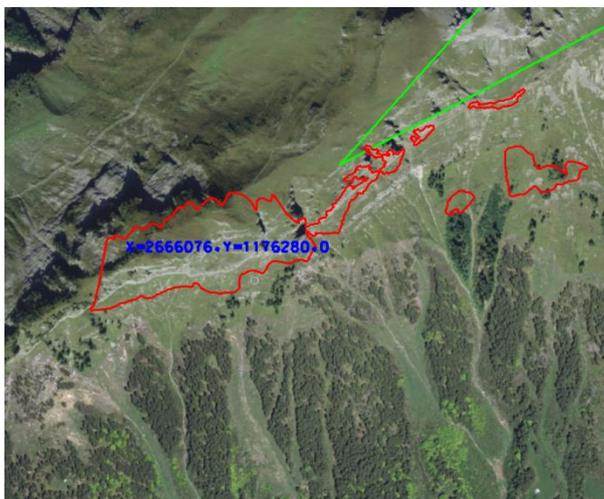


Abbildung 87: Datenlücken oberhalb Gadmen I

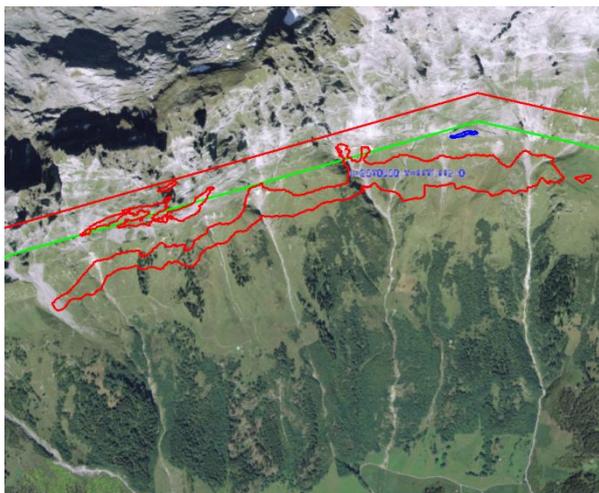


Abbildung 88: Datenlücken oberhalb Gadmen II

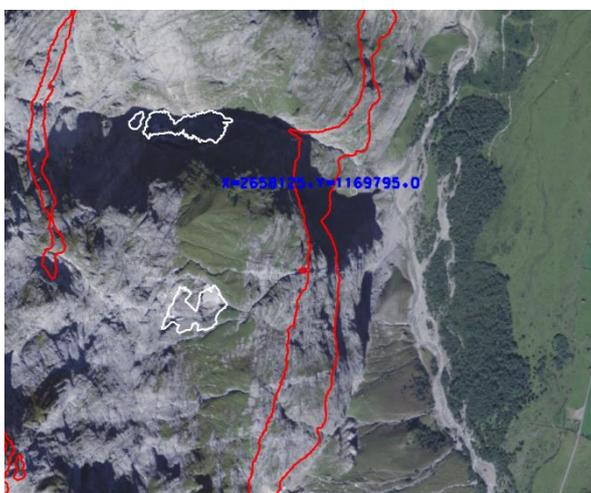


Abbildung 89: Datenlücken im Urbachtal

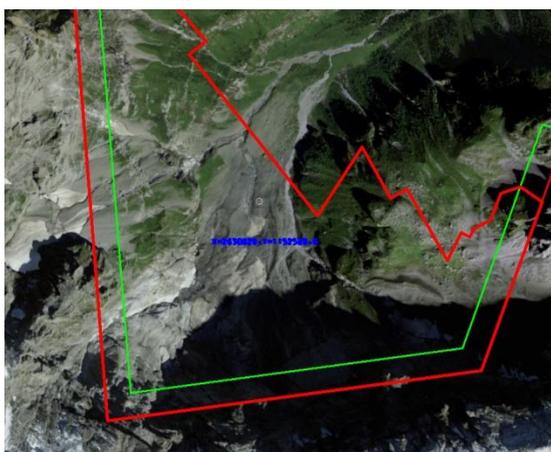


Abbildung 90: Datenlücke oberhalb Stechelberg

Alle übrigen im Berichtteil zur Etappe 1 aufgeführten Datenlücken wurden nachgeflogen und in die Endprodukte eingearbeitet.

4.7 Beurteilung Etappe 2 2013/2014

- Die Befliegung im Mittelland wurde teilweise durch ASTEC durchgeführt. Anschliessend kam der Projektpartner seinen Verpflichtungen nicht mehr nach, so dass äusserst kurzfristig eine eigene Lösung der Flotron AG zum Einsatz kam um das Projekt erfolgreich abzuschliessen.
- Die Produkte der Etappe2 konnten zufriedenstellend abgeschlossen werden.
- Der Projektpartner ASTEC konnte im Herbst 2014 die geforderten Leistungen nicht mehr erbringen. Mit einem Sondereffort organisierte die Flotron AG ein System in Eigenregie. Damit konnte die Erfassung erfolgreich abgeschlossen werden.

5 Übersicht Gesamtprojekt - Kennzahlen

Im Rahmen der Basisauswertungen für das Amt für Wald wurden auch alle Datensätze (Projekt LiDAR Berner Jura 2011 und die beiden Etappen im Rahmen des Projektes LiDAR Bern 2012-2014) zusammengeführt. Das erzielte Produkt ist trotz aller aufgetauchten Schwierigkeiten sehr gut.

Nachfolgend sind einige interessanten Fakten zum Gesamtprojekt aufgeführt

5.1 Technische Kennzahlen – Gesamtprojekt

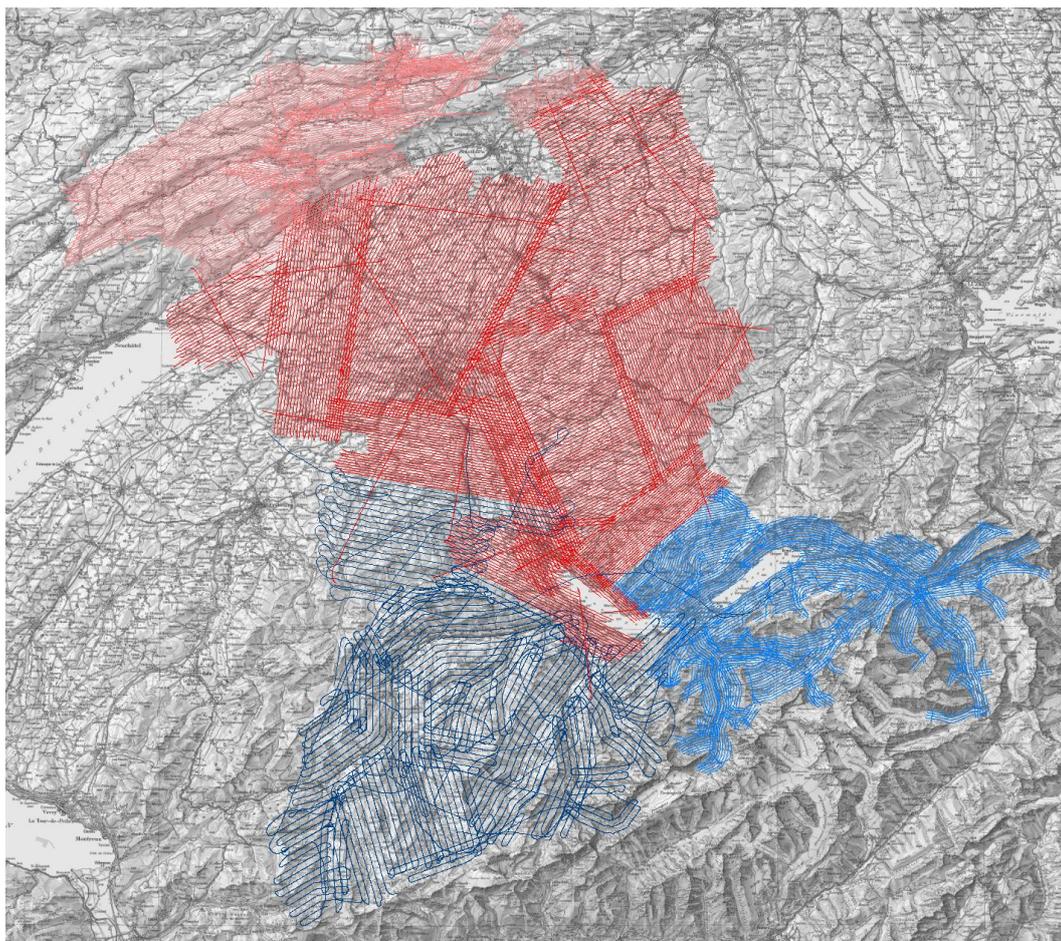


Abbildung 91: Übersicht über die effektiv geflogenen Fluglinien

Für das Gesamtprojekt resultieren folgende Kennzahlen:

Totalfläche inkl. 100m Buffer	5094 km ²
Total gemessene Punkte	71'274'281'000
- davon gültig DOM	40'310'950'000
- davon im DTM (Boden)	20'840'175'000
Mittlere Punktdichte gültig	7.9 Punkte pro m ²
Mittlere Punktdichte DTM	4.1 Punkte pro m ²
Datenmenge (nur .las und .asc)	Ca. 4.3 Terrabyte
Totale Datenmenge (inkl. .xyz)	Ca. 21 Terrabyte
Anzahl Kacheln (km ²)	6094
Anzahl Kacheln (1/16 LK)	533

5.2 Höhen- und Lagegenauigkeit

Für die Kontrolle der Georeferenzierung wurden im Laufe des Projektes total 44 Kontrollzonen mit je ca. 5 Bodenpunkten und minimal 2 Hausdächern eingemessen. Diese dienen zur Kontrolle der Kalibrierung und zur definitiven Lagerung der Punktwolke. Bei der definitiven Lagerung wurde jeweils pro Block ein Shift in der Höhe angebracht. Die Lagegenauigkeit ergab sich aus der jeweiligen Streifenanpassung und wurde nicht korrigiert, da diese jeweils innerhalb der geforderten Toleranzen lag.

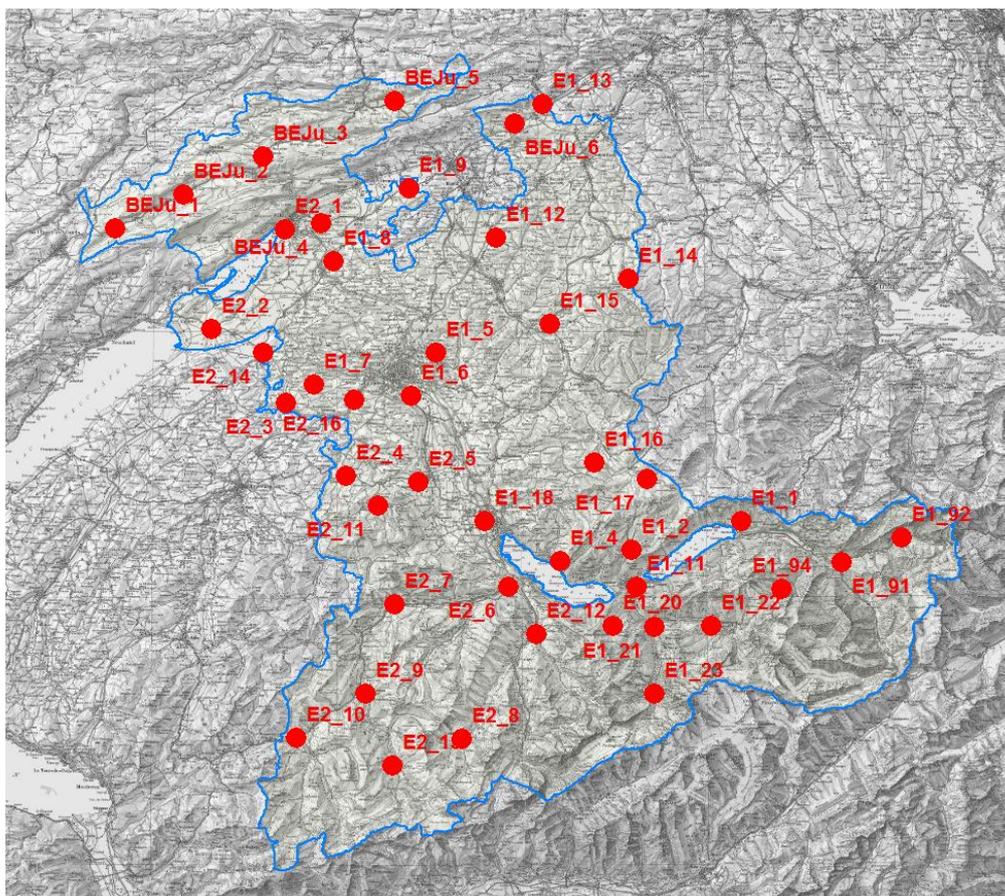


Abbildung 92: Übersicht über effektiv gemessenen Kontrollflächen

Da diese Flächen für die Kontrolle der Höhen (und allfälliger Lagerungskorrekturen) der Punktwolke verwendet wurde ist ein Nachweis der Höhen- und Lagegenauigkeit an diesen Flächen nicht unabhängig.

Screenshots von der visuellen Kontrolle anhand der Dachaufnahmen sind in Anhang A1 dokumentiert.

5.3 Unabhängige Höhenkontrolle / Nachweis Höhengenaugkeit

Als unabhängige Kontrolle wurde über das Gesamtprojekt wurde die Höhe anhand der aus der Landesvermessung bekannten LFP1 und LFP2 kontrolliert. Da hier der Abstich zum effektiven Koordinatenwert i.d.R. nicht bekannt ist, ergibt sich eine pessimistische Höhengenaugkeit, da die Identifikation der effektiven Punktkoordinate oft nicht eindeutig ist. Folgende Werte wurden ermittelt:

Anzahl Punkte für Statistik verwendet	1719
Mittelwert der Abweichungen	+0.011m
Einfache Standardabweichung a posteriori	0.124m

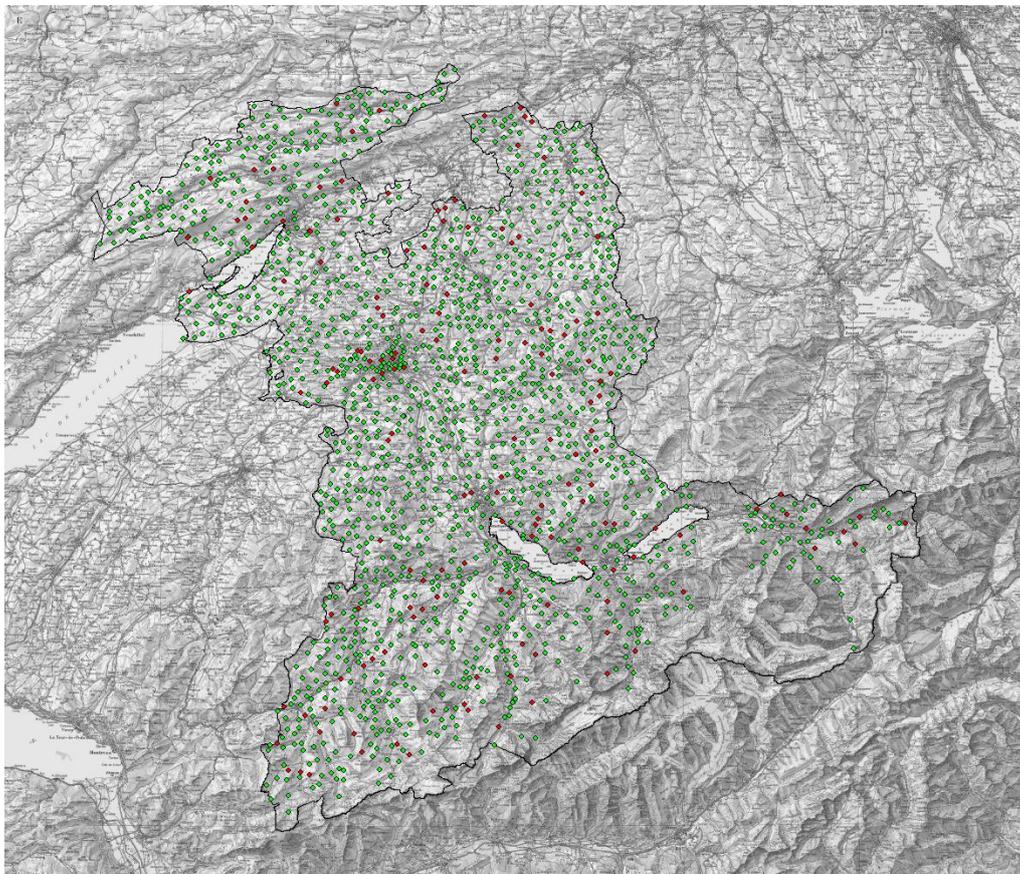


Abbildung 93: unabhängiger Nachweis Höhenkontrolle anhand LFP1+2 (grün=absolute Abweichung <20cm, rot=absolute Abweichung zw. 20 und 50cm)

Die Anforderungen des Pflichtenheftes an die Genauigkeit wurden deutlich übertroffen.

5.4 Datenbeschreibung

Die Datenlieferungen an den Kanton Bern (AGI) erfolgten jeweils ca. 6 Monate nach Befliegung. Anschliessend wurden diese durch die Firma bsf-swissphoto verifiziert. Mit Ausnahme des Teils Berner Jura, hier wurde die Verifikation durch die Uni Zürich durchgeführt. Bei einzelnen Datenlieferungs-einheiten wurden auf Grund der Verifikation Nacharbeiten durchgeführt. Diese wurden fristgerecht umgesetzt.

Die endgültige Datenlieferung des Gesamtprojektes an den Auftraggeber erfolgte im Frühjahr 2015.

5.4.1 Punktwolke klassiert

Für das gesamte Projekt gilt folgende Punktklassendefinition (nach ASPRS-LAS-Standard 1.2, angepasst für projektspezifische Klassen, wo ASPRS leer: eigene Definition):

Identifikator	Bezeichnung Deutsch	Bezeichnung ASPRS
2	Boden	Ground
3	Vegetation tief (Rauschen)	Low Vegetation
4	Vegetation mittel	Medium Vegetation
5	Vegetation hoch	High Vegetation
6	Gebaeude	Building
7	Punkte unter Ground	Low Point (noise)
9	Wasser	Water
10	Loeschungen und unbestaendig	
11	Luftpunkte	
12	Kehrpunkte	Overlap Points
13	Bruecken	
15	Weitere Kunstbauten	
17	ausserhalbPerimeter	
18	<i>Loeschungen und bestaendig</i>	
19 ²	<i>Dachaufbauten</i>	

Sämtliche Datensätze (Rohdaten, Punktwolke klassiert, DTM, DOM) sind mit dieser Klassenzuordnung versehen. D.h. zum Beispiel ein Punkt mit Identifikator 2 ist als Bodenpunkt klassiert worden.

Die Genauigkeit der Klassierung entspricht den geforderten Werten vom Pflichtenheft (98% aller Punkte müssen die richtige Klasse zugewiesen erhalten).

Die klassierte Punktwolke wurde im Format ASPRS LAS 1.2 geliefert. In diesem Format sind Intensitätswerte, Zeitstempel, Scanwinkel und weitere Attribute enthalten.

Zudem wurde die Punktwolke als ASCII-Dateien mit den Spaltenwerten XYZ-Koordinaten, Klasse und Intensität gespeichert und dem Auftraggeber übergeben.

Die klassierte Punktwolke liegt in einer Kachelung à 1km² vor.

² Nur Berner Jura

5.4.2 Digitales Oberflächenmodell (DOM)

Alle ungültigen Punkte wurden entfernt. D.h. es wurden nur die Klassen 2,3,4,5,6,9,13 und 15 gespeichert. Für die Rastergenerierung wurde die Methode „Highest Hit“ verwendet. Bei fehlenden Daten (Wasser, nicht reflektierende Gebäude etc) wurde angemessen zinterpoliert. Die Rastergrösse beträgt 50cm.



Abbildung 94: Slope-Value-Ansicht DOM

Das DOM-Grid liegt in 1/16-Landeskarten-Blatteinteilung als ArcInfo ASCII Grid vor.

5.4.3 Digitales Terrainmodell (DTM)

Das DTM besteht aus der Klasse 2 (Boden) und wird mittels einer Delaunay-Triangulation in ein Raster-DTM mit Rastergrösse 50cm berechnet. Datenlücken (Gebäude, Seen, etc) werden dabei innerhalb der Projektgrenzen zunterpoliert.

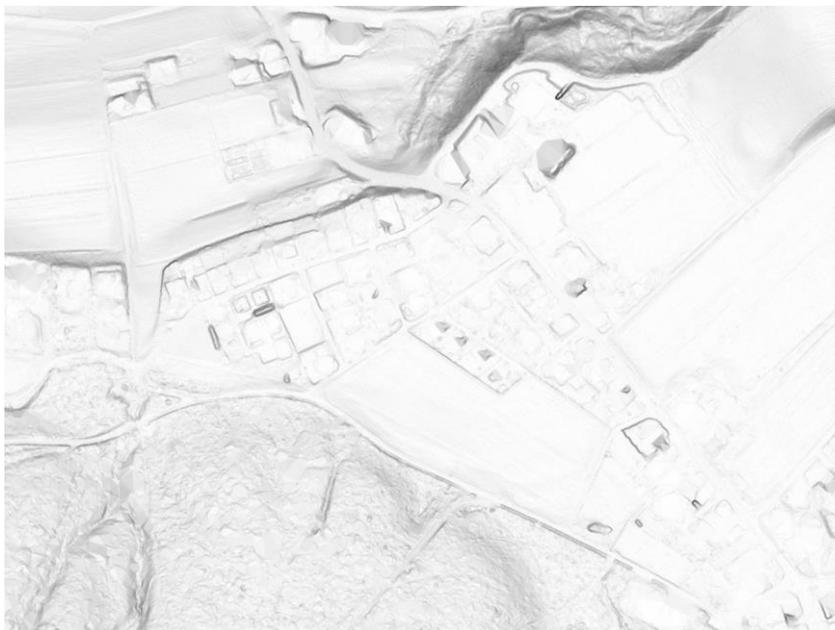


Abbildung 95: Slope-Value-Ansicht DTM

Das DTM-Grid liegt in 1/16-Landeskarten-Blatteinteilung als ArcInfo ASCII Grid vor.

5.4.4 Flugwege

Um die Entstehung der Punktwolke einfacher nachvollziehen zu können, wurden die vereinfachten Flugwege mit dem Attribut Fludatum versehen und als Shapefile sowie als Google-Earth-Datei (.kmz) geliefert.

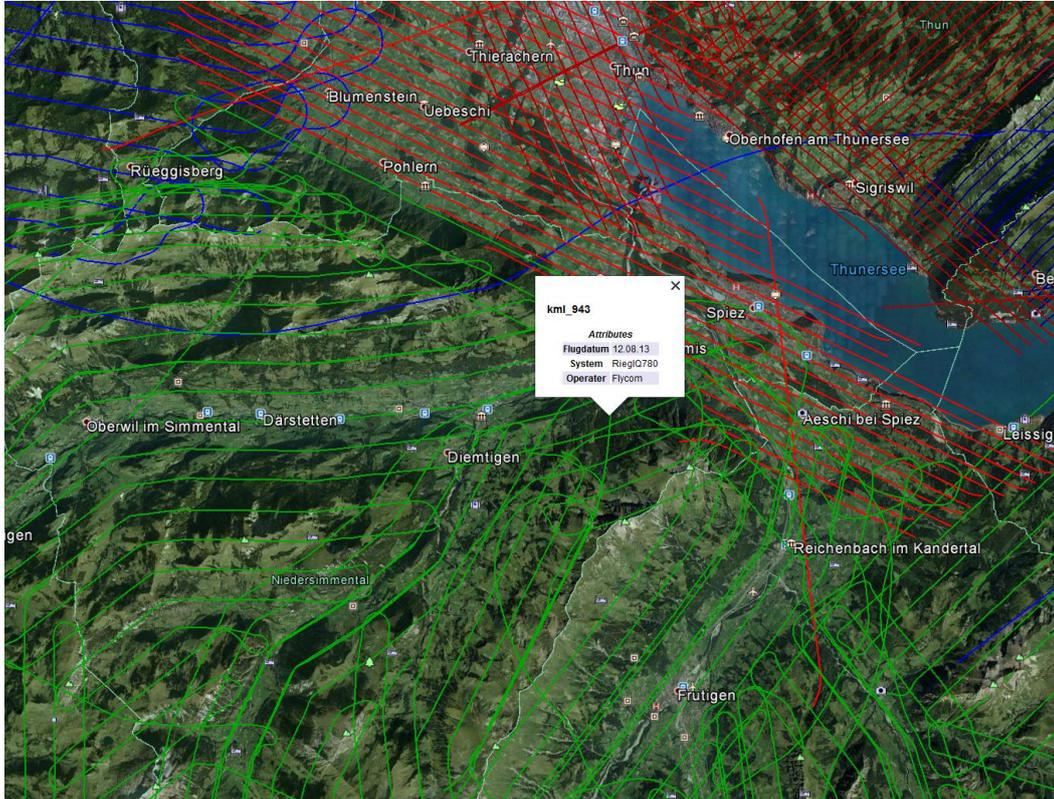


Abbildung 96: Flugwege-Übersicht in Google-Earth (Ausschnitt)

5.5 Schlussbemerkung

Ein Projekt in dieser Grössenordnung mit sehr hohen Anforderungen an die Präzision und die Qualität der Daten ist nicht alltäglich. Wir als lokal ansässige Firma sind stolz auf die erstellten Produkte. 5032 Quadratkilometer in äusserst anspruchsvollem Gelände zu vermessen hat schlussendlich 4.5 Jahre gedauert. Eine offene Kommunikation mit dem Auftraggeber (KAWA) hat uns ermöglicht pragmatische Entscheide rasch und unkompliziert zu treffen und in die Tat umzusetzen. Die beeindruckende Höhengenaugigkeit und die grosse Datenmenge sprechen für sich. Die Hauptaufgabe wird nun sein, die Produkte zu veredeln und spannende Auswertungen durchzuführen. Bereits während dem Erfassungsprojekt wurden diverse neue Anwendungsmöglichkeiten entdeckt.

Meiringen, 20. Mai 2015

Flotron AG

Adrian Annen