

## **Hochaufgelöste repetitive UAV-Flüge für die Glaziologie in Nordwest-Grönland**

Yvo Weidmann<sup>1</sup>, Guillaume Jouvét<sup>1</sup>, Martin Funk<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Versuchsanstalt für Wasserbau und Glaziologie, ETH Zürich, 8093 Zürich

Am Bowdoin-Gletscher in Nordwest Grönland werden die unterschiedlichsten Eigenschaften und Parameter der Kalbungsvorgänge (Abbruch von Eisbergen an der Gletscherzunge) untersucht. Dies im Rahmen eines gemeinsamen Forschungsprojektes der Hokkaido Universität in Sapporo (Japan) und der Versuchsanstalt für Wasserbau und Glaziologie (VAW) der ETH Zürich. Neben Daten aus zwei tiefen Bohrlöchern (Temperatur, Wasserdruck, Deformation), DGPS-Stationen, Seismik- und Infrason Messarrays, Timelaps-Kameras und Ebbe-Flut Messungen kommen auch Bildflüge mit einer Nurflügler-Drone zum Einsatz. Diese Drone wurde spezifisch für dieses Projekt an der VAW entworfen und gebaut. Neben einer vollständigen Autonomie und Flug ausserhalb der Sicht muss die Drone auch eine Distanz von mindestens 50 Kilometer zurücklegen. Trotz einer Vielzahl von Hindernissen konnten im Rahmen einer Expedition im Juli 2015 erfolgreiche Flüge durchgeführt werden. Die aus den Flügen hergeleiteten Höhenmodelle und Orthophotos flossen dann in die mathematische Modellierung des Gletscherkörpers ein. Diese Modellierung erlaubt eine detaillierte Analyse und Verständnis über die bei kalbenden Gletschern ablaufende Prozesse.

On the Bowdoin Glacier (Northwest Greenland) the processes related to calving (break-off of iceberg at the front of tidewater glaciers) is studied in detail within a joint project of the university of Hokkaido in Sapporo (Japan) and the laboratory of hydraulics, hydrology and glaciology (VAW) of the ETH Zürich. In 2015, aerial imageries by UAV has completed the list of monitoring activities such that temperature and deformation measurements in some boreholes, DGPS station, seismic and infrasound detectors, timelapse cameras. For that purpose, a special drone has been built for this project at the VAW. This UAV has the capability of flying autonomously more than 50 km. Despite unexpected technical problems, UAV flights were operated successfully in July 2015. After post-processing the aerial images, we are able to derive high-resolution digital elevation models and orthoimages. Using feature-tracking techniques, the ice flow field could be inferred from the orthoimages of the two flights. Finally, these data were combined to mathematical model, which allow us a detail analysis of the fracturing processes prior to calving events.

Depuis trois ans, l'université de Hakkaido à Sapporo (Japon), et le laboratoire d'hydraulique, hydrologie, et glaciologie (VAW) de l'EPF Zürich organise chaque été une expédition sur le glacier de Bowdoin (Nord-ouest du Groenland) pour étudier les processus liées au vêlage (séparation d'iceberg au front de glaciers). En 2015, un activité de photographies aériennes par UAV a complété la liste des activité de surveillance telle que la température et la déformation de la glace dans des forages, station DGPS, détecteurs sismique et infra-son, camera timelapse. Pour cela, un drone a été développé pour ce projet au VAW. Ce drone peut voler en autonomie plus de 50 km. Malgré bon nombre de problèmes techniques inattendus, des vols ont pu être opérés avec succès en Juillet 2015. Le traitement des images aériennes a permis de construire un modèle de terrain à haute-résolution ainsi que des ortho-images. A partir des données de deux vols successifs, un champs de vitesse a pu être déterminé par des techniques de „feature-tracking“. Ces données ont été combinées à un modèle mathématique, lequel a permis une analyse détaillée des fractures qui conduise au vêlage.

## Das Projekt Bowdoin-Gletscher

Der Bowdoin-Gletscher befindet sich an der nordwestlichen Küste der grönländischen Eiskappe (77° 42' N; 68° 35' W) und ist ein rund 3 Kilometer breiter und 10 Kilometer langer Meeressgletscher. An der Kalbungsfront liegt der Gletscher selber auf dem Grund des Fjordes auf und ist 250 Meter dick. Im Bereich der Kalbungsfront bewegt sich das Zentrum des Gletschers mit etwa 1.5 Meter pro Tag zum Meer.

In der jüngsten Vergangenheit haben solche Meeressgletscher in Grönland und der Antarktis eine dramatische Beschleunigung der Fließgeschwindigkeit, Dickenverlust und Rückzug der Gletscherfront erfahren. Diese Änderungen sind auf die Erwärmung der Atmosphäre und der Polarmeere zurückzuführen. Doch die Verbindung zwischen den unterschiedlichen Faktoren und Prozesse ist bei weitem noch nicht vollständig verstanden. Dieser Mangel an Wissen macht eine zuverlässige Abschätzung des Beitrages an die Meereserhöhung durch Meeressgletscher unmöglich. Aktuelle Eisflussmodelle können die dramatischen Änderungen nicht abbilden und limitieren so eine akkurate Schätzung der zukünftigen Veränderung des Meeresspiegels.

Im Gegensatz zu den Meeressgletschern im Süden von Grönland, erfahren die Gletscher im Norden erst in den letzten Jahren solche Veränderungen. Somit könne in diesen Breitengraden die oben beschriebenen Auswirkungen der Erwärmung in einem sehr frühen Stadium beobachtet und beschrieben werden. Der Bowdoin-Gletscher bietet sich aus verschiedensten Gründen als optimales Freiluftlabor an: Eine geografischen Breite von rund 80° N, optimale Zugänge auf dem Gletscher bis zur Kalbungsfront für die Installation von Messgeräten, Tageslicht während 24 Stunden im Juli, einfacher Zugang per Helikopter oder Fischerboot aus der nördlichsten Siedlung Grönlands Qaanaaq sowie eine ausgezeichnete Infrastruktur und Logistik in Qaanaaq.

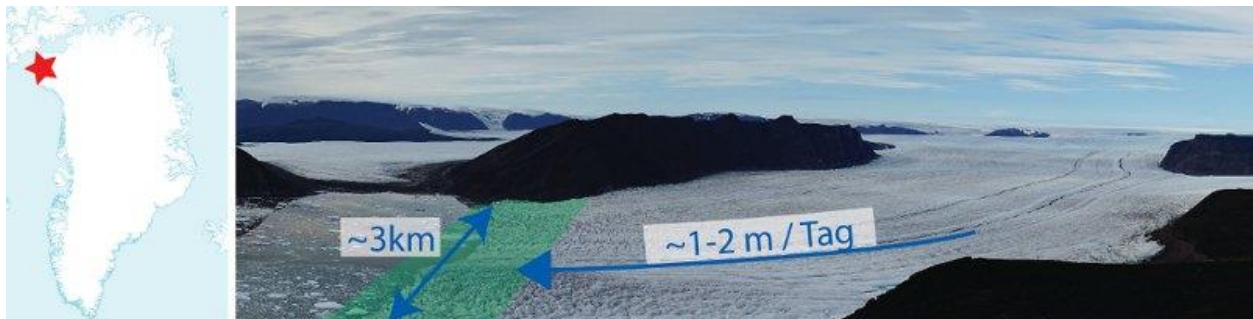


Abbildung 1: Lokalität des Bowdoin-Gletschers in Nordwest Grönland (links) und Übersicht der mit Dronenflügen beobachteten Kalbungsfront (grüne Fläche).

Im Rahmen des Projektes wurden während der Expedition im Juli 2014 eine Vielzahl von unterschiedlichen Experimenten installiert und durchgeführt. Unter anderem wurden drei 250 Meter tiefe Bohrlöcher erstellt und mit unterschiedlichsten Sensoren bestückt. Zudem wurden zwei automatische Kameras installiert, welche in festen Zeitabständen das Fließen des Gletschers und das Abbrechen der Kalbungsfront dokumentierten. Diese Installationen wurden auch weiter über die Polarnacht autonom betrieben.

Während der Expedition im Juli 2015 wurden neben den erwähnten Messinstallationen mehrerer Seismik- und Infrasound-Arrays auf und neben dem Gletscher installiert. Mittels diesen Experimenten wurden die Eisbeben, welche durch das Fließen des Gletschers entstehen, detektiert.

Um ein vollständiges Bild der Spaltenbildung und der damit verbundenen Kalbungsereignisse sowie eine detaillierte Auswertung der Geschwindigkeitsfelder des Gletschers zu erhalten, wurde 2015 zusätzlich eine Luftbilddrone eingesetzt.

### **Motivation für hochaufgelöste UAV Flüge**

Wie eingangs erwähnt, sind die Prozesse an den Kalbungsfronten von Meeresgletscher wenig verstanden. Die aktuellen mathematischen Gletschermodelle erlauben noch keine zuverlässige Simulation der Prozesse. Für den Aufbau solcher Modelle ist unter anderem eine detaillierte Geometrie der Gletscheroberfläche notwendig. Für einen Teil dieser Eingabeparameter bietet die Luftbildphotogrammetrie eine optimale Datenquelle. Neben einer hohen räumlichen Auflösung ist die zeitliche Auflösung entscheidend. Bei einer Fliessgeschwindigkeit des Gletschers von rund 1.5 Meter pro Tag, lassen sich durch repetitive Überflügen mit sehr kurzen Zeitabständen (wenige Tage oder sogar Stunden) grossflächige Veränderungen zuverlässig detektieren.

Mittels solcher repetitiver Daten lassen sich neben der Veränderung der Gletscherdicke auch hochaufgelöste Geschwindigkeitsfelder der gesamten Kalbungsfront berechnen. Aus diesen Geschwindigkeitsfeldern lassen sich weiter die Spannungen an der Gletscheroberfläche herleiten.

Diese abgeleiteten Resultate (Geschwindigkeitsfelder, Hauptverzerrung und Scherspannungen) dienen weiter als Input in die mathematische Modellierung der Kalbungsfront. Die folgende Abbildung zeigt den Datenfluss zwischen den repetitiven Luftbildflügen und der mathematischen Modellierung.

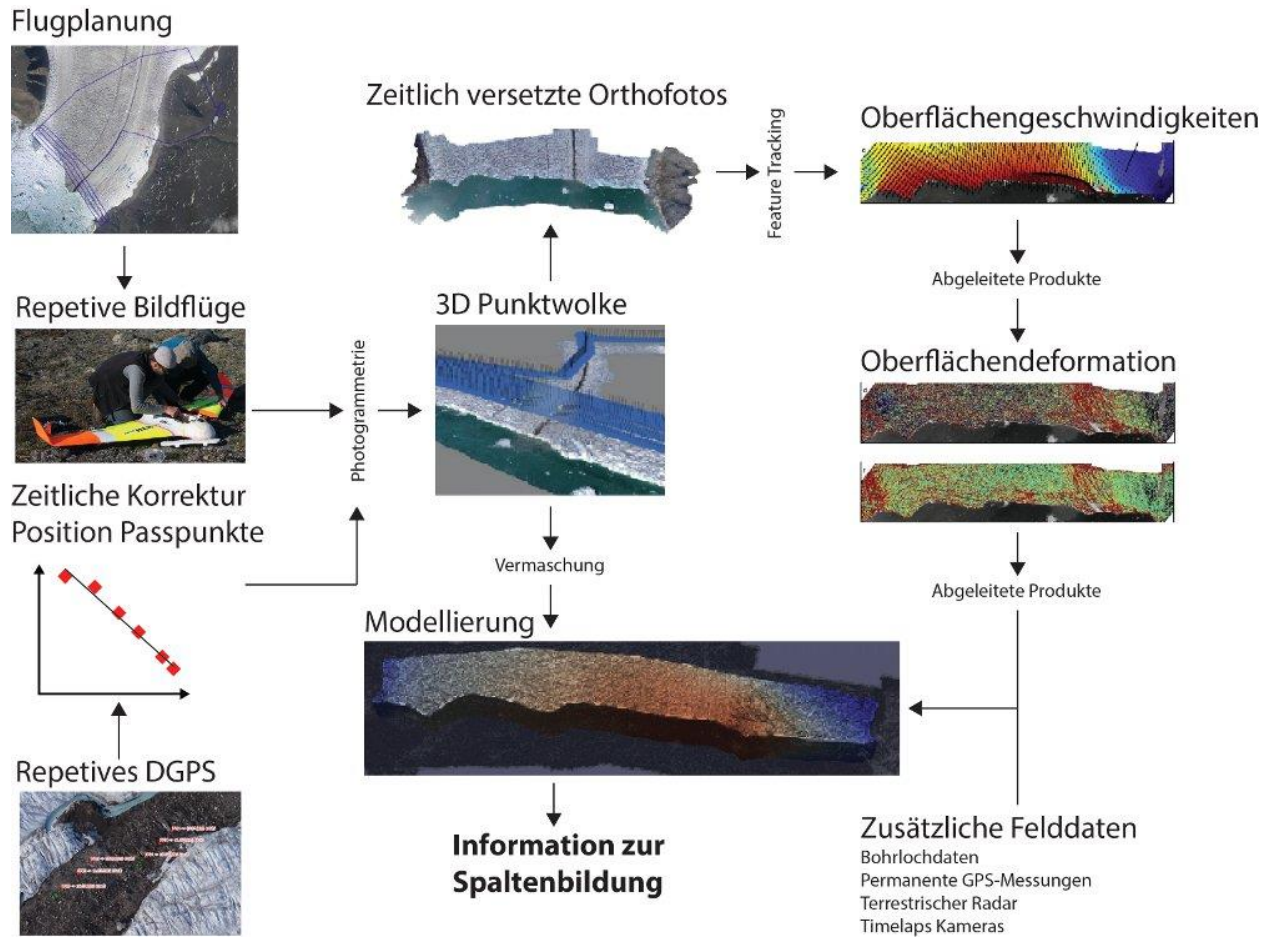


Abbildung 2: Detaillierter Datenfluss und Abhängigkeiten zwischen den Luftbildflügen, der Photogrammetrie und den daraus folgenden Analysen und Modellen.

Die in Abbildung 2 dargestellten Daten- und Informationsflüssen lassen sehr detaillierte Rückschlüsse auf das Verhalten der Kalbungsfrent eines Meeressgletschers zu und trägt wesentlich zum Schliessen der noch bestehenden Wissenslücken bei.

### Konzeption und Bau des Nurflüglers Skywalker X8

Um den erforderlichen Detaillierungsgrad der photogrammetrischen Primärdaten (Oberflächenmodell und Orthophotos) und eine genügend grosse Ausdehnung der Daten zu garantieren, wurde eigens eine Luftbilddrone entwickelt. Die Wahl und das Design der Drohne richtete sich nach den folgenden Anforderungen:

- Es müssen Flüge mit einer Distanz von mehr als 50 Kilometer autonom und ausserhalb von Sichtverbindung durchgeführt werden.
- Eine Flughöhe von 500 Meter über Grund muss erreicht werden können.
- Eine Nutzlast von mehr als 500 Gramm muss möglich sein.
- Die Plattform muss unter den arktischen Konditionen funktionieren und einfach zu reparieren sein.
- Der Autopilot und seine Konfiguration muss offen, dokumentiert und zugänglich sein um Anpassungen an das spezielle Umfeld vorzunehmen zu können.

Basierend auf den Erfahrungen von Ryan et al. (2015) fiel die Wahl ebenfalls auf den kommerziell im Modellflugbau erhältliche Nurflügler Skywalker X8. Es handelt sich dabei um ein Styropor-Modell mit einer Spannweite von rund 2.1 Meter und einer sehr grosszügig dimensionierten Ladebucht. In Zusammenarbeit mit der Firma eFlight wurden Motor und Batterien so berechnet, dass die definierten Flugeigenschaften erfüllt werden können. Die grosse Spannweite erlaubt eine grosse Nutzlast. Mit der angestrebten Flugeschwindigkeit von etwa 15 bis 20 Meter pro Sekunde und dem Gesamtgewicht von etwa 5 Kilogramm sollte auch bei Wind eine stabile Flugeigenschaft garantiert werden können.

Für die gesamte Flugsteuerung wurde der Autopilot Pixhawk der Firma 3DR verwendet. Der Pixhawk wurde wesentlich in der Computer Vision and Geometry Group der ETH Zürich entwickelt und bietet mit dem PX4-autopilot und dem APM-multiplattform-autopilot zwei Flugkontrollplattformen an, welche als OpenSource-Projekte zu Verfügung stehen. Bei beiden Plattformen sind sämtliche Eigenschaften des Autopiloten zugänglich und parametrisierbar. In unserem Falle fiel die Wahl auf die APM-Plattform in Kombination mit der ebenfalls frei erhältlichen Flugplanungssoftware ArduPilot-MissionPlanner.

Für die weiteren Flug-relevanten Komponenten wurden ausschliesslich hochwertige Einzelteile aus dem Modellbauflug verwendet. Für die Steuerung der Kameras fand eine generische Schnittstelle Verwendung. Der Stratosnapper der Firma LittleSmartThings wird über ein analoges Servo-Signal gesteuert. Die Auslösung des Signals kann über die Flugplanungssoftware programmiert werden und bietet alle nötigen Parameter für einen photogrammetrischen Flug. Der Stratosnapper wandelt das Servo-Signal in ein Kamera-spezifisches Trigger Signal um und steuert die Aufnahmen. Dank der generischen Schnittstelle Stratosnapper können eine Vielzahl von unterschiedlichen Kameratypen verwendet werden, ohne Änderungen vorzunehmen.

Das nachfolgende Schema fasst die technische Konzeption des Skywalkers X8 zusammen.

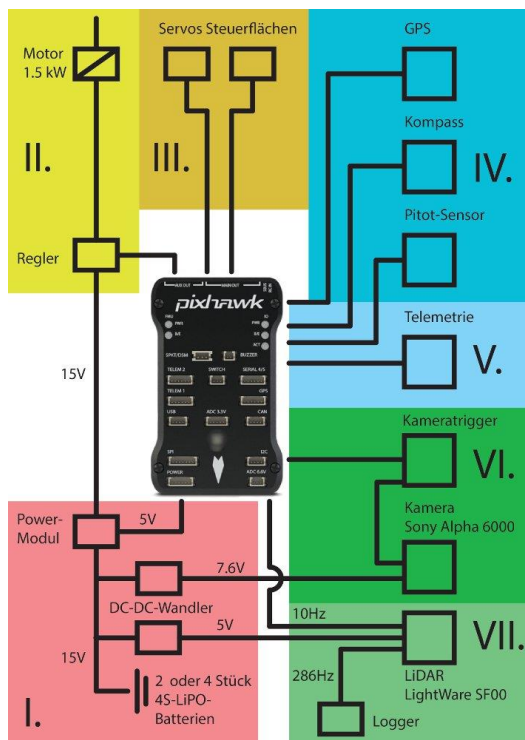




Abbildung 3: Schematischer Aufbau und Konzeption des Skywalkers X8:

- I. Stromversorgung und –verteilung auf Elektronik und Sensorik.
- II. Antrieb.
- III. Betrieb der beiden Steuerflächen links und rechts.
- IV. Navigation mit GPS, Pitot-Sensor und Kompass (Kompass wurde nicht verwendet).
- V. Datenaustausch zur Bodenstation und Datenaustausch.
- VI. Generische Kamerasteuerung.
- VII. Ausbau 2016 mit einem Nadir-blickenden LiDAR.

Neben der Konzeption und Bau der Drone wurde auch sehr viel Aufwand in eine optimale und somit ökonomische Flugeigenschaft der Drone investiert. Neben der Kalibration des Pitot-Sensors für die relative Fluggeschwindigkeit, wurde auch das Flugverhalten mittels den PID- (Proportional-Integral-Derivative controller) Parameter optimiert. Die drei Parameter P, I und D beeinflussen direkt das Verhalten des Autopiloten und sorgen für einen möglichst ruhigen und kontrollierten Flug.

## Expedition 2015

Während der Expedition im Juli 2015 konnten zwei lange Flüge für die Kartierung der gesamten Kalbungsfront durchgeführt werden. Die Abbildung 4 zeigt den detaillierten Flugplan sowie die Lokalität der mit DGPS eingemessenen Passpunkte.

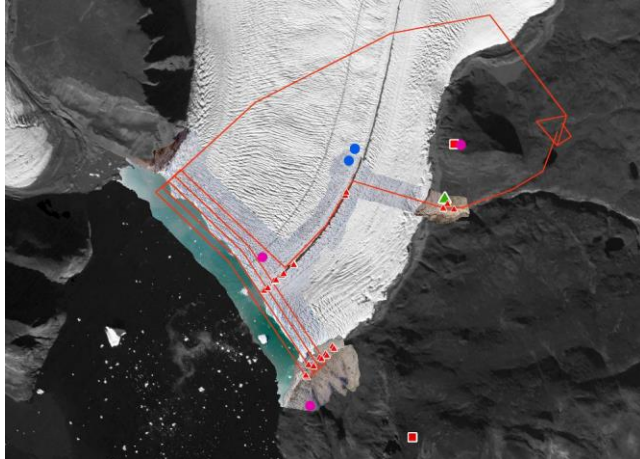


Abbildung 4: Flugplan (rote Linie) der Flüge über die Kalbungsfront und die DGPS Kontrollpunkte (rote Dreiecke).

Zusätzlich die Lokalitäten der Seismik- und Infrasound-Arrays (violette Punkte), der Timelaps-Kameras (rote Vierecke) und das Camp der Expedition 2015 (grünes Dreieck).

Für die Orientierung der Luftbildblöcke wurde eine Vielzahl von Passpunkten basierend auf einer eigenen GPS-Referenzstation eingemessen. Die Passpunkte lassen sich in zwei Gruppen aufteilen: i) Passpunkte auf festem Untergrund am Rande des Gletschers und ii) Passpunkte auf der Mittelmoräne des Gletschers. Bedingt durch die Fließgeschwindigkeit von rund 1.5 Meter pro Tag, mussten die Passpunkte wiederholt eingemessen werden. Um die korrekte Lage der Passpunkte zum Zeitpunkt der Überflüge zu ermitteln, wurden die Messungen in allen drei Richtungen (X, Y, und Z) mit dem Fließverhalten des Gletschers korrigiert. Leider befinden sich alle festen Passpunkte ausschliesslich auf der linken Seite des Gletschers. Die rechte Seite des Gletschers ist kaum zugänglich. Um die berechneten Orthobilder für die weiteren Auswertungen verwenden zu können, mussten diese in einem zweiten Schritt miteinander koregistriert werden.



Abbildung 5: Bilder der Kalbungsfront beim Bildflug vom 11. Juli 2016. Der Gletscher bricht rund 40 Meter senkrecht zum Meer ab und bildet die rund 3 Kilometer lange Front. Ein grosser Süsswasserstrom aus dem Inland entwässert sich unter dem Gletscher und taucht direkt vor der Kalbungsfront auf.

Während der Expedition mussten Wege gefunden werden, um mit den sehr unzuverlässigen Kompassmessungen umgehen zu können. Bedingt durch die Nähe zum magnetischen Nordpol und die damit sehr stark geneigten Feldlinien ist eine übliche Navigation kaum möglich. Über die Konfiguration der Flugelektronik konnte die Navigation prioritär über GPS und die Kenntniss über den zurückgelegten Flugpfad gelöst werden.

### **Vor- und Nachteile eines UAV-Eigenbaus**

Betrachtet man sämtliche Probleme und Herausforderungen, welche im Laufe des Baus und Test der Drone sowie der Anwendung in Grönland zu bewältigen waren, stellt sich die Frage, ob eine kommerziell erhältliche Drone nicht eine bessere Lösung gewesen wäre.

Betrachtet man diese Frage von einem finanziellen Standpunkt aus, sind die sehr tiefen Anschaffungskosten eines Skywalkers X8 und den benötigten Einzelteilen sowie der frei erhältlichen Flugplanungssoftware mit rund CHF 2'500 kaum zu unterbieten. Kritiker werden an dieser Stelle bemängeln, dass die Personalkosten für den Bau und Test nicht einberechnet sind. Diese versteckten Kosten werden aber wieder durch das gewonnene Knowhow kompensiert. Dieses Knowhow ist aber ein zentraler Faktor unter Bedingungen wie in Nordwest Grönland für das Gelingen eines solchen Projektes.

### **Literatur**

Ryan, J. C., a. L. Hubbard, J. E. Box, J. Todd, P. Christoffersen, J. R. Carr, T. O. Holt, and N. Snooke. 2015. "UAV Photogrammetry and Structure from Motion to Assess Calving Dynamics at Store Glacier, a Large Outlet Draining the Greenland Ice Sheet." *The Cryosphere* 9 (1): 1–11. doi:10.5194/tc-9-1-2015.