



Jahrbuch 2022

Herausgegeben vom
Vorstand der Marburger Geographischen Gesellschaft e. V.
in Verbindung mit dem Dekanat des Fachbereichs Geographie
der Philipps-Universität Marburg

Sonderdruck

Der Inhalt dieses Sonderdrucks oder Teile davon dürfen nicht ohne die schriftliche Genehmigung der Herausgeber vervielfältigt, in Datenbanken gespeichert oder in irgendeiner Form übertragen werden. Sie dürfen ausschließlich zum persönlichen Gebrauch ausgedruckt oder gespeichert werden.

Marburg/Lahn 2023

Forschungsprojekte am Fachbereich Geographie

CHIFFLARD, PETER; REISS, MARTIN; DITZEL, LUKAS; BOODOO, KYLE & CHRISTINA FASCHING

Erstmalige Quantifizierung des Exports von organischem Kohlenstoff aus isländischen Gletschern

Einleitung

Gletscher sind einzigartige Ökosysteme, die sich, bedingt durch den Klimawandel, grundlegend verändern (HOOD et al. 2015). Die steigenden Temperaturen lassen die Gletscher in allen Teilen der Erde schmelzen, bis sie letztendlich in einigen Jahren verschwunden sein werden. Durch die Gletscherschmelze steigt der Abfluss in den anschließenden gletschergespeisten Bächen an, die dortigen Wassertemperaturen verändern sich und bis dato im Gletscher gespeicherte Stoffe werden freigesetzt. Diese Veränderungen wirken sich auch auf das aquatische Ökosystem des anschließenden Gletscherbaches aus, so dass sich die dortigen Organismen auf die neuen hydrologischen Begebenheiten (Abfluss, Wassertemperatur, Strömungen), aber auch auf die veränderte Stoffzufuhr aus dem Gletscher einstellen müssen. Dabei spielt der organische Kohlenstoff eine wichtige Rolle, da Gletscher neben ihrer Funktion im hydrologischen Kreislauf auch große Bedeutung für den Kohlenstoffkreislauf haben (STUBBINS et al. 2012). Gletscher speichern und wandeln organischen Kohlenstoff um (ANESIO & LAYBOURN-PARRY 2012), der nach seiner Freisetzung den *Lebensraum Gletscherbach* nachhaltig beeinflusst. In Form von freigesetztem Kohlendioxid hat dies auch Auswirkungen auf den globalen Kohlenstoffkreislauf und die zunehmende Klimaveränderung.

Wieviel organischer Kohlenstoff aus den Gletschern aktuell und vor allem zukünftig freigesetzt wird, ist noch weitgehend unklar. Zwar gibt es erste globale Abschätzungen zur Speicherung und zum Export von organischem Kohlenstoff aus Gletschern, doch diese basieren auf wenigen Einzelstudien, in denen isländische Gletscher nicht enthalten sind. Dies ist überraschend, da sich die größte nördliche Eiskappe Europas (Vatnajökull) in Island befindet (BJÖRNSSON et al. 2013) und dies die globalen Abschätzungen sicherlich wesentlich beeinflussen würde. Zudem reagieren die als gemäßigt eingestufteten isländischen Gletscher aufgrund ihrer geografischen Lage zwischen arktischen und gemäßigten Meeren sowie zwischen den kalten Luftmassen der Arktis und den warmen Luftmassen der niedrigeren Breiten besonders empfindlich auf Klimaschwankungen (BRADWELL et al. 2013), so dass eine kurzfristige Freisetzung von organischem Kohlenstoff erwartet werden könnte.

Um diese Forschungslücken zu schließen, sind von der Arbeitsgruppe Chiffard (Boden- und Hydrogeographie) verschiedene Forschungsprojekte in Island initiiert und durchgeführt worden, die sich intensiv mit dieser Fragestellung beschäftigen und

von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) gefördert werden. Erste Voruntersuchungen gab es bereits im Jahr 2016, die in den Jahren 2018 bis 2019, ebenfalls über eine DFG-finanzierte Pilotstudie, intensiviert wurden. Das Ziel dieser Forschungen war, erstmalig den Export von organischem Kohlenstoff aus den isländischen Gletschern zu berechnen, um ihre Bedeutung in globalen Abschätzungen zum Kohlenstoffexport hervorzuheben.

Im Folgenden werden Einblicke in die aktuelle Situation der Vergletscherung Islands gegeben sowie die grundlegenden Fragestellungen zum Export von organischem Kohlenstoff aus den Gletschern näher erläutert.

Vergletscherung Islands

Grundsätzlich bedecken die isländischen Gletscher 11 % der Landesfläche, wobei die Größe der 17 Hauptgletscher zwischen 3 km² (Gljúfurárjökull) und 8.100 km² (Vatnajökull) (BjörNSSON et al. 2013) liegt (Abb. 1 und 2). Angesichts der beträchtlichen Masse der isländischen Gletscher würde ihr vollständiges Abschmelzen zu einem Anstieg des globalen Meeresspiegels um 1 cm führen (JÓHANNESSEN et al. 2013). Gegenwärtig liefern die Gletscher etwa 30 % des gesamten Abflusses in Island (1.500 m³/s

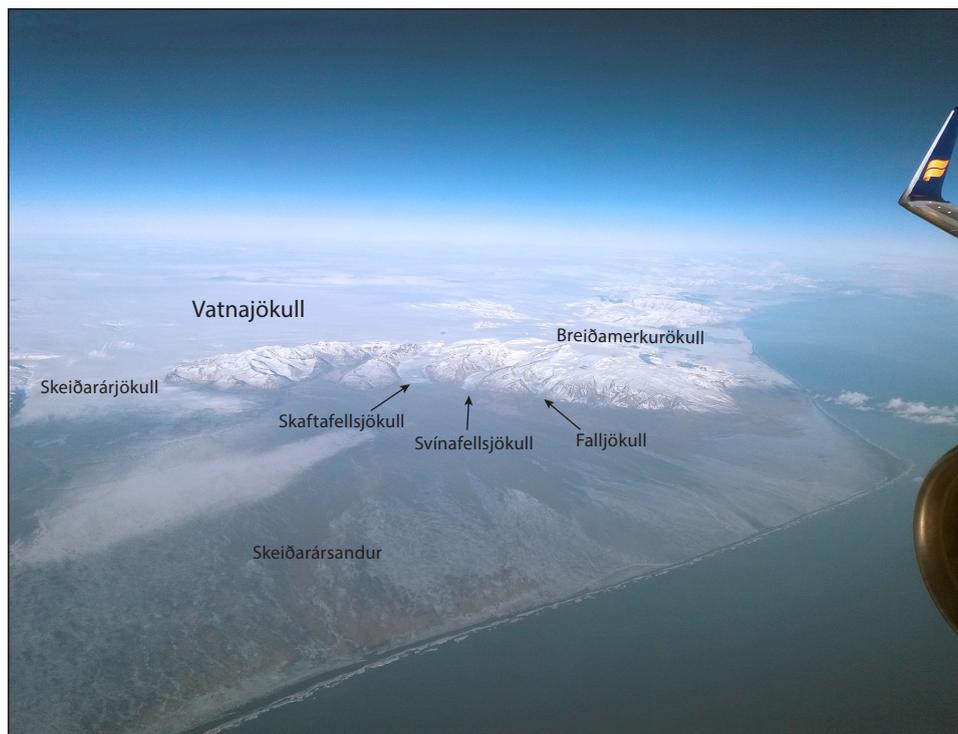


Abb. 1: Blick aus südöstlicher Richtung auf die Eiskappe des Vatnajökull und die südlichen Auslassgletscher sowie den vorgelagerten Skeiðarársandur (Foto: © P. Chiffard)

von 5.000 m³/s) (BJÖRNSSON & PÁLSSON 2008; JÓNSDÓTTIR 2008), was die wichtige Rolle der Gletscher bei der Gestaltung der Hydrologie Islands, aber auch bei der Energiegewinnung durch Wasserkraft unterstreicht. Seit Mitte der 1990er Jahre haben die isländischen Gletscher einen durchschnittlichen jährlichen Massenverlust von $-9,5 \pm 1,5$ Gt/a zu verzeichnen, was einem Flächenverlust von etwa 750 km² seit dem Jahr 2000 oder etwa 40 km² pro Jahr entspricht (AÐALGEIRSDÓTTIR et al. 2020; MAYER et al. 2017). Modellvorhersagen für die künftige Entwicklung der Massenbilanzen deuten auf einen Verlust von 25 % des derzeitigen Volumens für Hofsjökull und Vatnajökull bis zum Jahr 2040 hin (BJÖRNSSON & PÁLSSON 2008; AÐALGEIRSDÓTTIR et al. 2006). Die südlichen Auslassgletscher des Vatnajökull sind besonders anfällig für Erwärmung und Klimawandel (BRADWELL et al. 2013) (Abb. 1).

In Anbetracht dieses schnellen Schmelzprozesses wird erwartet, dass der Schmelzwasserabfluss zunächst ansteigt und um 2030 seinen Höhepunkt erreicht, gefolgt von einem konstanten Rückgang des jährlichen Abflusses in den folgenden 100 Jahren (BLISS et al. 2014). Diese zeitlichen Muster unterscheiden sich stark von denen anderer Gletscher, wie z. B. den kanadischen oder russischen arktischen Gletschern, da Island im klimatisch sensiblen Grenzbereich zwischen polaren und atmosphärischen Zirkulationszellen der mittleren Breiten liegt, wo höhere mittlere Sommerlufttemperaturen prognostiziert werden (BJÖRNSSON et al. 2013). Daher ist der durch den Klimawandel bedingte beschleunigte Rückzug der isländischen Gletscher ein dringendes Problem, da diese raschen Veränderungen den Export von aus Gletschern gewonnenem organischem Kohlenstoff in naher Zukunft erheblich verstärken könnten.

Export von organischem Kohlenstoff aus Gletschern

Herkunft und Zusammensetzung des in Gletschern gespeicherten organischen Kohlenstoffs weisen eine große Vielfalt auf, die mit den spezifischen regionalen Umweltbedingungen (STIBAL et al. 2008; BHATIA et al. 2013) und der mikrobiellen Vielfalt im Gletscher zusammenhängt (LUTZ et al. 2015). In den europäischen Alpen stellten SINGER et al. (2012) fest, dass glaziale organische Kohlenstoffe sehr vielfältig sind und sich durch Peptide oder Lipide aus mikrobiellen Gemeinschaften vor Ort und phenolische Verbindungen aus Pflanzen und Böden auszeichnen. BHATIA et al. (2010) konnten nachweisen, dass die mikrobielle Oxidation von überlagerten Böden und der Vegetation unter dem grönländischen Eisschild Quellen für ligninähnliches Material sind. Zusätzlich zur Kohlenstoffkonzentration bestimmt das stöchiometrische Verhältnis zwischen Kohlenstoff- (C), Stickstoff- (N) und Phosphorkonzentration (P), ob und wie viel gelöster organischer Kohlenstoff (DOC) und Nährstoffe in aquatischen Ökosystemen verarbeitet, zurückgehalten und transportiert werden können (STUTTER et al. 2018). In Island sind der Ursprung und die Zusammensetzung sowie die Konzentration von organischem Kohlenstoff, das von Gletschern freigesetzt wird, bisher noch weitgehend unbekannt.

Methoden

Untersuchungsgebiet und Beprobung

Im Rahmen des DFG-Forschungsprojektes „Export von organischem Kohlenstoff aus Islands Gletschern: Quantifizierung, Herkunft und Kohlenstoffflüsse in Gletscherbächen“ wurden zwischen 2018 und 2019 insgesamt 4 mehrwöchige Geländeaufenthalte in Island zu allen Jahreszeiten durchgeführt. Dabei wurde Eis von mehreren Gletschern auf den isländischen Eiskappen (Vatnajökull, Langjökull, Hofsjökull, Myrdalsjökull und Snæfellsjökull) sowie Schmelzwasser aus den entsprechenden gletschergespeisten Flüssen beprobt (insgesamt: 114 Eisproben, 326 Wasserproben; Abb. 2).

Die Probenahme wurde saisonal (Winter, Frühling, Sommer, Herbst) zwischen Juli 2018 und Mai 2019 durchgeführt, um die jährliche Bandbreite der hydrologischen Bedingungen während der Gletscherschmelze abzudecken. Eine einzelne Eismischprobe wurde einmal pro Standort und Probenahmekampagne entnommen, während Proben des Gletscherschmelzwassers zweimal pro Tag (morgens und nachmittags) an jedem Standort entnommen wurden, um die Auswirkungen der tageszeitlichen Schwankungen des Gletscherabflusses zu erfassen.

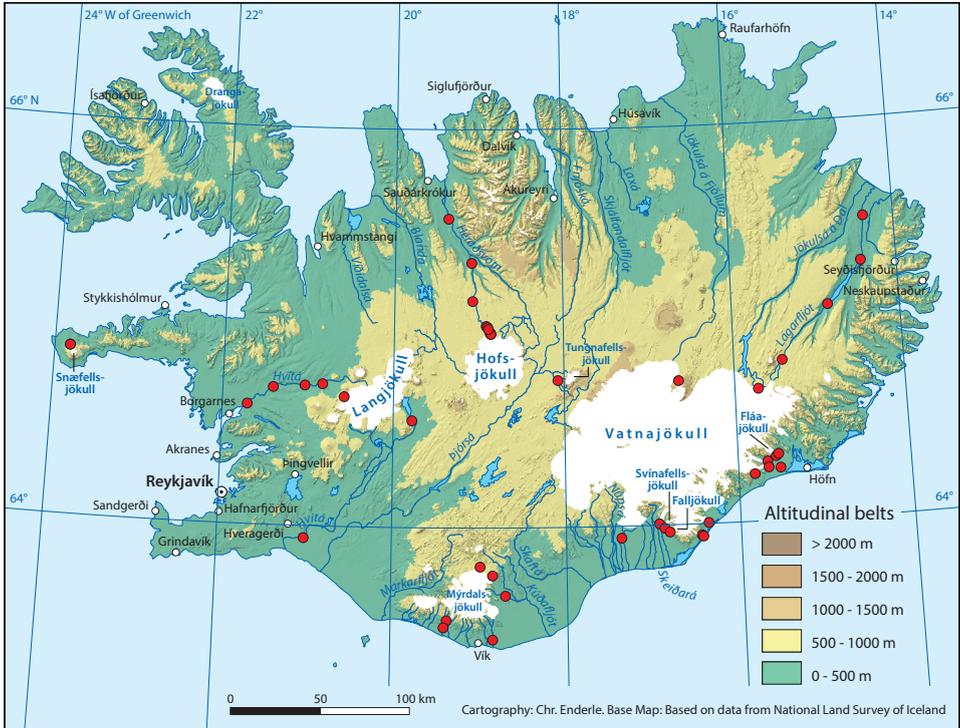


Abb. 2: Topographische Karte von Island mit der Verteilung der Gletscher und der Probenahmestellen (rote Punkte) für die Untersuchung von organischem Kohlenstoff in Gletschern und gletschergespeisten Bächen



Abb. 3: Der Svínafellsjökull mit vorgelagertem Gletschersee (Foto: © P. Chiffard)



Abb. 4: Gletschertor des Falljökull (Foto: © P. Chiffard)

Das Eis wurde an fünf verschiedenen Stellen auf dem Gletscher mit einem Eispickel aus rostfreiem Stahl entnommen, der mit Milli-Q®-Wasser (Millipore, Billerica, U.S.A.) gewaschen, getrocknet und mit einer Propanflamme wärmebehandelt wurde, um mögliche organische Rückstände vor der Probenahme zu entfernen. Die Eisproben wurden in sterile 1-Liter Whirl-Paks®

gefüllt, vor Ort aufgetaut und sofort nach der Entnahme filtriert. Die Wasserproben wurden direkt am Gletschertor entnommen. Der Gletscherrückgang der letzten Jahre hat zur Bildung neuer Eiskontaktseen (SOMMARUGA 2015) zwischen dem Gletscherende und der letzten Endmoräne geführt. Dies war an den Probenahmestellen an den südlich gelegenen Gletschern Myrdalsjökull und Vatnajökull der Fall. Wenn der Gletscherrand nicht zugänglich war, wurden die Wasserproben am Ende des Gletschersees genommen, wo das Schmelzwasser durch die Endmoräne fließt (Abb. 3 und 4).

Probenvorbereitung und Feldparameter

An allen Wasserprobenentnahmestellen wurden die Parameter spezifische elektrische Leitfähigkeit, Wassertemperatur, pH-Wert, Konzentration des gelösten Sauerstoffs, Trübung und Chlorophyll-a-Konzentration mit einem kalibrierten tragbaren Wasserqualitätsmessgerät (EXO2, YSI Inc.) vor Ort gemessen (Abb. 5 und 6). Bachwasser- und Schmelzwasserproben wurden vor Ort für die Laboranalyse vorbereitet. Die Proben für die Analyse der DOC-, POC- und DOM-Zusammensetzung wurden vor Ort durch gemuffelte (450°C) Glasfaserfilter (2x Filter, Whatman GF/F, Porengröße 0,7 µm) fil-



Abb. 5 und 6: Messung verschiedener hydrochemischer und -physikalischer Parameter mit einer Multiparametersonde (EXO2, YSI Inc.) am Fláajökull (oben) und am Gletschertor des Falljökull (unten) (Fotos: © M. Reiss (oben), © P. Chiffard (unten))

triert. Alle GF/F-Filter wurden im Vorfeld bei 65° C getrocknet und anschließend mit Säure behandelt, um anorganischen Kohlenstoff vor der Analyse zu entfernen. Die doppelte Filtration ist eine anerkannte und weit verbreitete Methode (HOOD et al. 2015; SINGER et al. 2012; FASCHING et al. 2016) und stellt sicher, dass die gefilterten Proben nahezu steril sind, was besonders wichtig für Proben ist, die bis zur Analyse gelagert werden müssen, insbesondere in eisigen Umgebungen, in denen die DOC-Konzentrationen niedrig und die Bioverfügbarkeit hoch ist (SINGER et al. 2012). Außerdem gewährleistet diese Methode die Vergleichbarkeit mit früheren Beprobungskampagnen (CHIFFLARD et al. 2019), bei denen dieser Ansatz erfolgreich angewandt wurde. Die gefilterten Wasserproben wurden in 40-ml-gemuffelten Glasfläschchen aufbewahrt und mit teflonbeschichteten Septen verschlossen. Alle Proben wurden in einer Kühlbox aufbewahrt und bis zum Versand und zur Weiterverarbeitung im Labor der Universität Marburg (UMR) bei 4° C im Dunkeln aufbewahrt. Für die Analyse von POC wurden die Filter in Aluminiumfolie eingewickelt und ebenfalls in einer Kühlbox gelagert.

Laboranalysen

Die DOC-Konzentration der gefilterten Proben wurde an der UMR mit einem TOC-Analysator durch Hochtemperaturverbrennung von organischem Material und anschließende thermische Detektion von CO₂ gemessen (TOC-L, Shimadzu, Japan – Nachweisgrenze 4 µg/l). Aufgrund der außergewöhnlich niedrigen DOC-Konzentration in gletschergespeisten Bächen wurden für den gesamten Arbeitsablauf Blindproben mit Milli-Q-Wasser bestimmt. Der POC wurde mit einem C/N-Analysator (vario EL cube CN, Elementar, Deutschland) an der UMR analysiert. Anregungs-Emissions-Matrizen (EEMs) wurden durch Messung der Fluoreszenzintensitäten bei Anregungswellenlängen von 200 bis 450 nm (5 nm-Schritte) und Emissionswellenlängen von 250 bis 700 nm (2 nm-Schritte) mit einer Scangeschwindigkeit von 12.000 nm/min und unter Verwendung einer 1-cm-Quarzküvette gemäß den in SINGER et al. (2012) beschriebenen Methoden erstellt. Die Absorption wurde mit einem UV-VIS-Spektrophotometer (Genesys 10S, ThermoFisher) unter Verwendung von 10-cm-Quarzküvetten gemessen. Ähnlich wie bei der DOC-Analyse wurden Blindproben des gesamten Arbeitsablaufs mit Milli-Q-Wasser bestimmt. Die EEMs dienen dazu, die Herkunft und die Zusammensetzung des organischen Kohlenstoffs qualitativ zu bestimmen. Über Fluoreszenzspektren und statistische Auswertungen können, im Gegensatz zu aufwendigen Analysen am Massenspektrometer, die Kohlenstoffverbindungen schneller und kostengünstiger bestimmt werden. Dies ist ein anerkanntes Verfahren, das in vielen Bereichen der ökologischen Kohlenstoffforschung angewandt wird.

Statistische Auswertungen

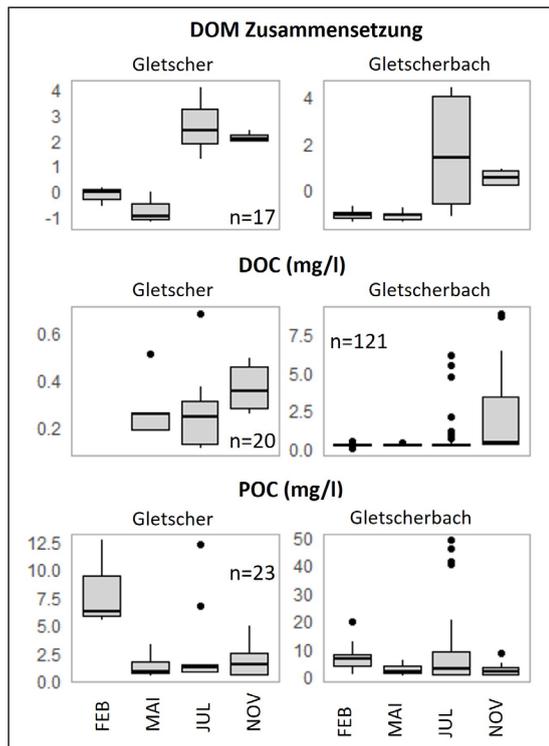
Alle multivariaten und statistischen Analysen wurden mit der Statistikumgebung R (R CORE TEAM 2017) durchgeführt. Die DOM-Zusammensetzung wurde auf der Grundlage von Fluoreszenz- und Absorptionsmessungen mit Hilfe der Hauptkom-

ponentenanalyse (PCA) unter Verwendung der Funktion *prcomp* aus dem Paket *stats* untersucht. Die Werte der Hauptkomponentenachse 1 (PC1), die auf der PCA basieren, wurden dann als repräsentativer Deskriptor für die DOM-Zusammensetzung von Gletschereis- und Flusswasserproben verwendet. Die kanonische Korrelationsanalyse (CCA) wurde mit der Funktion *CCorA* aus dem *Vegan*-Paket in R (OKSANEN et al. 2013) durchgeführt, die die DOM-Zusammensetzung (dargestellt durch PC1) mit der DOC-Konzentration, der Wassertemperatur, dem Chlorophyll-a und den Nährstoffkonzentrationen (Ammonium und Phosphat) in Beziehung setzt. Kanonische Ladungen (Korrelationen zwischen den zugrundeliegenden Variablen und der einen kanonischen Achse) zeigen die Stärke und die Richtung der Beziehung zwischen der einzelnen DOM-Fluoreszenzmessung und der Einschränkung an. Die Stärke der Beziehung zwischen der kanonischen Achse und der Randbedingung wurde als kanonischer Korrelationskoeffizient berechnet, wobei die Signifikanz jeder kanonischen Korrelation durch Permutation ermittelt wurde.

Ergebnisse und Diskussion

Saisonale Schwankungen der organischen Kohlenstoffkonzentration

Die DOC-Konzentrationen in den untersuchten Gletscherbächen reichen von unterhalb der Nachweisgrenze (< bis 4 µg/l) bis 8,49 mg/l, und von 0,11 bis 0,68 mg/l im



Gletschereis. Die POC-Konzentrationen im Gletscher reichen von 0,4 bis 48,67 mg/l in den Bächen und von 0,44 bis 12,56 mg/l im Gletschereis. Sowohl bei den DOC- als auch bei den POC-Konzentrationen wurden jahreszeitliche Veränderungen beobachtet, wobei die höchsten Konzentrationen im November für DOC und im Februar für POC sowohl im Bach als auch im Eis auftraten (Abb. 7).

Abb. 7: Boxplots der glazialen OC-Konzentration DOC, POC und Zusammensetzung auf der Grundlage von Fluoreszenzindizes (HIX, β/α) und modellierten humosen (C2) und proteinartigen (C1, C3, C4) Fluoreszenzkomponenten über alle Gletscher und Jahreszeiten hinweg (vgl. Abb. 8).

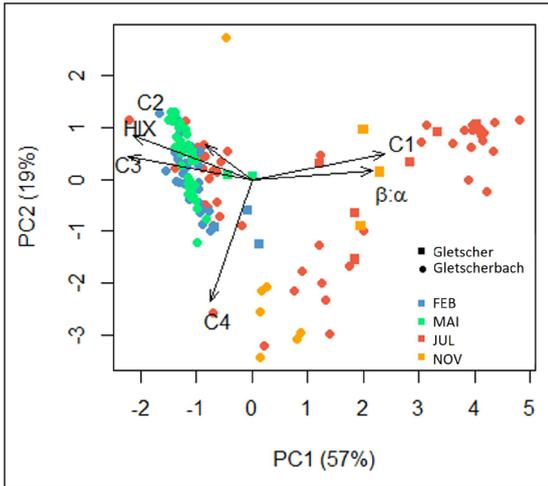


Abb. 8: Hauptkomponentenanalyse (PCA) der glazialen DOM-Zusammensetzung über alle Gletscher und Jahreszeiten hinweg. Die Pfeile basieren auf den Strukturkoeffizienten. Die unterschiedlichen Farben kennzeichnen verschiedene saisonale Probenahmezeiträume.

Während sich die jahreszeitlichen DOC- und POC-Konzentrationen zwischen Bach und Eis das ganze Jahr über nicht signifikant unterschieden (Wilcoxon-Test, $p > 0,05$, $n_1 = 20$ bzw. $n_2 = 168$), unterschied sich die

DOM-Zusammensetzung zwischen Bach und Eis signifikant im Frühjahr, Herbst und Winter, nicht jedoch im Sommer (Abb. 8). In diesen Monaten war das Eis im Vergleich zum Bachwasser durch mehr labiles und proteinartiges DOM gekennzeichnet. Im Juli jedoch, als es keinen signifikanten Unterschied zwischen der DOM-Zusammensetzung von Gletschereis und Bachwasser gab, war der Anteil an labilem DOM in den proglazialen Bächen relativ hoch im Vergleich zu allen anderen Jahreszeiten (Abb. 8).

Auf den beprobten Gletschern deutet die Ähnlichkeit der Fluoreszenzeigenschaften von Gletschereis und Schmelzwasser gegen Ende der Schmelzsaison darauf hin, dass sich das DOM während der Schmelzsaison von subglazialen zu basalem Eis verschiebt und am Ende der Schmelzsaison wieder subglazial wird. Während der Schmelzsaison wird diese labile Fraktion dann in die Flüsse transportiert und verleiht dem Fluss einen überwiegend aus Gletschereis bestehenden DOM-Charakter. Die relativ stärkere terrigene Prägung könnte möglicherweise auf einen subglazialen Fluss hinweisen, der DOM aus terrestrischen Einträgen von überfluteten Böden beisteuert (SINGER et al. 2012). Ähnliche jahreszeitliche Veränderungen wurden im grönländischen Inlandeis nachgewiesen. Dort deuten sie darauf hin, dass terrestrische Einträge aus überfluteten Böden die DOM zu Beginn der Schmelzsaison dominieren. Demgegenüber wurden während der Ausbruchperiode dominante proteinähnliche Fluoreszenzsignaturen beobachtet (KELLERMANN et al. 2020). Andererseits können Perioden mit geringem Durchfluss der mikrobiellen Gemeinschaft des Flusses die Möglichkeit bieten, die labilere Fraktion des glazialen OC effizient zu verstoffwechseln, was zu einer stärkeren terrigenen Prägung der DOM-Zusammensetzung führt.

Tagesschwankungen der organischen Kohlenstoffkonzentration

Entgegen den Erwartungen und üblichen Annahmen unterschieden sich die DOC- und POC-Konzentrationen im Eis und in den Bächen im Tagesverlauf nicht (t-Test,

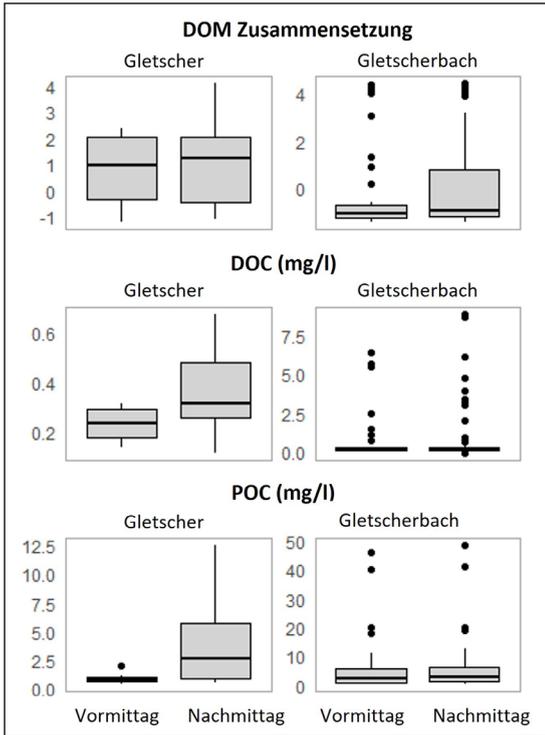


Abb. 9: Tagesdynamik der DOM-Zusammensetzung, DOC- und POC-Konzentrationen für Gletschereis und Flusswasser über alle Gletscher und Jahreszeiten hinweg.

$p > 0,05$) (Abb. 9). Es gab jedoch eine klare tageszeitliche Signatur der DOM-Zusammensetzung (dargestellt durch PC1) im Bachwasser (Wilcoxon-Test, $p < 0,05$, $n = 48$), während das Eis eine hohe proteinartige Fluoreszenz aufwies, die sich von morgens bis abends nicht veränderte. Am Nachmittag ähnelte die DOM-Zusammensetzung des Bachwassers der des Gletschereises, während am Morgen, wenn die Schmelzraten niedriger waren, die DOM-Zusammensetzung des Gletschereises deutlich labiler

war als die des Bachwassers, was auf eine positive Beziehung zwischen Gletscherschmelze und DOM-Labilität im Bachwasser schließen lässt.

Die erhöhte Gletscherschmelze an den Nachmittagen führte zwar nicht zu einer Veränderung der organischen Kohlenstoffmengen in den Bächen, wirkte sich aber auf die Zusammensetzung der DOM aus, wahrscheinlich durch die Freisetzung labiler Verbindungen am Nachmittag, wenn die Gletscherschmelze am höchsten war. Während die durchgeführte Untersuchung eine der wenigen ist, die eine tageszeitliche Variabilität von DOM in Gletscherbächen zeigt, haben mehrere Studien photochemische Veränderungen mit beobachteten tageszeitlichen Veränderungen der DOM-Zusammensetzung in nicht-glazialen Bächen in Verbindung gebracht (HELMS et al. 2008; FASCHING et al. 2016; BOODOO et al. 2020).

Der photochemische Abbau bewirkt die Umwandlung von DOM in besser bioverfügbares DOM mit geringerem scheinbarem Molekulargewicht (FASCHING & BATTIN 2012; FASCHING et al. 2016). Er kann in glazialen Umgebungen sowohl im Eis als auch in Flüssen von großer Bedeutung sein und stellt einen potenziellen Weg für die Umwandlung von terrestrischem DOM in labileres DOM mit einer höheren Proteinsignatur dar. In der Tat wurde gezeigt, dass die photochemische Abbaubarkeit mit dem terrestrischen Einfluss von DOM zunimmt (LAPIERRE et al. 2013). Darüber hinaus können tageszeitliche Schwankungen der Temperatur und des Abflusses von

Gletscherströmen sehr ausgeprägt sein, was bereits für den grönländischen Eisschild gezeigt wurde (BHATIA et al. 2011). Daher stellen wir die Hypothese auf, dass ein erhöhter Beitrag von Gletscherschmelzwasser während des Nachmittags zum Transport relativ labiler Fraktionen von DOM in die Gletscherströme führt. In den Nacht- und Morgenstunden hingegen könnte der Hauptbeitrag zum Gletscherabfluss die subglaziale Umgebung sein, die weniger labilen Kohlenstoff und ein relativ höheres terrigenes Signal beiträgt.

Export von organischem Kohlenstoff aus isländischen Gletschern

Die isländischen Gletscher setzen beträchtliche Mengen an DOC und POC frei, wobei die Menge des Exports saisonal schwankt. Auf der Grundlage der Konzentrationen in den untersuchten gletschergespeisten Bächen kann eine jährliche Freisetzung von 0,032 Tg C/yr (DOC) und 0,2016 Tg C/yr (POC) aus isländischen Gletschern berechnet werden. Dabei wird von einem mittleren Gletscherabfluss von 1.500 m³/s (BJÖRNSSON & PÁLSSON 2008) aus den Gletschern ausgegangen und die mittleren DOC- und POC-Konzentrationen aus den saisonalen Beprobungen verwendet. Wird die jährliche Freisetzung von DOC mit der vergletscherten Fläche Islands (11.060 km²; GRINSTED 2013) gewichtet, ergibt sich ein Wert von 0,0029 Gg C/yr·km², der deutlich über den flächengewichteten Schätzungen für den grönländischen Eisschild und die europäischen Alpen (jeweils 0,0002 Gg C/yr·km²) liegt (HOOD et al. 2015, GRINSTED 2013). Im Vergleich zu der von HOOD et al. (2020) geschätzten globalen Freisetzung von 1,3 Tg C/yr (POC) kann eine Freisetzung von 0,2016 Tg C/yr (POC) durch isländische Gletscher angenommen werden, die mit dem Gletscherabfluss zusammenhängt. Diese ersten Schätzungen sind noch mit erheblichen Unsicherheiten behaftet, da noch nicht sämtliche Gletscher Islands beprobt wurden. Dennoch unterstreichen unsere Ergebnisse, wie wichtig es ist, angesichts der relativ beträchtlichen Größe der isländischen Gletscher die aktuellen globalen Schätzungen zu überarbeiten, um die bedeutenden, aber bisher nicht beachteten Beiträge der isländischen Gletscher zum Kohlenstoffexport zu berücksichtigen.

Schlussbetrachtung

Zum ersten Mal wurden die DOC- und POC-Konzentrationen in Gletschern und gletschergespeisten Bächen in Island untersucht. Die Berechnungen zeigen, dass aus isländischen Gletschern beträchtliche Mengen an DOC und POC freigesetzt werden, die unbedingt in die Abschätzungen des globalen Kohlenstoffexports aus Gletschern einbezogen werden müssen. Insbesondere in Anbetracht der jüngsten Prognosen, die eine Zunahme des Gletscherabflusses vorhersagen, ist eine Zunahme des Austrags von organischem Kohlenstoff aus Gletschern zu erwarten, was sich immer mehr auf die Gletscherbäche und andere Ökosysteme auswirken wird (BLISS et al. 2014).

Unsere Ergebnisse geben einen ersten und wichtigen Einblick in die räumliche Variabilität der DOC- und POC-Konzentration sowie der DOM-Zusammensetzung in



Abb. 10: Neben dem Falljökull schmilzt auch der Svinafellsjökull, ebenfalls ein Talgletscher der Vatnajökull-Eiskappe, sehr rasch (Foto: © P. Chiffard)

den isländischen Proglazialflüssen, die letztlich glaziales DOM in den Ozean transportieren. Im Gegensatz zum grönländischen Eisschild sind die vorhergesagten Schmelzraten für isländische Gletscher deutlich höher, so dass die Freisetzung von in isländischen Gletschern gespeichertem OC für die umliegende Umwelt von Bedeutung ist, was Auswirkungen auf die flussabwärts gelegenen Ökosysteme und die dort lebenden Arten hat. Um die derzeitigen Vorhersagen über den OC-Export infolge des raschen Abschmelzens der isländischen Gletscher weiter einzuschränken, sind ergänzende Untersuchungen sowohl der proglazialen Ströme als auch des Gletschereises erforderlich.

Das aktuell bewilligte DFG-Forschungsprojekt „Entschlüsselung der zeitlichen Variabilität der Konzentration und Zusammensetzung des glazialen organischen Kohlenstoffs zur Bestimmung des Kohlenstoffexports mittels Abflussseparation und maschinellen Lernverfahren (Falljökull, Island)“ (<https://gepris.dfg.de/gepris/projekt/504341843>) ist ein erster Schritt in diese Richtung. Das Projekt wird auf Basis zeitlich hochaufgelöster Untersuchungen zum organischen Kohlenstoff am Gletscher Falljökull (Abb. 1 und 2) in Verbindung mit einer Abflussgangliniensseparation und Methoden maschineller Lernverfahren dazu beitragen, die Prozesse des glazialen Kohlenstoffexports besser zu verstehen und vor allem auch besser vorhersagen zu können.

Literaturhinweise

- AÐALGEIRSDÓTTIR, G. et al. (2006): Response of Hofsjökull and southern Vatnajökull, Iceland, to climate change. In: *Journal of Geophysical Research* 111. doi: 10.1029/2005JF000388.
- AÐALGEIRSDÓTTIR, G. et al. (2020): Glacier Changes in Iceland from ~1890 to 2019. In: *Frontiers in Earth Science* 8, 520. doi: 10.3389/feart.2020.523646.
- ANESIO, A. M. & J. LAYBOURN-PARRY: Glaciers and ice sheets as a biome. In: *Trends in Ecology & Evolution* 27(4), S. 219-225. doi: 10.1016/j.tree.2011.09.012.
- BHATIA, M. P. et al. (2010): Molecular characterization of dissolved organic matter associated with the Greenland ice sheet. In: *Geochimica et Cosmochimica Acta* 74, S. 3768-3784. doi: 10.1016/j.gca.2010.03.035.
- BHATIA, M. P. et al. (2011): Seasonal evolution of water contributions to discharge from a Greenland outlet glacier: insight from a new isotope-mixing model. In: *Journal of Glaciology* 57, S. 929-941. doi: 10.3189/002214311798043861.
- BHATIA, M. P. et al. (2013): Organic carbon export from the Greenland ice sheet. In: *Geochimica et Cosmochimica Acta* 109, S. 329-344. doi: 10.1016/j.gca.2013.02.006.
- BJÖRNSSON, H. & F. PÁLSSON (2008): Icelandic glaciers. In: *Jökull* 58, S. 365-386. https://www.researchgate.net/publication/264889388_Icelandic_glaciers.
- BJÖRNSSON, H. et al. (2013): Contribution of Icelandic ice caps to sea level rise: Trends and variability since the Little Ice Age. In: *Geophysical Research Letters* 40, S. 1546-1550. doi: 10.1002/grl.50278.
- BLISS, A. et al. (2014): Global response of glacier runoff to twenty-first century climate change. In: *JGR Earth Surface* 119, S. 717-730. doi: 10.1002/2013JF002931.
- BRADWELL, T. et al. (2013): Recent, very rapid retreat of a temperate glacier in SE Iceland. In: *Boreas* 42, S. 959-973. doi: 10.1111/bor.12014.
- BOODOO, K. S. et al. (2020): Sources, transformation, and fate of dissolved organic matter in the gravel bar of a prealpine stream. In: *JGR Biogeosciences* 125(8). doi: 10.1029/2019JG005604.
- CHIFFLARD, P. et al. (2019): Dissolved and Particulate Organic Carbon in Icelandic Proglacial Streams: A First Estimate. In: *Water* 11, 748. doi: 10.3390/w11040748.
- FASCHING, C. & T. J. BATTIN (2012): Exposure of dissolved organic matter to UV-radiation increases bacterial growth efficiency in a clear-water Alpine stream and its adjacent groundwater. In: *Aquatic Sciences* 74(1), S. 143-153. doi: 10.1007/s00027-011-0205-8.
- FASCHING, C. et al. (2016): Hydrology controls dissolved organic matter export and composition in an Alpine stream and its hyporheic zone. In: *Limnology and Oceanography* 61, S. 558-571. doi: 10.1002/lno.10232.
- GRINSTED, A. (2013): An estimate of global glacier volume. In: *The Cryosphere* 7, S. 141-151. doi: 10.5194/tc-7-141-2013.
- HELMS, J. R. et al. (2008): Absorption spectral slopes and slope ratios as indicators of molecular weight, source, and photobleaching of chromophoric dissolved organic matter. In: *Limnology and Oceanography* 53, S. 955-969. doi: 10.4319/lo.2008.53.3.0955.
- HOOD, E. et al. (2015): Storage and release of organic carbon from glaciers and ice sheets. In: *Nature Geoscience* 8, S. 91-96. doi: 10.1038/ngeo2331.

- HOOD, E. et al. (2020): Glacier Loss Impacts Riverine Organic Carbon Transport to the Ocean. In: *Geophysical Research Letters* 47/19. doi: 10.1029/2020GL089804.
- JÓHANNESSON, T. et al. (2013): Ice-volume changes, bias estimation of mass-balance measurements and changes in subglacial lakes derived by lidar mapping of the surface of Icelandic glaciers. In: *Annals of Glaciology* 54, S. 63-74. doi: 10.3189/2013AoG63A422.
- JÓNSDÓTTIR, J.F. (2008): A runoff map based on numerically simulated precipitation and a projection of future runoff in Iceland. In: *Hydrological Sciences Journal* 53, S. 100-111. doi: 10.1623/hysj.53.1.100.
- KELLERMAN, A.M. (2020): Glacier Outflow Dissolved Organic Matter as a Window Into Seasonally Changing Carbon Sources: Leverett Glacier, Greenland. In: *JGR Biogeosciences*, 125(4). doi: 10.1029/2019JG005161.
- LAPIERRE, J.-F. et al. (2013): Increases in terrestrially derived carbon stimulate organic carbon processing and CO₂ emissions in boreal aquatic ecosystems. In: *Nature Communications* 4(1):2972. doi: 10.1038/ncomms3972.
- LUTZ, S. et al. (2015): Microbial diversity on Icelandic glaciers and ice caps. In: *Frontiers in Microbiology* 6, 307. doi: 10.3389/fmicb.2015.00307.
- MAYER, C. et al. (2017): Local surface mass-balance reconstruction from a tephra layer – a case study on the northern slope of Mýrdalsjökull, Iceland. In: *Journal of Glaciology* 63, S. 79-87. doi: 10.1017/jog.2016.119.
- OKSANEN, J. et al. (2013): Community ecology package. R package version 2(0). S. 321-326. <https://cran.r-project.org/web/packages/vegan/index.html>.
- R CORE TEAM (2017): R: A Language and Environment for Statistical Computing. <https://www.r-project.org>.
- SINGER, G.A. et al. (2012): Biogeochemically diverse organic matter in Alpine glaciers and its downstream fate. In: *Nature Geoscience* 5(10), S. 710-714. doi: 10.1038/ngeo1581.
- SOMMARUGA, R. (2015): When glaciers and ice sheets melt: consequences for planktonic organisms. In: *Journal of Plankton Research* 37(3), S. 509-518. doi: 10.1093/plankt/fbv027.
- STIBAL, M. et al. (2008): Microbial primary production on an Arctic glacier is insignificant in comparison with allochthonous organic carbon input. In: *Environmental microbiology* 10(8), S. 2172-2178. doi: 10.1111/j.1462-2920.2008.01620.x.
- STUBBINS, A. et al. (2012): Anthropogenic aerosols as a source of ancient dissolved organic matter in glaciers. In: *Nature Geoscience* 5(3), S. 198-201. doi: 10.1038/ngeo1403.
- STUTTER, M.I. et al. (2018): Balancing macronutrient stoichiometry to alleviate eutrophication. In: *Science of the total environment* 634, S. 439-447. doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.03.298.

Autor

Prof. Dr. Peter Chiffard
 Fachbereich Geographie
 Deutschhausstraße 10
 35032 Marburg
 E-Mail: peter.chiffard@geo.uni-marburg.de