



Summarischer Bericht

Bezüglich des vorliegenden Unfalls wurde eine summarische Untersuchung gemäss Artikel 45 der Verordnung über die Sicherheitsuntersuchung von Zwischenfällen im Verkehrswesen vom 17. Dezember 2014 (VSZV), Stand am 1. Februar 2015 (SR 742.161) durchgeführt. Dieser Bericht wurde mit dem Ziel erstellt, dass aus dem vorliegenden Zwischenfall etwas gelernt werden kann.

Luftfahrzeug	Matternet M2 V9	SUI-9909	
Halter	Matternet Inc., 3511 EdisonWay, Menlo Park, CA 94025 USA		
Eigentümer	Matternet Inc., 3511 EdisonWay, Menlo Park, CA 94025 USA		
Operateur	Amerikanischer Staatsangehöriger, Jahrgang 1985		
Ausweis	Gegenwärtig können für diese Art von unbemannten Luftfahrzeugen keine offiziellen Ausweise erworben werden. Es fand eine Ausbildung durch den Betreiber statt.		
Flugstunden	insgesamt	540 h während der letzten 90 Tage	40:35 h
	auf dem Unfallmuster	40:35 h während der letzten 90 Tage	40:35 h
Ort	rund 500 m nordöstlich der Landiwiese, Zürichsee (ZH)		
Koordinaten	245 088 / 683 215 (<i>Swiss Grid</i> 1903) N 47° 21' 05.06" / E 008° 32' 24.45" (WGS ¹ 84)	Höhe	406 m/M
Datum und Zeit	25. Januar 2019, 10:10 Uhr (LT = UTC + 1 h)		
Betriebsart	Gewerbsmässig		
Flugregeln	Sichtflugregeln (<i>Visual Flight Rules – VFR</i>)		
Startort	Klinik im Park (KiP), Zürich		
Zielort	Zentral Labor Zürich (ZLZ)		
Flugphase	Reiseflug		
Unfallart	Notlandung infolge eines technischen Problems		
Personenschaden	Besatzungsmitglieder	Passagiere	Drittpersonen
Leicht verletzt	0	0	0
Nicht verletzt	0	0	Nicht betroffen
Schaden am Luftfahrzeug	Zerstört	Kurzschluss innerhalb der elektrischen Komponenten	
Drittschaden	Keiner		

¹ WGS: *World Geodetic System*, geodätisches Referenzsystem: Der Standard WGS 84 wurde durch Beschluss der internationalen Zivilluftfahrtorganisation (*International Civil Aviation Organization – ICAO*) im Jahr 1989 für die Luftfahrt übernommen.

Sachverhalt

Allgemeines

Die Schweizerische Sicherheitsuntersuchungsstelle (SUST) ist gemäss Art. 2 der Verordnung (EU) 996/2010 in Verbindung mit Artikel 3 lit. b der Verordnung über die Sicherheitsuntersuchung von Zwischenfällen im Verkehrswesen (VSZV) grundsätzlich auch für die Untersuchung von Unfällen und schweren Vorfällen unbemannter Luftfahrzeuge zuständig. Die Drohnentechnologie beziehungsweise der Einsatz unbemannter Luftfahrzeuge gewinnen zusehends an Bedeutung und werden sich in naher Zukunft zweifellos zu einem wichtigen Zweig der Luftfahrt entwickeln.

Aus den Vorabklärungen des vorliegenden Zwischenfalls erkannte die SUST verschiedene Themenkreise im Bereich der Prävention, so dass gestützt auf Art. 20 Abs. 4 VSZV eine Untersuchung eröffnet wurde.

Vorgeschichte

Es handelte sich um einen gewerbsmässigen² Einsatz im Auftrag der Schweizerischen Post, bei dem Blutproben transportiert wurden. Die Post ist Auftraggeber und Serviceanbieter und kauft sich die Dienstleistung bei der Firma Matternet ein.

Vor dem ersten Flug des Tages wurde mit der Drohne ein Testflug zur Überprüfung der Systeme durchgeführt; dieser Testflug ergab keine Auffälligkeiten. Am gleichen Vormittag erfolgte ein Flug der Schwesterdrohne gleicher Bauart zum Unispital ohne besondere Vorkommnisse.

Der Drohnenoperator (*operator*) nahm die verpackte Probe am Start bei der Klinik im Park entgegen und traf die üblichen Vorbereitungen. Zusammen mit dem Missionsleiter (*Flight Director – F/D*) führte er die Prüflisten vor dem Start durch. Dabei standen die beiden *operator* am Start- und Bestimmungsort über einen *conference-call* mit dem F/D in der *mission control unit* in Dübendorf in Kontakt. Alle Vorbereitungen verliefen nach Plan, sodass der Start der Drohne von der Klinik im Park am westlichen Seeufer für den Überflug über den Zürichsee zum Zentral Labor Zürich (ZLZ) beim Balgrist durchgeführt werden konnte (vgl. Abbildung 1).

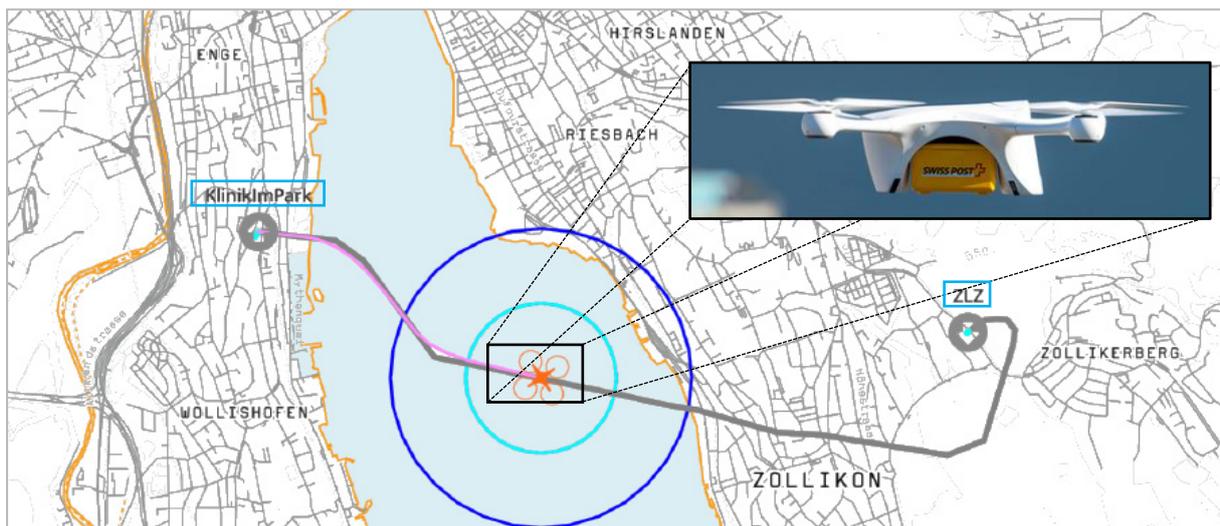


Abbildung 1: Prinzipskizze des programmierten Flugweges der Drohne von der Klinik im Park am westlichen Seeufer des Zürichsees zum Zentral Labor Zürich (ZLZ). Dieser weist eine Länge von rund 5.8 km auf und verläuft teilweise innerhalb der Kontrollzone des Flughafens Zürich (LSZH) respektive des Militärflugplatzes Dübendorf (LSMD). Die blauen Kreise stellen Warnzonen gegenüber anderen Luftfahrzeugen dar. Quelle: Matternet, angepasst durch die SUST.

² Im Rahmen der erforderlichen Betriebsbewilligung unterscheidet das Bundesamt für Zivilluftfahrt (BAZL) nicht zwischen gewerbsmässigen respektive nicht-gewerbsmässigen oder wissenschaftlichen Drohnenbetreibern.

Flugverlauf

Der F/D liess die Drohne vom Typ M2 V9 des Herstellers Matternet, eingetragen als SUI-9909, um 10:09 Uhr starten. In rund einer halben Minute stieg die Drohne vertikal auf die für den programmierten Flugweg vorgesehene Höhe von rund 60 m über Grund und erreichte die vorgegebene Geschwindigkeit von rund 19 m/s, entsprechend rund 68 km/h, etwa 20 Sekunden später (vgl. Abbildung 2).

Wenige Sekunden nach Überflug des westlichen Seeufers kam es um 10:10:05 Uhr zu einem GPS³-Signalverlust. Die Drohne folgte für wenige Sekunden dem programmierten Flugweg.



Abbildung 2: Flugverlauf der Drohne (gelbe Pins) entlang des programmierten Flugweges (graue Linie) ab dem Start bei der Klinik im Park (blauer Kreis) über die Landwiese bis zum letzten aufgezeichneten Datenpunkt um 10:10:05 Uhr sowie die Stelle (roter Pin), an der die Drohne, rund 320 m vom Ufer der Badeanstalt Mythenquai in rund 20 m Tiefe gefunden wurde.

Um 10:10:10 Uhr leitete die Drohne, weil sie ihre eigene Position nicht mehr bestimmen konnte, eine Notlandung ein. Dabei wurde nach der internen Logik des *Flight Termination System* (FTS) der Fallschirm ausgeworfen. Dem F/D in der *mission control unit* wurde zu diesem Zeitpunkt auf seinem Bildschirm die Warnung (*alert*) «FTS fuse false⁴» angezeigt. Er hatte in dieser Phase keine Möglichkeiten, das weitere Geschehen zu beeinflussen. Die Drohne segelte aus rund 60 m Höhe über Grund parabolisch nach unten, traf mit einer mittleren Vertikalgeschwindigkeit von 4 m/s auf der Wasseroberfläche auf und versank (vgl. Abbildung 3).

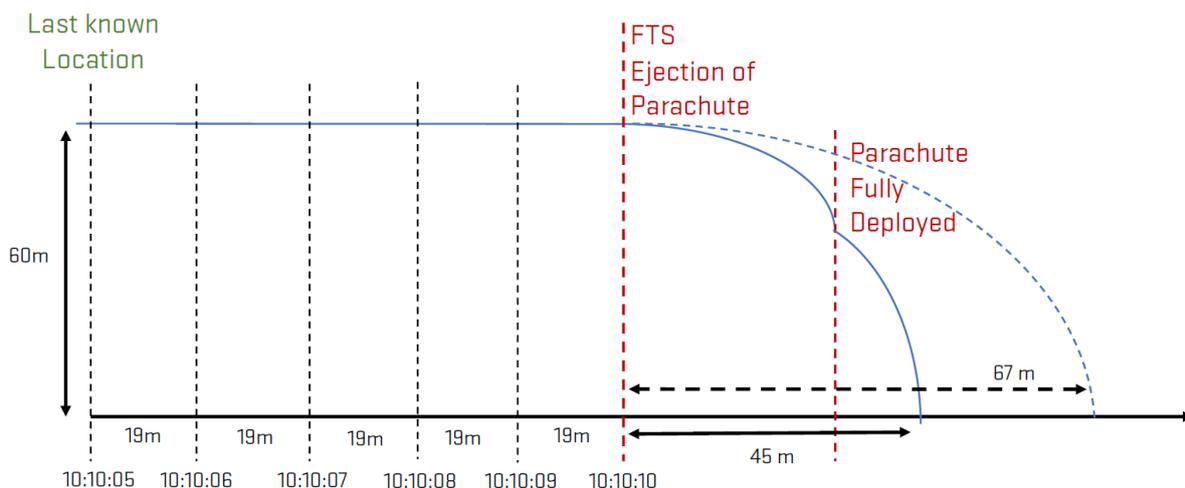


Abbildung 3: Schematische Darstellung der letzten Sekunden des vertikalen Flugverlaufes der Drohne bis zum Auslösen des Fallschirms in einer Höhe von 60 m über Grund. Quelle: Matternet.

³ GPS: *Global Positioning System*, Globales Positionsbestimmungssystem

⁴ *Fuse false*: Diese Warnung bedeutete, dass die Sicherung des Fallschirms ausgelöst hatte.

Die Blutproben blieben unversehrt; verletzt wurde niemand. Gemäss Notfallplan des Betreibers informierte der F/D umgehend die Polizei. Die Drohne konnte am Morgen des 28. Januar 2019 in rund 20 m Tiefe am Grund des Zürichsees geborgen werden.

Feststellungen

Beim Start betrug die Spannung des Flugakkumulators 47.86 V, beim Einleiten der Notlandung 48.24 V (vgl. Anlage 1). Bei der Wasserung der Drohne entstand in der Leistungselektronik, im Batteriemangement und beim Flugakkumulator durch das Eindringen des Seewassers ein Kurzschluss und der Akkumulator wurde dabei entladen.

Bei der Bergung wurde die Hauptleine des Notfallschirms an der Struktur der Drohne rechts neben dem Fallschirmschacht befestigt vorgefunden. In diesem Bereich war ein Stück des Gehäuses (*fairing*) herausgebrochen. Äusserlich wies die Drohne keine weiteren Beschädigungen auf.

Im Rahmen weiterer Abklärungen stellte sich heraus, dass die 5 Volt-Versorgung des GPS-Empfängers sowie des optischen Sensors für die Landung (*precision landing sensor*) ausgefallen war. Die zugehörige Stromversorgung war über einen von Matternet modifizierten ODU⁵-Connector verbunden, dessen Pins sich sehr nahe zueinander befanden (vgl. Abbildung 5).

Allgemeine Angaben zur Drohne

Eintragungszeichen	SUI-9909
Luftfahrzeugmuster	Matternet M2 V9
Charakteristik	Drohne
Hersteller	Matternet Inc., 3511 EdisonWay, Menlo Park, CA 94025 USA
Halter/Eigentümer	Matternet Inc., 3511 EdisonWay, Menlo Park, CA 94025 USA
Baujahr	2018
Werknummer	M2-0025 (N705MN)
Antrieb	Quadrocopter ⁶ mit vier elektrischen Motoren vom Typ XRotor PRO 6215 180KV, angetrieben von einer Lithium-Ion-Batterie (Flugakkumulator) mit einer Kapazität von 756 Wh;
Maximales Abfluggewicht	13.2 kg
Maximale Nutzlast	2 kg
Maximale Reisegeschwindigkeit	20 m/s (entsprechend 72 km/h)
Maximale Windkomponente	8 m/s (Böen 12 m/s)
Maximale Reichweite	20 km (windstill) bei einer Nutzlast von 1 kg 15 km (windstill) bei einer Nutzlast von 2 kg
Kommunikation	GSM ⁷ -Netzwerk
Zulassungsbereich	VFR ⁸ bei Tag und Nacht

⁵ ODU: *Push-Pull*-Rundsteckverbindung der Firma ODU, deren Gründung auf die Erfindung von Otto Dunkel zurückgeht

⁶ Ein Quadrocopter (auch Quadcopter) besitzt vier in einer Ebene angeordnete, senkrecht nach unten wirkende Rotoren oder Propeller, um Auftrieb bzw. Vortrieb zu erzeugen.

⁷ GSM: *Global System for Mobile communication*

⁸ VFR: *Visual Flight Rules*, Sichtflugregeln

Relevante Ausrüstung zur Vermeidung von Kollisionen

Kollisionswarngerät Flarm⁹, Antikollisionslichter

Fallschirm

Die Drohne ist mit einem *Flight Termination System* (FTS) ausgestattet, das bei Bedarf das Auswerfen des Fallschirms auslöst (vgl. Abbildung 4). Mit ausgeworfenem Fallschirm segelt die Drohne mit einer Vertikalgeschwindigkeit von 3 bis 5 m/s zu Boden. Dabei ertönt ein lautes Warnsignal, um Personen am Boden zu warnen.

Durch den Fallschirm wird die Aufprallenergie der zu Boden segelnden, unbeladenen Drohne im Mittel auf rund 90 J begrenzt.



Abbildung 4: Bildsequenz des Fallschirmauswurfs im Rahmen des *Flight Termination System* (FTS). Der Fallschirm steht unter einer Federspannung, deren Sicherung (*fuse*) elektronisch ausgelöst werden kann.

Die Hauptplatine (*main avionic board*) ist mit einem Schutzharz überzogen. Viele Steckverbindungen besitzen einen eher geringen Schutz vor Umwelteinflüssen (vgl. Abbildung 5).

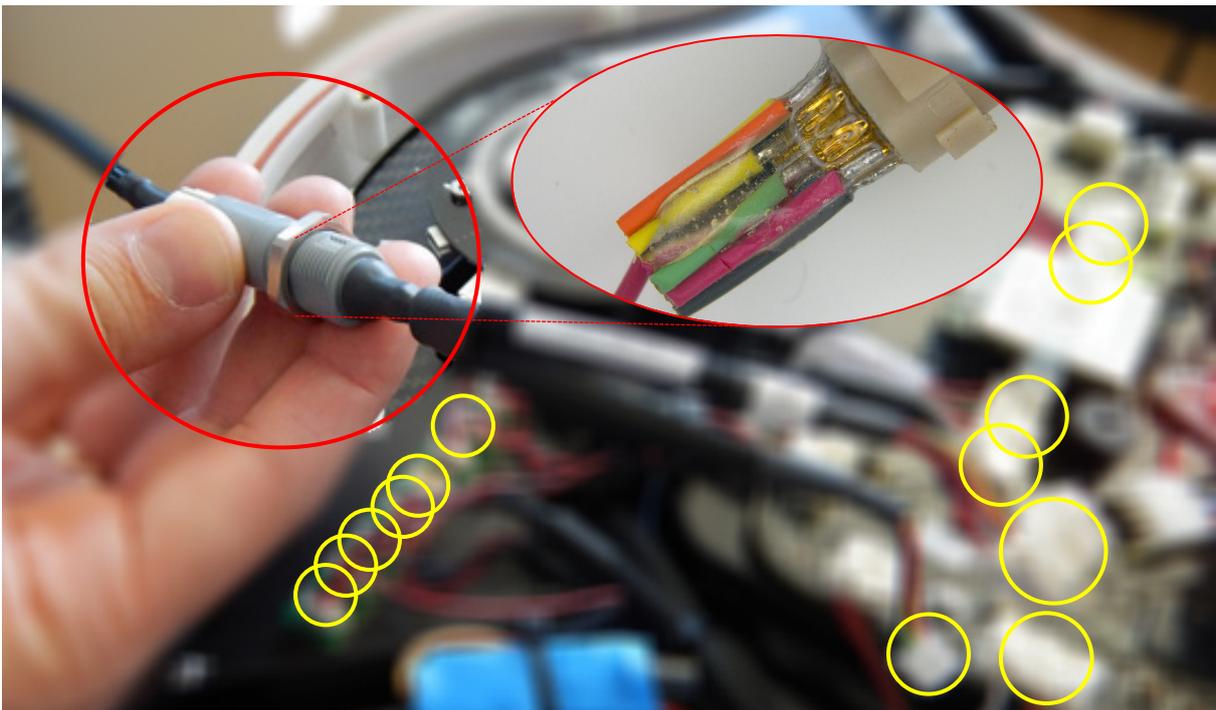


Abbildung 5: Hauptplatine (*main avionic board*) einer baugleichen Drohne mit vielen Steckverbindungen (gelbe Kreise), die einen eher geringen Schutz vor Umwelteinflüssen (z.B. Feuchtigkeit) haben. Der GPS-Empfänger sowie der optische Sensor für die Landung (*precision landing sensor*) wurden über einen ODU-connector (rote Ellipse) des Typs MINI-SNAP PC gespeist, dessen Pins sich sehr nahe zueinander befanden (vgl. Einsatzbild).

⁹ Ein Verkehrsinformations- und Kollisionsvermeidungssystem, das in der Regel im Bereich der allgemeinen Luftfahrt insbesondere in Leicht- und Segelflugzeugen Anwendung findet.

Lagerregelung, Steuerung und Streaming

Der Flugakkumulator speist nebst diversen Schaltkreisen einen kleineren Lithium-Polymer (LiPo) – Akkumulator mit einer Kapazität von 5 Wh, der eine unabhängig Stromversorgung für das FTS darstellt. Dieser stellt bei Bedarf auch eine redundante Stromversorgung für die Flugsteuerung (*flight controller*) mit den integrierten Sensoren, das GPS- sowie das GSM-Modul dar. Eine weitere Kontrolleinheit (*companion computer*) prüft, ob sich die Drohne auf der programmierten Flugroute befindet. Bei einem Verlust des GSM-Signals fliegt die Drohne autonom entlang der programmierten Flugroute an den Bestimmungsort weiter.

Die Drohne darf nur in Sichtflugwetterbedingungen (*Visual Meteorological Conditions – VMC*) betrieben werden. Ebenso wird sie in Vereisungsbedingungen, d.h. bei sichtbarer Feuchtigkeit (*visible moisture*¹⁰) und Temperaturen von 5 °C oder darunter nicht betrieben.

Jeder Flug der Drohne wird von einem F/D in der *mission control unit* in Dübendorf (ZH) anhand der GPS-Daten überwacht, die über eine GSM-Verbindung zum Server des Betreibers geleitet werden (*streaming*). Im Weiteren stehen ihm nebst diversen meteorologischen Angaben auch Informationen zum umgebenden Luftverkehr zur Verfügung. Diese werden durch den Anbieter *AirMap*, der in Zusammenarbeit mit Skyguide unter dem Projekt U-Space¹¹ Radar- und Flarmdaten und ADS-B¹² sowie andere RPAS¹³-Daten zur Verfügung stellt, geliefert.

In allfälligen Konfliktsituationen hat der F/D die Möglichkeit, mit folgenden Befehlen in den Flugverlauf einzugreifen:

- *land*: Die Drohne wird an Ort und Stelle gelandet;
- *hold*: Die Drohne schwebt an Ort und Stelle;
- *resume*: Die Drohne setzt die Mission fort;
- *return*: Die Drohne kehrt zum Ausgangsort zurück.

Eine manuelle Steuerung der Drohne jenseits der Sichtlinie (*Beyond Visual Line of Sight – BVLOS*) ist nicht möglich, sondern nur bei allfälligen Start- und Landeproblemen durch den Drohnenoperator (*operator*) vorgesehen.

Vor dem ersten Flug des Tages wird ein Testflug mit Überprüfung der Systeme (*system check*) durchgeführt. Dieser umfasst unter anderem folgende Punkte:

- Die Systeme der Drohne;
- Die Bedingungen am Startort und am Landeort;
- Die Kontrollsysteme des F/D in der *mission control unit*.

Der Testflug der Drohne SUI-9909 am Morgen des Unfalltages ergab keine Auffälligkeiten.

Besatzung

Der Missionsleiter (*Flight Director – F/D*) ist für die Durchführung der Mission verantwortlich. Von seinem Aufenthaltsort in der *mission control unit* startet und überwacht er den automatischen Flug der Drohne entlang der Flugroute (vgl. Abbildung 1) und greift bei Bedarf mittels der vier obengenannten Befehle während der Mission ein.

¹⁰ Für den Betreiber fällt darunter jede Art von Wolken oder Niederschlag, Sichtweiten unterhalb von 1500 m sowie Feuchtigkeit am Boden, welche die Oberfläche der Drohne beeinflussen könnte.

¹¹ U-Space: ist eine Reihe neuer Dienste und Verfahren, die den sicheren und effizienten Zugang zum Luftraum für Drohnen unterstützen sollen.

¹² ADS-B: *Automatic Dependent Surveillance – Broadcast*

¹³ RPAS: *Remotely Piloted Aircraft Systems*, unbemannte Flugsysteme

Ein F/D soll nach Anforderungen des Betreibers entweder über eine Privatpilotenlizenz auf Flächenflugzeugen bzw. Helikoptern oder ein Bachelorstudium in Aviatik oder eine gleichwertige Ausbildung im militärischen Bereich verfügen. Im vorliegenden Fall durchlief der F/D eine 40 stündige Ausbildung bei der amerikanischen Armee, gefolgt von Einsätzen im Ausland.

Der Drohnenoperator (*operator*) am Start- und Zielort ist für die Flugbereitschaft der Drohne, deren Start- und Aufsetzfläche sowie für den jeweils unmittelbaren Luftraum zuständig. Falls das automatische Landesystem (*Flight Termination System – FTS*) ausfällt, ist es dem *operator* vor Ort mittels Fernsteuerung möglich, die Drohne nach Sicht zu landen und so die Mission abzuschliessen. Die *operator* durchlaufen beim Betreiber eine interne Schulung; vorausgesetzt wird Erfahrung aus dem Drohnenbetrieb im privaten Bereich.

Kriterien zum Auslösen des Fallschirms

Unter den folgenden Bedingungen wird das *Flight Termination System (FTS)* automatisch ausgelöst, und die Drohne leitet einen automatischen Notabstieg (*emergency landing*) ein:

- Ausfall des Flugakkumulators (*power loss*);
- ungewöhnliche Fluglagen der Drohne (z.B. infolge eines Propellerfehlers);
- vordefinierte ungewöhnliche Sinkraten (*vertical speed*);
- laterale Ablage von mehr als ± 100 m vom programmierten Flugweg;
- Verlassen der vertikalen Betriebsgrenze (*envelope*);
- Verlust des GPS-Signals für mehr als 5 Sekunden.

Der F/D ist nicht in der Lage, das FTS manuell auszulösen.

Aufzeichnungen der Flugdaten

Die Flugdaten werden mit einer Frequenz von 16 Hz auf lokale Speicherkarten aufgezeichnet und sekundlich an den F/D in der *mission control unit* übertragen (vgl. Anlage 1). Die Daten auf den MicroSD-Karten konnten infolge eines Defekts auf den Datenträgern nicht ausgelesen werden. Mit entsprechender Software konnte mittels digitaler Forensik die Daten des Betriebssystems auf einer Speicherkarte wiederhergestellt werden. Die hoch aufgelösten Aufzeichnungen des Flugweges konnten jedoch nicht wiederhergestellt werden.

Fehlende Gesetzesgrundlagen

Aufgrund der weltweit raschen Zunahme der Drohnenbewegungen sowohl im kommerziellen Bereich als auch für den privaten Gebrauch sehen sich die internationalen Luftfahrtbehörden gezwungen, neue Rahmenbedingungen für den Betrieb von Drohnen festzulegen.

Für die Weiterentwicklung der unbemannten Luftfahrt bzw. der Drohnentechnologie bedarf es auch aus Sicht vieler Verbände möglichst zeitnah eine rechtliche Grundlage in Europa. So müssten zum Beispiel die Bedingungen für die kommerzielle Nutzung von Drohnen vereinfacht werden, damit Unternehmen auch zukünftig Produkte für die umbenannte Luftfahrt entwickeln und anwenden können.

Einer Vereinheitlichung der Vorschriften für Drohnen und Drohnenbetreiber durch die EU-Kommission sowie entsprechenden Sicherheitsauflagen, wonach unter anderem Drohnen und ihre Piloten in der EU künftig registriert werden müssen, wurden vom EU-Parlament am 12. Juni 2018 zugestimmt. Am 28. Februar 2019 stimmte der EASA-Ausschuss gemäss Art. 127 der Verordnung (EU) 1139/2018 dem EU-Recht zu unbemannten Fluggeräten (*Unmanned Aircraft System – UAS*) zu («*Commission Implementing Regulation on rules and procedures for the operation of unmanned aircraft*»). Diese Verordnung wird im 2. Quartal 2020 in Kraft treten. Ein anderer EU-Rechtsakt zu technischen Anforderungen tritt voraussichtlich be-

reits im 2. Quartal 2019 in Kraft. Weil die Schweiz über die bilateralen Verträge und das Luftverkehrsabkommen EU-Recht bezüglich der Luftfahrt grundsätzlich übernimmt, werden diese Rechtsvorschriften voraussichtlich auch in das nationale Recht aufgenommen.

Bis zu diesem Zeitpunkt erteilt das Bundesamt für Zivilluftfahrt (BAZL) Bewilligungen für den bewilligungspflichtigen Betrieb nach einem risikobasierten Ansatz (*risk based approach*).

Betriebsbewilligung nach einem risikobasierten Ansatz

Drohnen und Flugmodelle dürfen weder im Bereich von Menschenansammlungen noch jenseits der Sichtlinie (*Beyond Visual Line of Sight – BVLOS*) betrieben werden. In Ausnahmefällen kann das BAZL jedoch eine Bewilligung für solche Flüge erteilen. Für alle Betriebe, die sich nicht im Rahmen eines Standardverfahrens beurteilen lassen, ist eine vollständige Sicherheitsüberprüfung gemäss den Richtlinien der internationalen Expertengruppe JARUS¹⁴ über das *Specific Operations Risk Assessment (SORA)* erforderlich.

Das SORA stellt einen risikobasierten Ansatz dar und beinhaltet unter anderem folgende Punkte:

- eine detaillierte Beschreibung des geplanten Betriebes;
- eine detaillierte Beschreibung des technischen Systems (Fluggerät, *control station*, *data-link* etc.);
- eine Analyse des Risikos des geplanten Betriebes für Personen und Eigentum am Boden (Infrastruktur), inklusive einer möglichen Umweltgefährdung;
- eine Analyse des Risikos des Betriebes für andere Luftfahrzeuge, die möglicherweise in der Nähe sein können.
- eine detaillierte Beschreibung der Massnahmen zur Reduktion der identifizierten Risiken (*mitigation*);
- eine Analyse möglicher Ausfälle von technischen Schutzmassnahmen bzw. die Wirksamkeit allfälliger Redundanzen;
- Notfallverfahren (*emergency procedures*).

Unter der Voraussetzung, dass es sich stets um einen gleichgelagerten Betrieb mit denselben Risiken handelt und sichergestellt ist, dass die Bedingungen und Auflagen eingehalten werden können, kann das BAZL Betriebsbewilligungen auch für einen längeren Zeitraum, jedoch höchstens für ein Jahr, erteilen.

Aufgrund der hohen Anzahl von Anfragen hat das BAZL zwei externe Firmen mit der Beurteilung des Risikos einer Kollision mit anderen Luftfahrzeugen (*air risk*) sowie des Risikos gegenüber Drittpersonen und Infrastruktur (*ground risk*) betraut. Die technische Risikoanalyse wurde durch die Sektion Design/Production des BAZL beurteilt. Die gemäss JARUS empfohlenen Beurteilungskriterien für das erforderliche Sicherheitsniveau (*level of safety*) lagen bei 10^{-6} im Bereich *ground risk*, 10^{-7} im Bereich Kollision mit Luftfahrzeug der allgemeinen Luftfahrt (*general aviation*) bzw. 10^{-9} mit Verkehrsflugzeugen.

Betriebliche Rahmenbedingungen

Die erlaubten betrieblichen Rahmenbedingungen umfassten einen Flug über besiedeltem Gebiet unter BVLOS-Bedingungen mit einer maximal zulässigen Flughöhe von 500 ft über Grund (*Above Ground Level – AGL*). Die Flugroute verlief von der Klinik im Park (KiP) westlich des Seeufers in südöstlicher Richtung in einer Höhe von 120 m (entsprechend 394 ft) AGL über besiedeltem Gebiet sowie in 60 m (entsprechend 197 ft) AGL über dem See zum Zentrallabor Zürich (ZLZ) (vgl. Abbildung 6). Die rund 5.8 km lange Flugroute lag teilweise innerhalb der

¹⁴ JARUS: *Joint Authorities for Rulemaking on Unmanned Systems*

Kontrollzone des Flughafens Zürich (LSZH) respektive des Militärflugplatzes Dübendorf (LSMD), jedoch ausserhalb der jeweiligen Flugverbotszone¹⁵. Die Drohne legte bei einer Reisegeschwindigkeit von 19 m/s inklusive der Auf- und Abstiegsphase je nach Windverhältnissen diese Strecke in einer mittleren Flugzeit von 7 bis 8 Minuten zurück.

Ferner wurde die Routenwahl unter Berücksichtigung der beiden Helikopter-Landeplätze (Heli-Pad) des Spitals Hirslanden und der Polizei Zürich sowie von lärmsensitiven Gebieten über möglichst dünn besiedelte Gebiete gelegt.

Aufzeichnungen von über 100 Flügen, je mit über 3000 Datenpunkten zeigten, dass die Überflüge in einer Korridorbreite von ± 10 m erfolgten. Diese Korridorbreite der Flugroute wurde vom BAZL als *flight geography* festgelegt. An diese fügt sich die *containment area* mit einer Breite von ± 100 m an, innerhalb der bei unvorhergesehenen Abweichungen anhand gezielter Verfahren (*contingency procedures*) die Drohne wieder zurück in die *flight geography* gesteuert wird und die Mission fortgesetzt werden kann. Demgegenüber umfasst die *ground risk buffer area* denjenigen Bereich, innerhalb dem die Flugmission nicht mehr fortgesetzt werden kann und abgebrochen werden muss.

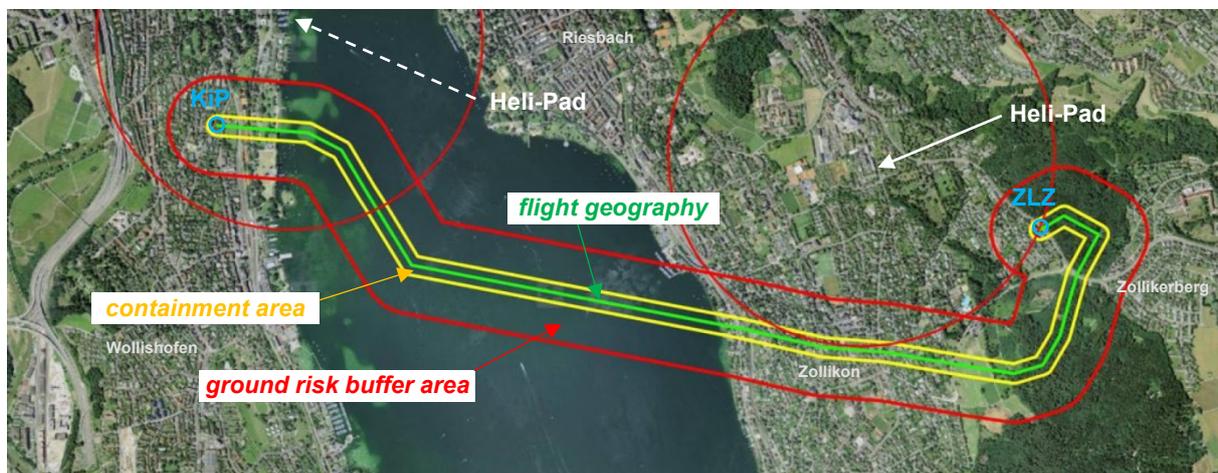


Abbildung 6: Die *flight geography* entlang der programmierten etwa 5.8 km langen Flugroute (grüne Linie) von der Klinik im Park (KiP) erfolgt über möglichst dünn besiedelte Gebiete, unter Berücksichtigung der beiden Helikopter-Landeplätze (Heli-Pad) des Spitals Hirslanden und der Polizei Zürich (weisse Pfeile), zum Zentrallabor Zürich (ZLZ) und umfasst eine Korridorbreite von ± 10 m. Die daran anschliessende *containment area* entspricht einem ± 100 m breiten Korridor, die *ground risk buffer area* zusätzliche ± 200 m, Quelle: Unterlagen aus SORA-Prozess, angepasst durch die SUST.

Eine Ausstattung der Drohne mit ADS-B war nicht zulässig; nach Auskunft des BAZL lag die Begründung darin, dass in Europa auf der zur Verfügung stehenden ADS-B Frequenz das technisch mögliche Signalkontingent für die bemannte Luftfahrt benötigt wird.

Im vorliegenden Fall war ursprünglich eine Bewilligung für den Drohnenbetrieb über ein Jahr vorgesehen. Aufgrund anzunehmender erhöhter Risiken durch die Anwesenheit von Badegästen im Bereich der Landiwiese (vgl. Abbildung 2) während der warmen Monate wurde die Bewilligung vorerst nur bis Ende April 2019 ausgestellt.

Meldepflicht

Zwischenfälle von unbemannten Luftfahrzeugen auf Schweizer Hoheitsgebiet, die Personenschäden, eine erhebliche Beschädigung oder den Verlust des Luftfahrzeuges zur Folge hatten, sowie Zwischenfälle, bei denen eines oder mehrere mantragende Luftfahrzeuge beteiligt waren (Kollisionen oder Fastkollisionen), müssen unverzüglich an die Meldestelle der Schweizerischen Sicherheitsuntersuchungsstelle (SUST) gemeldet werden. Die Meldestelle der SUST

¹⁵ Der Betrieb von Modellluftfahrzeugen und Drohnen mit einem Gewicht zwischen 0.5 kg und 30 kg in einem Abstand von weniger als 5 km von den Pisten eines zivilen oder militärischen Flugplatzes ist untersagt.

ist die Alarmzentrale der Schweizerischen Rettungsflugwacht (REGA) und hat folgende Telefonnummern: in der Schweiz 1414, aus dem Ausland +41 333 333 333. Zeitgleich ist der Zwischenfall der zuständigen Polizeidienststelle zu melden. Die Meldung des Zwischenfalls an das Bundesamt für Zivilluftfahrt (BAZL) hat mit dem „*Occurrence Report Form*“ online unter: www.aviationreporting.eu zu erfolgen.

Für Drohnen bestehen gegenwärtig keine einheitlichen Kategorien und keine verbindlichen Regelungen. Im Hinblick auf den Zweck von Untersuchungen gemäss der VSZV erscheint es sinnvoll, wenn Zwischenfälle mit Drohnen, die über eine Betriebsbewilligung verfügen, sowie Zwischenfälle, bei denen Personen zu Schaden kamen, meldepflichtig sind.

Meteorologische Angaben

Das Wetter war sonnig und windschwach. Über dem See hielt sich feuchter Dunst.

Wetter	sonnig bei feuchtem Dunst
Wolken	1/8 bis 2/8 auf 2900 ft AGL ¹⁶
Sicht	4400 m
Wind 557 m AMSL	310 Grad, 2 kt
Wind am See	windstill
Temperatur und Taupunkt 557 m AMSL	-4 °C / -8 °C
Temperatur und Taupunkt am See	-1 °C / -7 °C
Luftdruck (QNH)	1017 hPa (Druck reduziert auf Meereshöhe, berechnet mit den Werten der ICAO ¹⁷ -Standardatmosphäre)
Gefahren	keine

Getroffene Massnahmen

Alle Drohnen der Version V9 wurden infolge der vorliegenden Erkenntnisse seitens des Herstellers mit je zwei GPS-Empfängern und Kompass mit redundanter Stromversorgung ausgestattet. Ebenso wurde die betroffene Steckverbindung (*ODU-connector*) ausgetauscht.

Die Testflüge im Nachgang zu diesen Modifikationen erlaubten gemäss Betreiber die Prüfung der Redundanz, indem die Stromzufuhr zu einem der beiden GPS-Empfänger unterbrochen wurde. Ferner liess sich somit auch bestätigen, dass die Fortsetzung des Fluges bei einem redundanten GPS-Empfänger in einem solchen Fall möglich gewesen wäre.

Nach Einschätzung des BAZL galten die vorgenannten baulichen Veränderungen an der Drohne M2 V9 als *major changes*, weshalb die betroffenen Drohnen vor einer Wiederaufnahme des Flugbetriebs inspiziert wurden.

Analyse

Technische Aspekte

Gemäss den vorliegenden Flugdaten war die Spannung des Flugakkumulators genügend und konnte somit als Ursache ausgeschlossen werden (vgl. Anlage 1). Der geringe Anstieg der Spannung des Flugakkumulators gegen das Ende der Aufzeichnung ergab sich aus dem Umstand, dass alle Motoren gestoppt wurden.

¹⁶ AGL: *Above Ground Level*, über Grund

¹⁷ ICAO: *International Civil Aviation Organization*

Wie die weiteren Abklärungen ergaben, war die 5 Volt-Versorgung des GPS-Empfängers sowie der optische Sensor für die Landung (*precision landing sensor*) ausgefallen. Dies deckt sich mit den Flugdaten (vgl. Anlage 1), wonach ab dem Zeitpunkt 10:10:05 Uhr für 4 Sekunden die gleiche Position aufgezeichnet worden war. Der Fehlercode 4096 in der Spalte «*Anomaly status*», der durch das *precision landing system* hervorgerufen worden war, weist ebenfalls auf den Stromunterbruch hin. Per Design löste die Drohne aufgrund des Verlustes des GPS-Signals automatisch das *Flight Termination System* (FTS) aus und leitete eine Notlandung ein.

Die verwendeten Steckverbindungen (*connector*) sind teilweise vor Umwelteinflüssen geschützt (vgl. Abbildung 5). Auch wenn grundsätzlich die Drohne nicht in Vereisungsbedingungen, d.h. bei sichtbarer Feuchtigkeit (*visible moisture*) und Temperaturen von 5 °C oder darunter, zum Einsatz kommt, kann eine gewisse Restfeuchtigkeit innerhalb des Gehäuses nicht ausgeschlossen werden. Es liegt daher der Schluss nahe, dass es in der Steckverbindung (ODU-*connector*) des optischen Sensors für die Landung (*precision landing sensor*) zwischen den nahebeieinanderliegenden Pins zu einem Kurzschluss kam (vgl. Abbildung 5), was einen Stromausfall (*power loss*) aller in diesem Stromkreis befindlichen elektronischen Komponenten, unter anderem auch des GPS-Sensors, zur Folge hatte.

Nach dem Ausstossen des Fallschirms erfuhr die Drohne, die sich bis dahin im freien Fall befunden hatte (vgl. Abbildung 3), durch die Bremswirkung des entfaltenen Fallschirms einen Schlag. Dadurch und als Folge der exzentrischen Befestigung der Hauptleine wurde ein Kunststoffteil des Gehäuses (*fairing*) aus dem Gehäuse ausgebrochen. Dieses Spurenbild lässt den Schluss zu, dass die Drohne durch den Fallschirm in ihrer Fallbewegung gebremst wurde.

Bei der Wasserung der Drohne kam es zu einem Kurzschluss innerhalb der elektrischen Komponenten, die einen Totalschaden der Drohne zur Folge hatte. Damit war die Unfalldefinition gemäss Art. 2 Vo (EU) 996/2010 erfüllt. Bei einer Landung an Land wäre die Drohne wahrscheinlich nur leicht beschädigt worden.

Die Testflüge im Nachgang zu den Modifikationen im Rahmen der getroffenen Massnahmen erlaubten gemäss Hersteller die Prüfung der angestrebten technischen Redundanz im Fall eines einzelnen GPS-Empfängers, wie sie gemäss *Specific Operations Risk Assessment* (SORA) gefordert wird. Es ist daher davon auszugehen, dass sich ein Notabstieg, wie er im vorliegenden Fall durch das FTS herbeigeführt worden war, aufgrund eines totalen GPS-Signalverlustes künftig als sehr unwahrscheinlich erweisen wird. Trotzdem kann in Zukunft ein Teilausfall gewisser Systemkomponenten nicht ausgeschlossen werden, solange Steckverbindungen ohne vollständigen Schutz vor Umwelteinflüssen, namentlich vor Feuchtigkeit, zur Anwendung kommen.

Das momentan vorliegende Konzept des FTS auf Basis einer *electrical fuse* setzt eine permanente Stromversorgung, die durch eine separate Batterieeinheit gewährleistet wird, voraus. Sollten also diese zusätzliche Batterie bzw. die zugehörige Steuereinheit versagen, könnte der Fallschirm nicht mehr ausgestossen werden und ein Notabstieg wäre nicht mehr möglich. Die Drohne würde bei einem Kontrollverlust oder beim Verlassen der *containment area* unweigerlich aus 60 m AGL bzw. 120 m AGL zu Boden stürzen und mit einer Energie von rund 6.5 kJ resp. 13 kJ auf den Boden aufprallen. Wesentliche Systeme in der bemannten Luftfahrt sind entweder hochredundant ausgelegt oder bleiben betriebsbereit bei Teilausfällen (*fail operational design*). Es ist augenfällig, dass das einzige automatisch ausgelöste Notverfahren (*emergency procedure*) der vorliegenden Drohne diesen Ansprüchen nicht genügen würde.

Betriebliche Aspekte

Die Drohne darf nicht bei Vereisungsbedingungen, d.h. bei sichtbarer Feuchtigkeit (*visible moisture*) und Temperaturen von 5 °C oder darunter betrieben werden. Anhand der vorliegenden meteorologischen Daten darf geschlossen werden, dass die Voraussetzungen für eine Vereisung der Propeller bei einer Luftfeuchtigkeit von unter 70 % auch bei Minustemperaturen nicht gegeben waren.

Bei einem Verlust des GSM-Signals fliegt die Drohne autonom entlang der programmierten Flugroute weiter, ohne dass die zugehörigen Informationen des Flugverlaufs übertragen werden (*streaming*). Ungeachtet der aktuellen Position, möglicherweise kurz nach dem Aufstieg am Abflugort, fliegt die Drohne demzufolge je nach Windsituation 7 bis 8 Minuten an den Bestimmungsort weiter, ohne dass der F/D in der *mission control unit* den Flugverlauf beeinflussen kann. Auch eine manuelle Auslösung des FTS ist in einem solchen nicht möglich. Der F/D hat lediglich über den separaten GPS-Sender im Kollisionswarngerät Flarm Angaben über die Position der Drohne.

Auch wenn die Drohne innerhalb der *containment area*, unter Umständen sogar innerhalb des ± 10 m breiten Korridors der *flight geography* verbleibt, und somit die Fortsetzung des Fluges an den Bestimmungsort formell den Anforderungen eines *contingency procedure* Genüge leistet, ist dennoch festzuhalten, dass dabei die Drohne über mehrere Minuten ohne jegliche Eingriffsmöglichkeiten unterwegs ist und somit eine Gefahr für andere Luftfahrzeuge darstellen kann. Aufgrund der fehlenden Datenübertragung (*streaming*) bleibt die Drohne nur aufgrund des Kollisionswarngeräts Flarm für andere Luftfahrzeuge sichtbar.

Im Weiteren ist auffällig, dass abgesehen von diesem GSM-Signalverlust, keine weiteren *contingency procedure* vorhanden sind. Sobald die Drohne eine ungewöhnliche Fluglage einnimmt oder in der Vertikalen bzw. Horizontalen die *flight geography* verlässt, wird sofort das Notverfahren in Form des automatischen FTS ausgelöst. Das FTS kann nicht manuell vom F/D ausgelöst werden, auch wenn hierfür grundsätzlich die technischen Voraussetzungen gegeben wären. Auch wenn ein hoher Grad an Autonomie dem Grundgedanken dieses aufkommenden Zweiges der Luftfahrt entspricht, bleibt fraglich, ob das FTS als rein autonomes Notverfahren zweckmässig ist.

Schlussfolgerungen

Mit grosser Wahrscheinlichkeit trat während des Fluges der Drohne in einer Steckverbindung ein Kurzschluss auf, der einen Ausfall der 5 Volt-Speisung des GPS-Empfängers und anderer Komponenten zur Folge hatte. Aus diesem Grund konnte die Drohne ihre eigene Position nicht mehr bestimmen und leitete nach der internen Logik des *Flight Termination Systems* (FTS) eine Notlandung ein. Diese erfolgte, wie vorgesehen, durch das Abschalten der vier Motoren und das Ausstossen des Notfallschirms.

Meteorologische Bedingungen oder andere äussere Umstände konnten als Ursache für die Notlandung ausgeschlossen werden.

Vor dem Hintergrund der laufenden Revisionen zu den JARUS-Richtlinien, der jüngst verabschiedeten Verordnung (EU) 1139/2018 zu unbemannten Fluggeräten sowie der momentanen technischen Entwicklung ist es zum gegenwärtigen Zeitpunkt nicht zielführend, eine Sicherheitsempfehlung, insbesondere im Bereich *factors to risk*, d.h. hinsichtlich Faktoren, welche die Entstehung und den Verlauf des vorliegenden Unfalls zwar nicht beeinflusst haben, die aber dennoch ein Sicherheitsrisiko darstellen, auszusprechen.

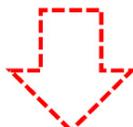
Weitergehende Untersuchungen werden keine zusätzlichen, im Sinn der Prävention zweckmässigen Informationen ergeben. Die SUST verzichtet aus diesem Grund im vorliegenden Fall gestützt auf Art. 45 VSZV auf weitere Untersuchungshandlungen und schliesst die Untersuchung mit dem vorliegenden summarischen Bericht ab. Sie wird jedoch diesen in Entstehung befindlichen Zweig der unbemannten Luftfahrt aufmerksam weiterverfolgen.

Bern, 11. April 2019

Schweizerische Sicherheitsuntersuchungsstelle

Anlage 1: Streaming der Flugdaten

1	TIMESTAMP	ALT	AGLALT	AIRSPEED	LAT	LON	BATTERYVOLTAGE	POWER	ANOMALYSTATUS
2									
3	01/25/19 10:09:01	423.2	-4.7	0.1	47.35321	8.531799	47.86	1.17	0
4	01/25/19 10:09:02	423.4	-4.3	0.1	47.3532	8.531799	47.14	1.53	0
5	01/25/19 10:09:03	424.8	-3	0.4	47.35321	8.531802	46.76	1.65	0
6	01/25/19 10:09:04	427.3	-1	0.2	47.35321	8.531802	46.83	1.57	0
7	01/25/19 10:09:05	430.7	2.4	0.2	47.35321	8.531804	46.75	1.54	0
8	01/25/19 10:09:06	433.2	5.6	0.1	47.35321	8.531803	46.86	1.53	0
9	01/25/19 10:09:07	435.9	8.7	0.1	47.35321	8.531802	46.62	1.61	0
10	01/25/19 10:09:08	439.9	12.1	0.1	47.35321	8.531802	46.54	1.6	0
11	01/25/19 10:09:09	443.2	16.5	0.1	47.35321	8.531801	46.59	1.59	0
12	01/25/19 10:09:10	446.7	19.9	0.1	47.35321	8.5318	46.61	1.55	0



64	01/25/19 10:10:02	460.9	60	18.9	47.35246	8.538195	45.97	1.62	0
65	01/25/19 10:10:03	461	60	19	47.35237	8.538416	46.06	1.54	0
66	01/25/19 10:10:04	461	60	19.1	47.35229	8.538634	45.81	1.69	0
67	01/25/19 10:10:05	461.1	60	19.1	47.35223	8.538765	45.66	1.82	4096
68	01/25/19 10:10:06	461.1	60.1	19.1	47.35223	8.538765	45.66	1.75	4096
69	01/25/19 10:10:07	461.1	60.1	19.1	47.35223	8.538765	45.98	1.59	4096
70	01/25/19 10:10:08	461.1	59.9	19.1	47.35223	8.538765	45.92	1.63	4096
71	01/25/19 10:10:09	0	-1.2	0	0	0	45.97	1.52	4096
72	01/25/19 10:10:10	0	-1.8	0	0	0	48.24	0.02	4160

Abbildung 7: Die wichtigsten Flugdaten wie Höhe (ALT), Geschwindigkeit über Grund (AIRSPEED) sowie die GPS-Position (LAT/LONG) wurden inklusive der Spannung [V] des Flugakkumulators sowie des Anomalystatus mit einer Frequenz von 16 Hz aufgezeichnet und sekundlich an die *mission control unit* übertragen (*streaming*). Der Fehlercode 4096 in der Spalte «Anomalystatus» wurde durch das *precision landing system* hervorgerufen. Allfällige Fremdeinflüsse werden ebenso aufgezeichnet.