

Endbericht, inkl. Zwischenbericht für den Zeitraum Okt. 2019 bis Oktober 2020
“Readiness of ICOS for Necessities of integrated Global Observations (RINGO)”

Antragsteller/in: Prof. Dr. Nina Buchmann, ETH Zürich; Dr. Lukas Emmenegger, Empa; Prof. Dr. Markus Leuenberger, Uni Bern

Dieser Bericht umfasst den Zwischenbericht für das letzte Jahr (Okt. 2019 – Okt. 2020) sowie den Endbericht. Wir konnten in den drei Arbeitspaketen grosse Fortschritte erzielen, die auch auf europäischer Ebene in die Arbeit in ICOS RI und RINGO eingeflossen sind.

AP1: Entwicklung einer optimalen Strategie für eine regelmässige Entnahme von diskreten Luftproben zur anschliessenden Messung von stabilen Isotopen im CO₂ und CH₄ in einem zentralen Labor und Aufarbeitung, Qualitätsprüfung und Dokumentation von Langzeit-Messreihen, die vor ICOS RI erhoben wurden (z.B. die Isotopen-Messungen in CO₂ vom Jungfrauoch). Damit soll mit einer minimalen Anzahl Proben die bestmögliche räumliche Zuweisung von Quellen und Senken erreicht werden (RINGO Task 1.3 und Task 4.2 → Empa).

Arbeitsfortschritt

Die auf dem Jungfrauoch im Jahr 2008 begonnenen, kontinuierlichen Messungen der CO₂ Konzentration und der stabilen CO₂-Isotope ($\delta^{13}\text{C}$ und $\delta^{18}\text{O}$) mittels Quantenkaskadenlaser-Absorptionsspektroskopie (QCLAS) wurden weitergeführt. Um die Messdaten zu interpretieren, wurden atmosphärische Simulationen der CO₂ Konzentration mit zwei Modellen durchgeführt, STILT-ECMWF (ICOS Carbon Portal), und FLEXPART-COSMO (Empa), siehe Abb. 1.

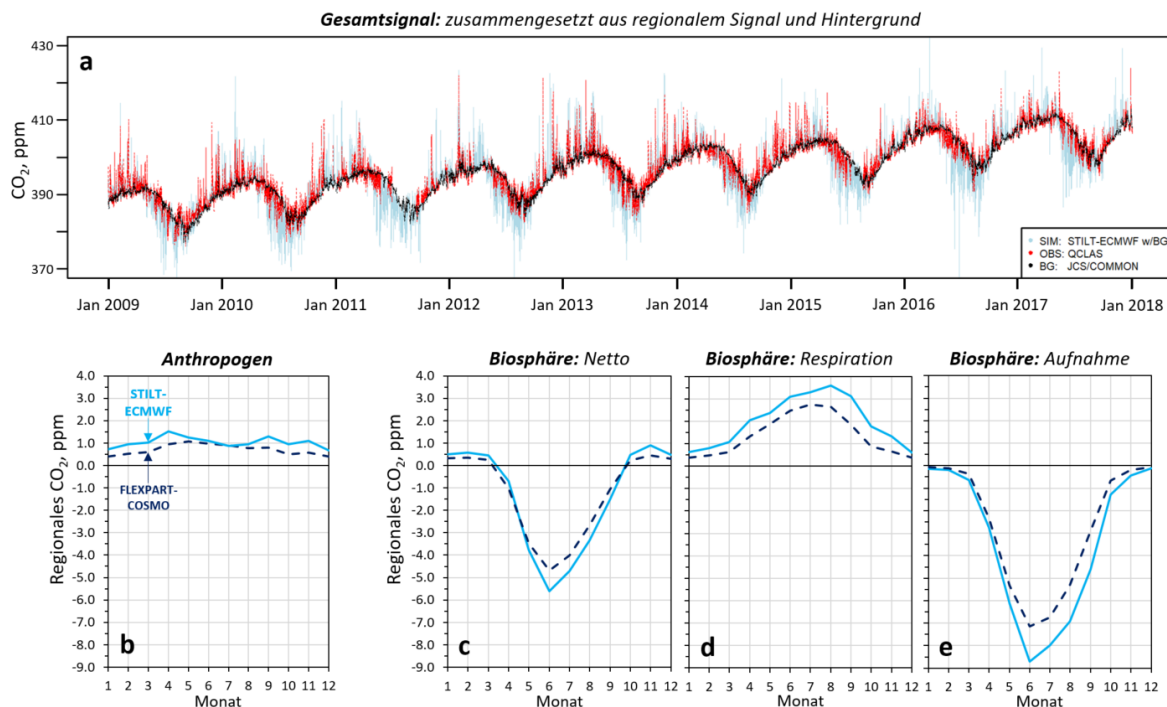


Abb. 1: CO₂ Konzentrationen und CO₂-Beiträge am Jungfrauoch. a) Zeitreihen der Messdaten des QCLAS (OBS), der CO₂ Simulation mit STILT-ECMWF (SIM) und des CO₂-Hintergrunds (BG) gemäss Jena Carboscope (JCS) Simulation, **b-e)** simulierte CO₂ Beiträge von anthropogenen Aktivitäten und biosphärischen Prozessen. Gezeigt sind mittlere monatliche Simulationsergebnisse für 9 Jahre mit STILT-ECMWF und FLEXPART-COSMO für folgende Komponenten: **b)** Anthropogenes CO₂ in ppm, **c)** Netto CO₂ aus Biosphärischen Prozessen, zusammengesetzt aus **d)** Biosphären Respiration und **e)** Biosphären Aufnahme.

Abb. 1a zeigt die gute Übereinstimmung der CO₂ Konzentration aus Messungen und Simulation am Jungfraujoch, insbesondere im Herbst, Winter und Frühjahr. Grösste Abweichungen zwischen Messungen und Simulationen sind in den Sommermonaten zu beobachten. Dies weist darauf hin, dass die biosphärische Aufnahme im Sommer von den Modellen überschätzt wird. Das regionale CO₂-Signal, das am Jungfraujoch beobachtet werden kann, ist laut der Simulationsergebnisse vor allem durch die biosphärischen Komponenten dominiert: während das Jahresmaximum des biosphärischen Netto-signals bis zu -6 ppm CO₂ beträgt (Abb. 1c), erreicht das anthropogene Signal maximal 1.6 ppm (Abb. 1b). Die biosphärischen Signale zeigen ausgeprägte Jahresgänge, die durch die Pflanzenaktivität in der Umgebung getrieben werden. Trotz der höheren anthropogenen Emissionen im Winter ist in dieser Jahreszeit der anthropogene Beitrag am Jungfraujoch am geringsten. Dies ist durch den reduzierten Transport von Luftmassen aus der planetaren Grenzschicht auf das Jungfraujoch im Winter zu erklären. Konvektion von Luftmassen aus der Grenzschicht zum Jungfraujoch ist am häufigsten im Sommer, maximale anthropogene Beiträge sind jedoch im Frühjahr am stärksten, wenn die bereits starke Sonneneinstrahlung konvektiven Transport fördert und noch erhöhte Emissionen in den Tälern (z.B. von Heizungen) auftreten. Unterschiede zwischen den beiden Modellen (Abb. 1b-e) sind in erster Linie auf die verschiedenen der Modellierung zu Grunde liegenden meteorologischen Daten und auf die räumliche Auflösung zurückzuführen. Einen Einfluss haben auch die Unterschiede in den verwendeten Domain-Grenzen der Modelle, wobei die FLEXPART-COSMO-Domain wesentlich kleiner und auf Westeuropa beschränkt ist, während die STILT-ECMWF Domain eine grössere Fläche Europas abbildet.

Erreichte Meilensteine

Februar 2020:	Vortrag, VAO Virtual Alpine Observatory 2020.
April 2020:	Vortrag, EGU General Assembly 2020.
Mai-Juni 2020:	CO ₂ -VPRM Analyse in Zusammenarbeit mit ICOS Carbon Portal; JFJ Transport Dynamics Tracer Test in Zusammenarbeit mit ICOS Carbon Portal
Juli 2020:	Finales CO ₂ -VPRM (v3 und v2020), und Aktualisierung aller Simulationen in Zusammenarbeit mit ICOS Carbon Portal
August 2020:	Zusammenfassung der Ergebnisse und Erkenntnisse des "Tracer Test" Zusammenfassung der Ergebnisse und Erkenntnisse der "CO ₂ -VPRM Updates" Vortrag, Swiss Chemical Society Fall Meeting 2020
September 2020:	Vortrag, ICOS Science Conference 2020 Interpretation der Zusammensetzung der finalen CO ₂ Simulationen und Bewertung in Hinblick auf optimale Probenahmestrategie Aktualisierung der δ ¹³ C-CO ₂ Simulationen mit den neuen CO ₂ Simulationen
Oktober 2020:	Manuskript zu CO ₂ und δ ¹³ C-CO ₂ Messungen und Simulationen am JFJ

Fazit

CO₂ regionalen Ursprungs am Jungfraujoch ist zu einem grossen Anteil durch biosphärische Prozesse dominiert. Die beste Übereinstimmung von CO₂-Simulation und Messungen ist im Herbst, Winter und Frühjahr gegeben. Dann ist Jungfraujoch am wenigsten von photosynthetischer Aufnahme beeinflusst, aber die Transportdynamik lässt Beobachtungen von regionalen CO₂-Events am JFJ zu, die sowohl anthropogene Komponenten als auch das Signal der biosphärischen Respiration enthalten. Diese Information soll in zukünftigen Probenahmestrategien für diskrete Proben berücksichtigt werden. Weitere Informationen können durch zusätzliche Radiocarbon (¹⁴C)-Messungen gewonnen werden, da fossile Brennstoffe auf Grund des Alterns kein ¹⁴C mehr enthalten, und ein Beitrag durch die

Verbrennung dieser Brennstoffe zu einer Abreicherung des ^{14}C -Signals in der Atmosphäre führt. Probennahme und ^{14}C -Analyse werden in der Zukunft im Rahmen von ICOS intensiviert.

AP2: Evaluation der AirCore-Technologie zur Bestimmung von atmosphärischen Vertikalprofilen. AirCores können eventuell die Lücke schliessen zwischen Messungen am Boden und jenen im Flugzeug oder von Satelliten (RINGO Task 3.1 → Uni Bern).

Arbeitsfortschritt

Wir haben in diesem Jahr weitergehende Tests mit dem Laborsetup durchgeführt und die Methodik der CO-Markierung verbessert. Das Problem des Gefrierens des Ventil (Jahresbericht 2019) ist mit einer einfachen Heizung gelöst worden. Die Abbildung 2 zeigt die verschiedenen Komponenten des Laboraufbaus, wie Gaszuführung, Druckregelung (PC1-PC3), Dämpfungsvolumen, welches hauptsächlich als Mimik des AirCore-Volumens dient, Differenzdruck-Aufnehmer (DPS), um die Strömung des AirCores zu charakterisieren, Detektoren und Flussmessgerät. Essentiell waren neben dem CO Injektionsventil auch die Druckregler, um das vorgegebene Druckprofil einzuhalten, und die Puffervolumina.

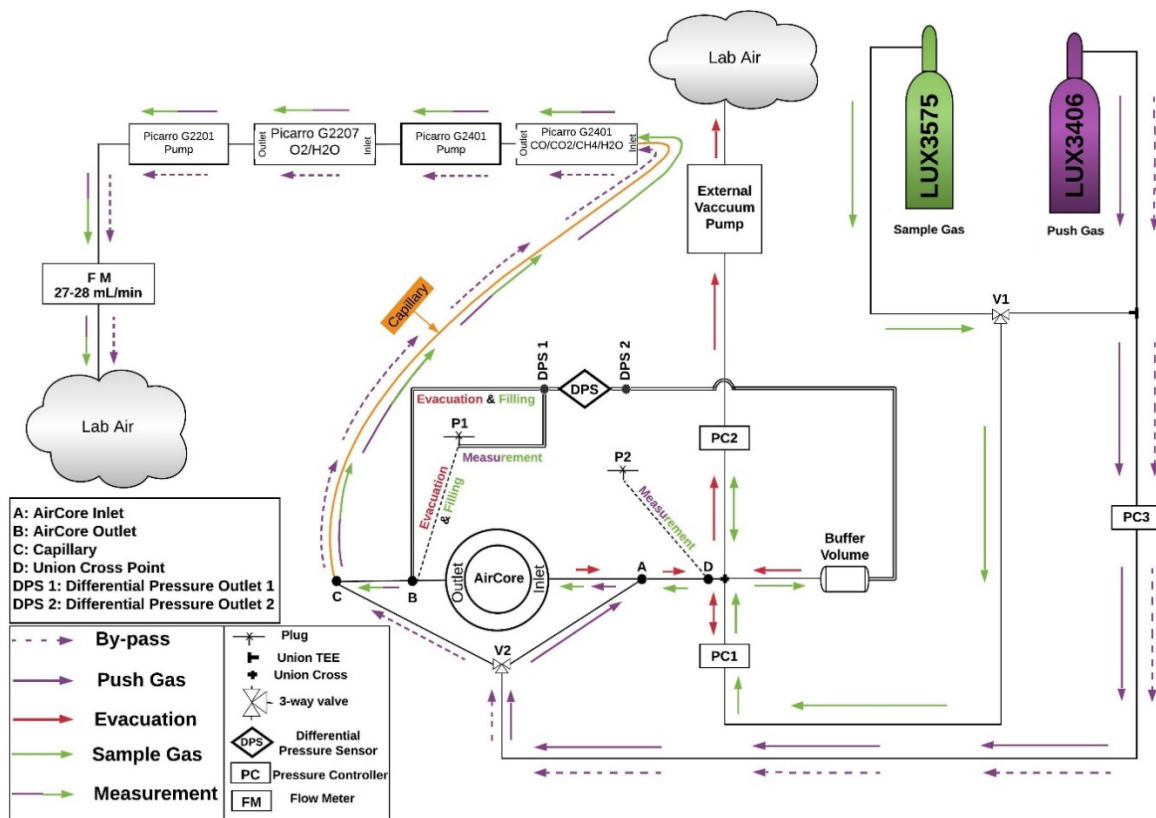


Abb. 2: Schema des Laboraufbaus zur Mimik des AirCore-Fluges mit CO Markierung. Dieses Setup erlaubt (i) das Evakuieren (Aufstieg) als auch das Befüllen des AirCores (Sinkflug) mit Proben-Luft von einem Gasdruckbehälter (LUX3575); (ii) die Bestimmung der geprobten Luft wird mittels einem Pushgas (LUX3406) durch das AirCore zu den Detektoren geführt, wo die Konzentrationen von CO_2 , CO , CH_4 , H_2O und O_2 bestimmt wurden.

Die Komponenten des AirCores (Abb. 3) waren während diesen Test zum grossen Teil inaktiv, da diese die Umgebungs-Parameter aufzeichnen, was im Labor keinen grossen Sinn ergibt. Allerdings waren die

fünf Temperaturaufnehmer im AirCore aktiv und gaben uns Informationen über die Wärmeverteilung unter Laborbedingungen.

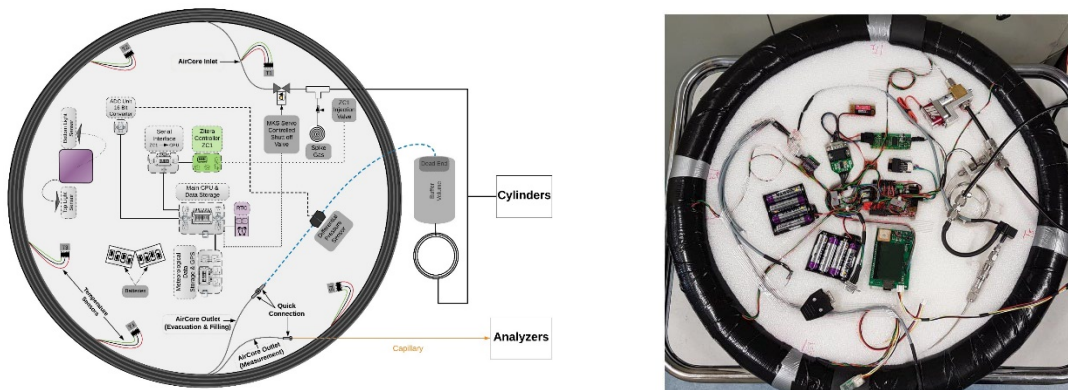


Abb. 3: Schema des AirCores. Einzelne Komponenten (links), AirCore und dessen Komponenten in Realität (rechts).

Alle Komponenten wurden auf ihr Gewicht geprüft und optimiert, da das AirCore in Zentraleuropa nicht über 3 kg wiegen darf (Flug-Reglemente). Dies bedeutete einen grossen Evaluations- und Integrations-Aufwand. Das Injektionsventil als auch der Differenzdruck-Aufnehmer sind sehr kleine und leichte Teile, wie in Abb. 4 dargestellt.

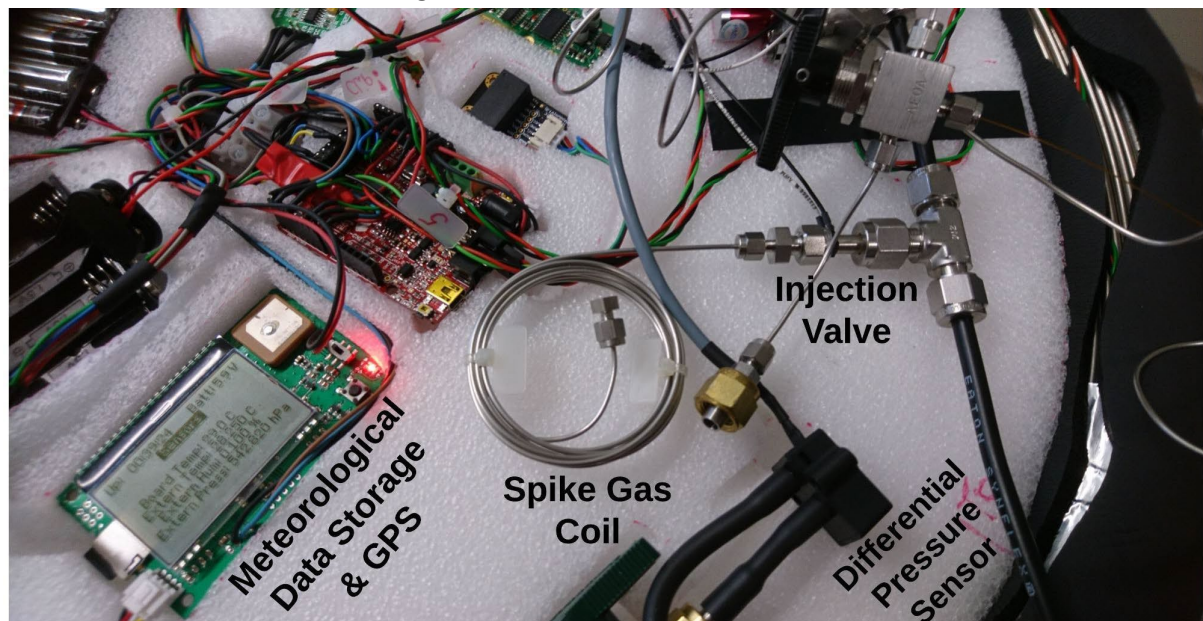


Abb. 4: Verschiedene Komponenten des AirCore mit Injektionsventil und Schlaufe für das Markierungsgas sowie Differenzdruckaufnehmer und der Einheit für Meteodaten-Erfassung und Datenspeicherung.

Wir haben viele verschiedene Tests mit Markierungen durchgeführt. Abbildung 5 zeigt die CO Konzentration in ppb einer dieser Tests als Funktion der Zeit (oben), des Drucks (Mitte) und der Höhe (unten). Wir konnten leider keine weiteren Kampagnen durchführen, auch wegen Covid-19. Jedoch haben wir zusätzlich zu den Labortests eine gemeinsame Auswertung bestimmter Vertikal-Profile durchgeführt, welche während der Trainou Kampagne erhoben wurden. Alle Daten wurden mit demselben Code (in Python) ausgewertet, welcher von der National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA, USA) erstellt wurde.

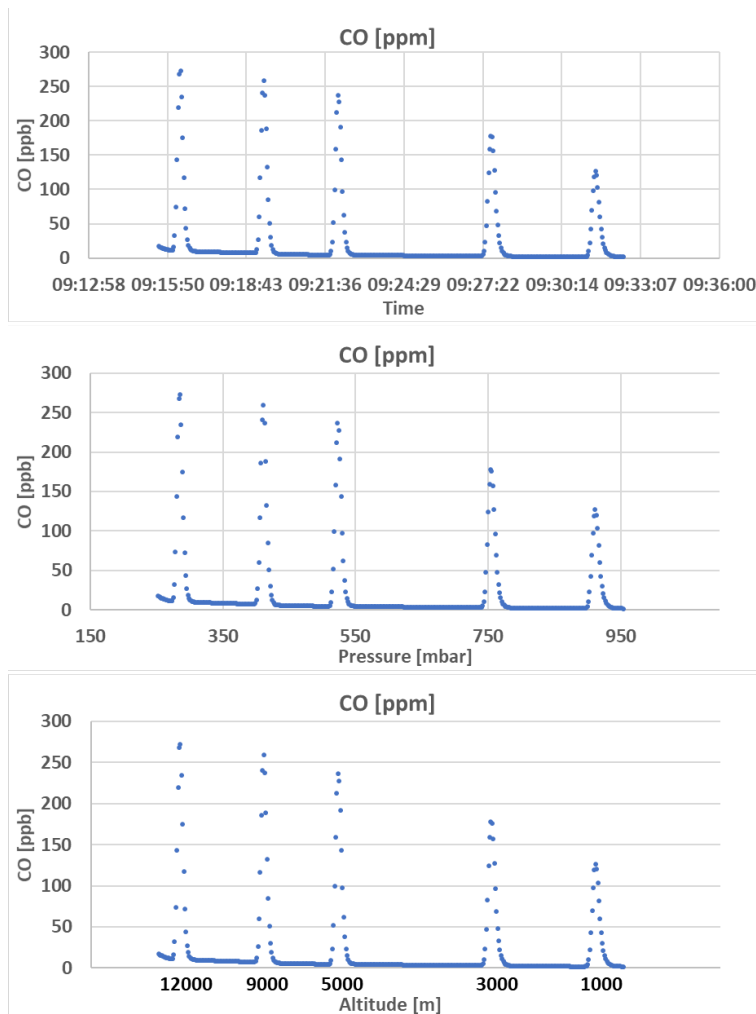


Abb. 5: Markierungs-Tests mittels CO im Labor-Experiment. CO Konzentration in ppb gegen die Zeit (oben), den simulierten Atmosphären-Druck (Mitte) und gegen die Höhe in Meter (unten).

Die Resultate zeigen eine sehr gute Übereinstimmung der Methan-Konzentrationen in der Troposphäre (Abb. 6), jedoch Abweichungen oberhalb der Tropopause. Ein ähnliches Bild zeigen die Profile für CO₂ und CO für die Troposphäre. Die hellblauen Kurven, welche die Daten der Universität Frankfurt wiedergeben, zeigen auf bestimmten Höhen deutliche Abweichungen in der CO Konzentration auf. Dies sind Höhen-Markierungssignale. Man erkennt eine Beeinflussung des CO₂ Signals, welches vermutlich auf eine Verdünnung durch das zusätzlich hinzugefügte CO zurückzuführen ist. Ebenso scheint auch das CO im Allgemeinen zu leicht höheren Werten verschoben zu sein bei den GUF Daten. Die Werte für alle Parameter sind in der Stratosphäre dann deutlich uneinheitlicher. Die Daten der unterschiedlichen AirCores wurden aufgrund ihrer Charakteristiken bis auf verschiedene Höhen ausgewertet. Hier ist noch Handlungsbedarf, um die Beeinflussung des Pushgases auf das Probegas besser zu quantifizieren.

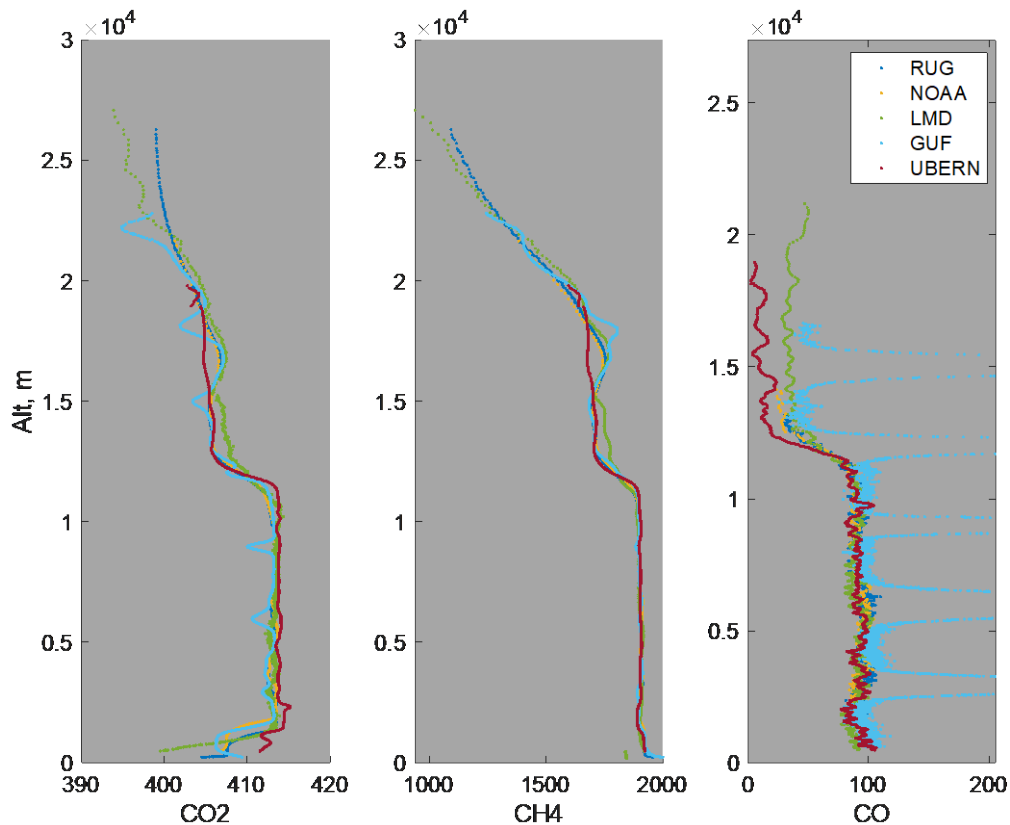


Abb. 6: Vergleich der CO₂, CH₄ and CO AirCore Daten von fünf verschiedenen Institutionen. Universität Groningen, Niederlande (RUG), National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), Laboratoire de Météorologie Dynamique, France (LMD), Universität Frankfurt am Main, Deutschland (GUF) und Universität Bern (UBERN). Zu bemerken ist, dass der Vergleich für Profile vom 17. Juni 2019 gilt ausser für die Universität Bern, hier ist das Profil vom 16. Juni 2019, da am Vortag kein Flug stattfand.

Erreichte Meilensteine

2018/2020: Auswertung der Markierungstests der Labormessungen

2019/2020: Kalibration der Trainou (Frankreich) Daten der AirCore Kampagne-

2019/2020: Auswertung der Trainou Daten der AirCore Kampagne mittels NOAA Python code

Fazit

Die beiden Kampagnen in Sodankylä (Finnland) und Trainou (Frankreich) haben gezeigt, dass ein kritischer Punkt die Höhenzuordnung der gemessenen Konzentrationen darstellt. Dies trifft im besonderem Masse für Stratosphärenluft (grosse Höhe, tiefer Druck) zu, welche nur einen kleinen Teil (< 10 %) der gesammelten Luft darstellt. Zudem fällt das Aircore in der ersten Phase im freien Fall über einige Kilometer hinweg, bis sich der Fallschirm vollständig geöffnet hat und die Bremsung einsetzt. Danach fällt das AirCore mit ca. 4-8 m/s. Aufgrund unserer Messungen (Labor) als auch derjenigen der Universität Frankfurt (in-situ) können wir sagen, dass die Methodik funktioniert. Es wurde zudem gezeigt, dass die Auswertung der Daten immer noch Probleme ergibt. Eine Auswertung der Daten verschiedener AirCore-Vertikalprofile mit demselben Code (NOAA) lieferte erste Hinweise, wie die Unterschiede zu erklären sind. Weitere Arbeiten sind jedoch unabdingbar.

AP3: Operationalisierung von Eddy-Kovarianzmessungen von CH₄ und N₂O auf Ökosystemebene. Dies beinhaltet die Qualitätskontrolle der Messung, aber auch die Datenauswertung dieser höchst dynamischen Flüsse (RINGO Task 3.4 → ETH Zürich).

Arbeitsfortschritt

Am Standort Davos wurden CH₄- und N₂O-Flüsse bereits mehrere Jahre lang (Nov. 2015 bis Mär 2018, Aug 2019 bis heute) erfolgreich mit der Eddy-Kovarianz-Methode gemessen. Die aus RINGO gewonnenen Erfahrungen erlaubten es uns, die Messungen 2020 fortzuführen und weiter zu verbessern. Der daraus entstandene Datensatz ist aufgrund seiner Einmaligkeit für Waldökosysteme von hohem wissenschaftlichem Wert. Mit Hilfe der Flussdaten konnte bereits abgeschätzt werden, welchen Einfluss CH₄ und N₂O auf die Klimabilanz des Nadelwaldes haben. Die Flussdaten werden seit 2019 offen und ohne Einschränkungen mit der wissenschaftlichen Community via FLUXNET (<https://fluxnet.fluxdata.org>) geteilt.

Die im Jahr 2018 gestartete Sammlung weltweit verfügbarer CH₄- und N₂O-Flussdaten wurde 2020 fortgeführt. Mit Stand September 2020 wurden insgesamt 26 Messstation identifiziert, die Eddy-Kovarianz-Flussdaten für alle drei Gase CO₂, CH₄ und N₂O zur Verfügung stellen können. Ähnlich wie Davos haben viele dieser Messstationen 2018 und 2019 begonnen, ihre berechneten Flüsse mit der Community zu teilen. Die Besonderheit dieser Datensammlung ist nicht nur die Einzigartigkeit der Flussdaten, sondern auch wie die Daten geteilt werden, nämlich unter der Lizenz CC BY 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), mit welcher auch kommerzielle Nutzung erlaubt ist.

Zusätzlich zu diesen berechneten Flussprodukten wurde zudem die Sammlung von hochaufgelösten Rohdaten (20Hz) von diesen Stationen, die 2018 gestartet wurde, weitergeführt. Der eigens aufgrund des hohen Datenvolumens an der ETH Zürich eingerichtete Server ist für die Community zugänglich und erlaubt den Austausch von ansonsten schwer zugänglichen Rohdatensätzen. Neben den Gruppen, die selbst Rohdaten beisteuern, hat seit Oktober 2019 auch das ICOS Ecosystem Thematic Centre (ETC) Zugriff auf alle gesammelten Rohdaten. Das ICOS ETC verwendet die Daten, um in Zusammenarbeit verschiedene Ansätze zur Generierung von qualitativ hochwertigen Flussprodukten zu testen. Mit den Rohdaten werden unter anderem die zuvor definierten neun Fragestellungen untersucht, um eine korrekte Berechnung des Ökosystem-Austauschs von CH₄ und N₂O durchführen zu können:

- Hoch-frequente Daten: (1) Synchronization, (2) Time-lag estimation, (3) Random uncertainty, (4) Detrending and spectral correction, (5) H₂O pressure line broadening;
- Hoch-frequente und/oder halbstündliche Daten: (6) Despiking, (7) u* filtering, (8) gap-filling, (9) uncertainty estimation.

Um diese Fragestellungen (v.a. 7 und 8) bearbeiten zu können, wurde 2019 und 2020 die Entwicklung der neuartigen Fluss-Analyse-App «AMP» intensiviert (Abb. 7). «AMP» erlaubt das schnelle Testen verschiedener Hypothesen in einer benutzerfreundlichen Programmoberfläche. «AMP» ist so konzipiert, dass Tests für die Fragestellungen (7) und (8) schnell und vollständig reproduzierbar durchgeführt werden konnten. Obwohl «AMP» mit Hinblick auf die in RINGO nötigen Tests programmiert wurde, können die in der Anwendung berücksichtigten Methoden (z.B. gap-filling, Ausreisser-Entfernung) mit jeder Art von Zeitreihendaten genutzt werden. Die Anwendung wird daher auch für alle Interessierten ausserhalb von RINGO frei zugänglich unter einer open source Lizenz veröffentlicht werden.

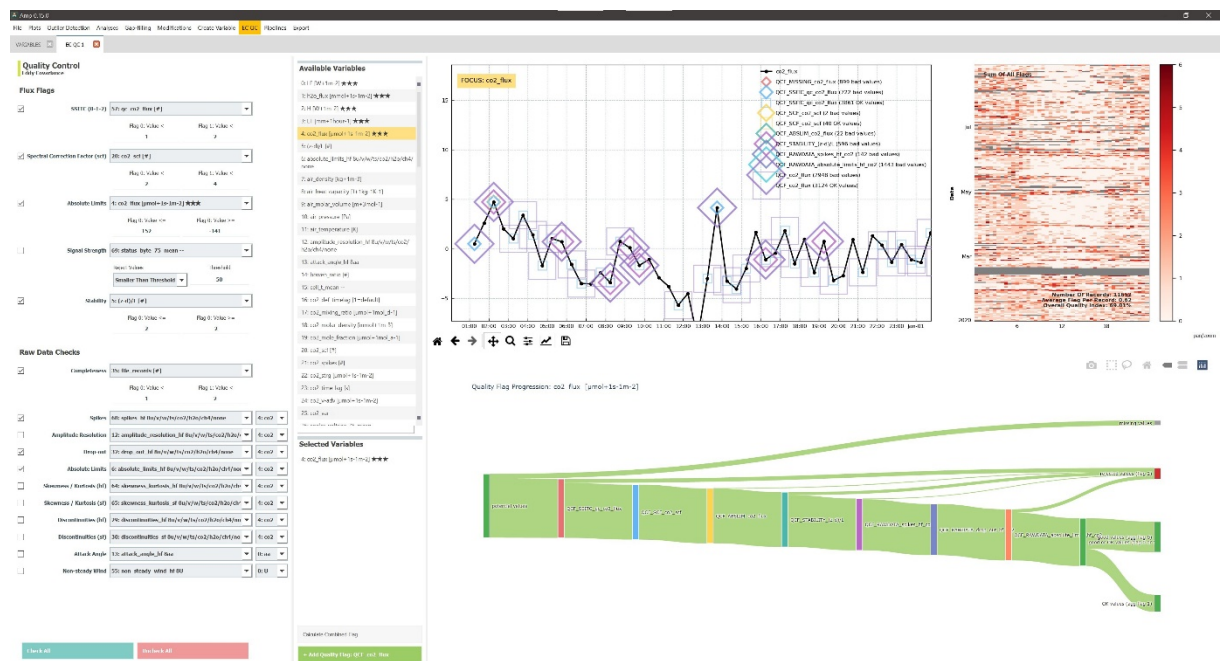


Abb. 7: Eddy-Kovarianz Qualitätschecks in AMP v0.16.0 (September 2020)

Basierend auf den in RINGO durchgeführten Arbeiten wurde zudem das Python package «DYCO» programmiert. Der Quellcode wurde im Juli 2020 offen zugänglich unter einer open source Lizenz (GNU GPLv3) publiziert (<https://gitlab.ethz.ch/holukas/dyco-dynamic-lag-compensation>) und zusätzlich an das «Journal of Open Source Software» (<https://joss.theoj.org>) zur Publikation eingereicht. «DYCO» erleichtert die Berechnung und Interpretation von Eddy-Kovarianz CH_4 - und N_2O -Flüssen. Das Tool basiert auf Erfahrungen aus dem offenen Austausch mit der Community, unter Einbeziehung der Publikation "Standardisation of eddy-covariance flux measurements of methane and nitrous oxide" von Nemitz et al. (2018), welche 2018 unter Mitwirkung der ETH Zürich in der Zeitschrift *International Agrophysics* publiziert wurde (<https://doi.org/10.1515/intag-2017-0042>). Die Veröffentlichung dieser Publikation war eine wichtige Grundlage für die weitere Forschung innerhalb von RINGO Task 3.4.

Erreichte Meilensteine

- März 2019: Task 3.4 Treffen am Ringo Annual Scientific Meeting in Southampton, UK. Diskussion über den derzeitigen non- CO_2 Wissensstand, das weitere Vorgehen und die Datensammlung.
- 2020: Fortführung der Tests zu den Fragestellungen (7) und (8), Entwicklung neuer Testverfahren basierend auf den gewonnen Erfahrungen und dem Austausch mit der Community
- März 2020: Task 3.4 Treffen in Poznan, Polen
- Sommer 2020: Zusammenstellen der Ergebnisse für den RINGO Report Task 3.4
- Jul. 2020: «DYCO» Quellcode wird unter der open source Lizenz GNU GPLv3 veröffentlicht (<https://gitlab.ethz.ch/holukas/dyco-dynamic-lag-compensation>).
- Sep. 2020: Release der zum derzeitigen Zeitpunkt aktuellsten «AMP» Version 0.16.0, die Entwicklung wird weiter vorangetrieben.

Fazit

Im Rahmen von RINGO Task 3.4 konnten grundlegende Fragestellungen untersucht und beantwortet werden. Die wesentlichen Ergebnisse sind:

- (1) Die derzeitige Anwendungsmethode der u^* Filterung für N_2O - und CH_4 -Flüsse (Fragestellung 7, Abb. 8) kann zu einer potentiellen Falscheinschätzung der jeweiligen Jahresbilanz führen. Aufgrund der Ergebnisse der durchgeführten Tests konnten wir Empfehlungen aussprechen, um Falscheinschätzungen zu vermindern oder zu vermeiden.

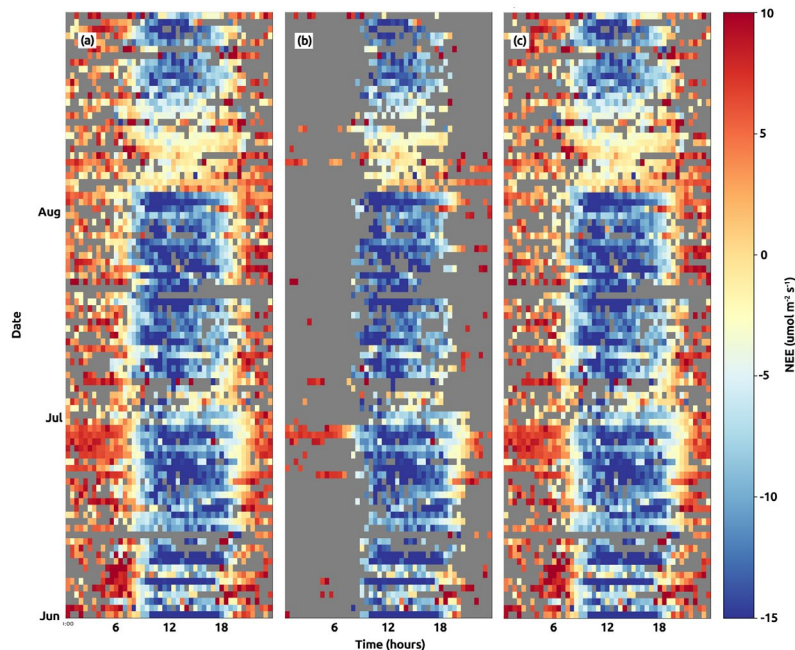


Abb. 8: Datenverfügbarkeit von halb-stündlichen Ökosystemflüssen. (a) ohne u^* Filterung, (b) mit der derzeit angewandten Methode (37% Datenverlust), und (c) mit der innerhalb von RINGO vorgeschlagenen Methode (4% Datenverlust).

- (2) «Random Forest» (RF) wurde als geeignete Methode zur Füllung von Datenlücken (Fragestellung 8, Abb. 9) in non- CO_2 -Messreihen identifiziert und erfolgreich angewendet. Der RF Algorithmus erlaubt die direkte Miteinbeziehung und Kombination von Variablen, die ansonsten nur schwer in statistischen Methoden zur Vorhersage von Zeitreihen kombiniert werden können. Ein für N_2O -Flüsse relevantes Beispiel ist die Kombination der kategorischen Daten «Art des Managements» (z.B. Düngung, Beweidung) mit der numerischen Zeitreihe «Zeit seit letzter Düngerausbringung».

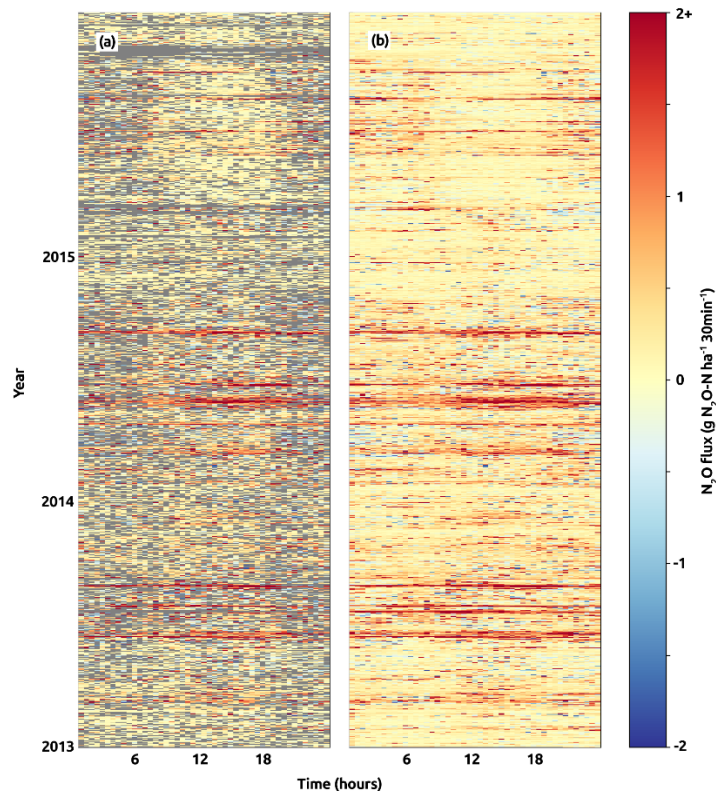


Abb. 9: Lückenfüllen mit der «Random Forest» Methode am Beispiel von 3 Jahren (2013-2015) N₂O-Flüssen, gemessen über der intensiv bewirtschafteten Wiese Chamau. (a) Gemessene Daten nach Qualitätskontrolle, ohne Lückenfüllen. (b) Lückengefüllte Daten nach der Anwendung der «Random Forest» Methode. Als wichtigste Variable wurde «Zeit seit Düngerausbringung» identifiziert.

Die in Punkt (1) und (2) gewonnenen Einblicke verbessern die Genauigkeit der Berechnung von non-CO₂-Jahresbilanzen und ermöglichen dadurch eine präzisere Einschätzung des Einflusses von Ökosystemen und landwirtschaftlicher Betriebe auf das Klima. Die innerhalb von RINGO begonnene Arbeit wird auch in der kommenden Zeit fortgeführt, indem die gewonnenen Erkenntnisse in anstehenden Publikationen weiter aufgearbeitet werden. In Vorbereitung ist das «ICOS Instruction Document» hinsichtlich non-CO₂-Flüssen, das den derzeitigen Wissenstand in Kurzform darlegt und ICOS Stationen Hilfestellung bei Flussmessungen von nicht-CO₂ Gasen leistet.

Zürich, 10.10.2020

Prof. Dr. Nina Buchmann
Hauptantragstellerin