

RoBiMo-Trop

Robotisches Binnengewässer-Monitoring in den Tropen



Die autonome robotische Plattform MARP-FG im August 2023 auf dem Iranduba See, Amazonas, Brasilien

Abschlussbericht des DBU-Projektes Az 36095/01

Jörg Matschullat, Prof. Dr.

Interdisziplinäres Ökologisches Zentrum

TU Bergakademie Freiberg

Brennhausgasse 14

09599 Freiberg

Projektbeginn: 2. September 2020

Laufzeit: 1. März 2022 – 31. Dezember 2023

Dartmouth College, NH, USA; 2024

Inhaltsverzeichnis

Deckblatt	1
Zusammenfassung DE/EN	2
1. Anlass und Zielsetzung	3
2. Arbeitsschritte und Methoden	3
3. Ergebnisse	5
4. Diskussion	14
5. Öffentlichkeitsarbeit	16
6. Fazit	17
Literaturangaben	17
Anhang	18

Zusammenfassung

Mittels einer vorab sowie parallel weiterentwickelten, zunehmend autonomen, aquatischen modularen Plattform (MARP-FG) konnten in drei Geländekampagnen qualitativ hochwertige Daten zum Treibhausgas Austausch sowie zu hydrologischen und mikrometeorologischen Parametern feucht-tropischer Seen (Klarwasser, Schwarzwasser, Weißwasser) gewonnen werden; darunter auch erstmals Daten zur Nachtzeit (keine Photosynthese). Wesentlich für den Erfolg war die herausragende personelle und infrastrukturelle Unterstützung durch unsere brasilianischen Partner (Embrapa Amazônia Ocidental).

Im Ergebnis zeigen Klarwasserseen die geringste, Weißwasserseen die höchste Emission von Treibhausgasen (vor allem CO₂ und CH₄). Nächtliche Gasfreisetzung ist generell deutlich geringer als während des Tages – in Übereinstimmung mit Erfahrungen aus anderen Klimazonen. Generell ähnelt die Emission von CO₂ tagsüber sehr derjenigen benachbarter Böden in den Einzugsgebieten (letzteres in einem anderen Projekt des Antragstellers ermittelt). Dieses Ergebnis widerspricht diversen Stimmen, die deutlich höhere Emissionen tropischer Gewässer prognostizieren. Daten der Wassersäulen liefern wichtige Botschaften zu unerwünschten Veränderungen mit zunehmendem Klimawandel. Die Ergebnisse unserer Sedimentuntersuchungen erlauben Schlussfolgerungen für die Landnutzung im Überschwemmungsbereich der Seen.

Summary

Using an increasingly autonomous aquatic modular platform (MARP-FG), which was developed in advance and in parallel, very high-quality data on greenhouse gas exchange and on hydrological and micrometeorological parameters of wet tropical lakes (clear water, black water, white water) were obtained in three field campaigns; including first data at night (no photosynthesis). The outstanding personal and infrastructural support from our Brazilian partners (Embrapa Amazônia Ocidental) was essential for the success of the project.

Clear water lakes show the lowest, whitewater lakes the highest emission of greenhouse gases (especially CO₂ and CH₄). In general, the emission of CO₂ during the day is very similar to that of neighboring soils in the catchment areas (the latter determined in another project of the applicant). This finding contradicts various voices that claim significantly higher water body emissions in comparison with soils. Nocturnal gas release is generally significantly lower than during the day – in line with experience from other climate zones. Water column data yield important messages on unwanted change with ongoing climatic shifts. Results of our sediment studies allow for helpful conclusions and land-use recommendations in the temporarily inundated areas near the lakes.

Abschlussbericht RoBiMo-Trop

1. Anlass und Zielsetzung des Projekts

Vor dem Hintergrund eines von 2019 bis 2021 geförderten EU-Projektes (ESF, RoBiMo) zur Entwicklung einer neuartigen robotischen Plattform für Gewässeruntersuchungen sowie einer BMBF (IB) Unterstützung zum Testen dieser Plattform unter tropischen Bedingungen wurde erfolgreich im Jahr 2020 bei der DBU beantragt, zur Ergänzung der rein entwicklungstechnischen Arbeiten leicht zeitversetzt und teilparallel zugleich wissenschaftliche Forschung auf Basis der Plattform durchzuführen, um in kürzester Zeit und mit minimalen (Umwelt)kosten maximale Ergebnisse erzielen zu können.

Im Hintergrund stand sowohl die Motivation, das Amazonasgebiet und die feuchten inneren Tropen insgesamt besser zu repräsentieren, was Umweltreaktionen u.a. auch von Stillgewässern betrifft (hier speziell Austausch von Treibhausgasen), als auch die Gelegenheit zu nutzen, in einem laufenden, eher technischen Projekt wesentliche und vor allem wissenschaftlich aussagekräftige Ergebnisse zu erarbeiten; also mit geringem Zusatzaufwand maximalen Output generieren zu können.

Dem DBU-gestützten Projekt kam die Zielstellung zu, bei mehreren Geländekampagnen im Amazonasgebiet auf Seen unterschiedlicher Charakteristiken den Gasaustausch zwischen Atmosphäre und Wasserkörper zu ermitteln und dabei zugleich maximal viele wesentliche Randparameter zu erfassen. Die dabei zu erwartenden Ergebnisse sollten wiederum in die weitere technische Entwicklung einfließen.

Die konkreten Forschungsfragen lauteten:

- Lässt sich zwischen Klarwasser, Schwarzwasser und Weißwasserseen in Bezug auf Wasserchemie und Gasaustauschverhalten differenzieren?
- Wie sehen die Gasaustauschsignaturen tropischer Seen im Vergleich zu temperierten Seen aus?
- Gibt es einen nachweisbaren Unterschied zwischen dem Gasaustausch der benachbarten Terre Firme Böden und den Seen?
- Wie stellt sich der Beitrag (in der Regenzeit) überschwemmter Böden und von Seen der feuchten Tropen im Hinblick auf die globale Treibhausgasbilanz dar?
- Lassen sich aus den Ergebnissen dieses Projektes Hinweise für optimierten Landnutzungsmanagement ableiten?

2. Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

Durch die bewilligte Kombination bereits geförderter Arbeiten mit der DBU-Zusatzförderung gelang es, mehr Personal von Freiberg ins Amazonasbecken zu führen und in insgesamt fünf Geländekampagnen bemerkenswerte Fortschritte zu erzielen. Wesentlich für den Erfolg war zugleich ein jahrelang aufgebautes Vertrauen der brasilianischen Kooperationspartner (hier vor allem Embrapa Amazônia Ocidental; <https://www.embrapa.br/en/amazonia-ocidental>), das in äußerst zuverlässiger personeller und infrastruktureller Unterstützung ihren Ausdruck fand.

Die ersten beiden, nicht DBU-unterstützten Kampagnen erlaubten die zunehmende Automatisierung der am Ende voll-autonomen robotischen Plattform (Abb. 1, umseitig), auf die nun aufgebaut werden konnte. Neben dieser zunehmend leistungsfähigeren Robotik konnten bei jeder Kampagne bessere Sensoren verbaut und wiederum getestet werden, sowie eine am Ende vollautomatische Gasprobenahme entwickelt werden – kostenneutral für das DBU-Projekt, jedoch nur durch die wissenschaftlichen Erkenntnisse des DBU-Projektes möglich und sinnvoll umzusetzen.

Im September 2021 und im März 2022 war die Plattform noch überwiegend manuell zu bedienen und hatte keinen eigenen Antrieb. Das Kammersystem zur Erfassung des Treibhausgasaustauschs war

funktional; physikochemische Parameter konnten parallel mit einer Multiparametersonde (sichtbar im Bild oben für September 2021) erfasst werden. Ab September 2022 war volle Autonomie gegeben (noch mit Fernsteuerung) und die Gasprobenahme erfolgte teilautomatisch (schwarze Peli-Box rechts im Bild oben vom September 2022). Letztere wurde kontinuierlich verbessert und die Zahl der möglichen Proben von sechs auf 18 erweitert – ohne manuelle Interferenz. Bei der letzten DBU-Kampagne im August 2023 (nicht in Abb. 1 erkennbar) war erstmals eine Vollautonomie der Plattform analog zu einer Flugdrohne gegeben. Im Bild unten vom März 2023 ist die ebenfalls neue „Brücke“ über der Plattformmitte zu erkennen. Darauf montiert ist die Mikrometeorologie, notwendig, weil wir nachweisen konnten, dass parallele Mikrometeorologie-Messungen am Ufer unzureichend sind, um die Vor-Ort Situation auf einem Seenkörper korrekt zu erfassen.

Platform development 2021–2023



Abb. 1. Entwicklung der nunmehr autonomen, modularen, aquatischen, robotischen Plattform (MARP-FG)

Bei jeder der DBU-gestützten Kampagnen wurden in Absprache mit unseren brasilianischen KollegInnen die stets gleichen Objekte angefahren und dort jeweils zwei bis 3 Tage lang gearbeitet (mit Hin- und Rückfahrt ab Embrapa). Diese fünf Seen waren der Balbina Stausee etwa zwei Fahrstunden nördlich von Manaus, ein Klarwasser-See (*clearwater*), die Seen Caldeirao und Jandira, zwei Schwarzwasserseen (*blackwater*) sowie die Seen Lagoa Grande und Iranduba, zwei Weißwasserseen (*whitewater*; Abb. 2; umseitig). Weitere Objekte wurden kurzzeitig untersucht, eigneten sich jedoch nicht für wiederholte Kampagnen (eingeschränkter Zugang; unklare Be- und Entwässerung, etc.).

Eine Differenzierung der Seentypen erschien von vornherein wesentlich, da sich die Wasserchemie zwischen diesen Typen deutlich unterscheidet. An jedem Objekt wurden zunächst sequenziell, dann mit zunehmender Plattformautonomie parallel Treibhausgas- und Mikrometeorologiemessungen an jeweils unterschiedlichen Punkten auf den Seen sowie hydrographische Profile durchgeführt. Vor Ort erfasste das Infrarot-Spektrometer die CO₂-Konzentration hochauflösend (Vaisala GMP-252), parallel wurden Wassertemperatur, Lufttemperatur und -feuchte, photosynthetisch-aktive Strahlung (PAR) sowie später auch Windgeschwindigkeit und Niederschlag registriert. Bei den hydrographischen Profilen

wurden mit einer Multiparametersonde (Manta 35 von Eureka Pro) Wassertemperatur und -leitfähigkeit, pH-Werte, Trübung (NTU), Sauerstoffkonzentration und -sättigung jeweils von der Wasseroberfläche bis zur maximalen Gewässertiefe mehrfach erfasst.

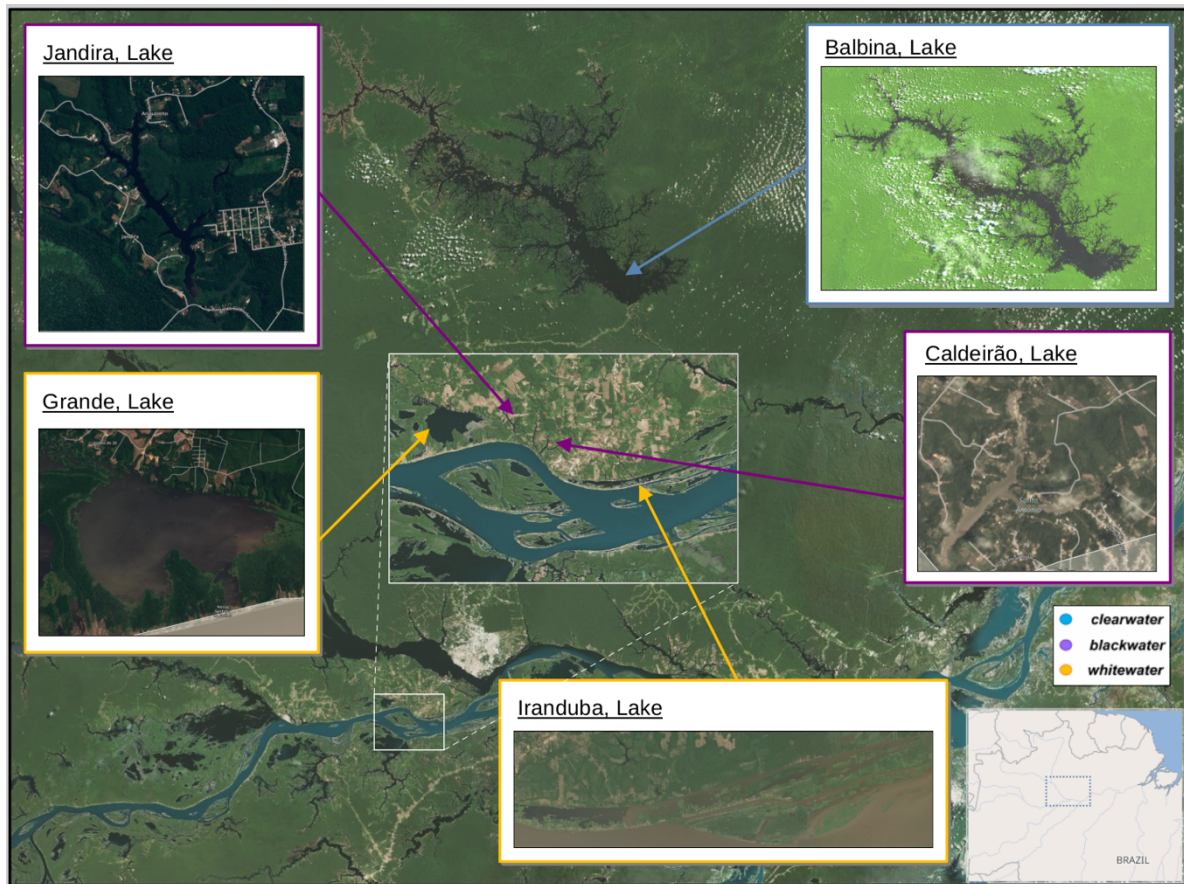


Abb. 2. Die fünf Studienobjekte im Projekt RoBiMo-Trop

Der zunehmend automatische Gasprobenehmer zog an jeder Messstelle jeweils eine volle Sequenz an Gasproben, die später im Freiburger Labor gaschromatographisch auf die CO_2 , CH_4 und N_2O -Konzentration zur Berechnung der jeweiligen Gasflüsse untersucht wurden. Zusätzliche Wasser- und Schwebstoffproben an jedem Gewässer galten der anschließenden Erfassung von partikulärem und gelöstem Kohlenstoff im System. Alle durchgeführten Arbeiten folgten strenger Qualitätskontrolle und den Regeln guter Laborpraxis.

3. Ergebnisse (Darstellung der tatsächlich erzielten Ergebnisse)

Die folgende Darstellung berichtet von den Ergebnissen aller fünf Kampagnen, da es unsinnig wäre, allein die Daten der von der DBU unterstützten Kampagnen darzustellen (eingeschränkte Repräsentativität).

Physikochemie der Wassersäule

Die Daten (Tabelle 1; umseitig) basieren auf den hydrographischen Profilen, die bei jeder Kampagne erarbeitet wurden. Dabei lassen sich gewisse Unterschiede zwischen Regen- und Trockenzeit ausmachen. Eine Probenahme pro „Jahreszeit“ genügt nur bedingt, da die intrasaisonalen Schwankungen stark sein können, zum Beispiel als Resultat eines sehr starken tropischen Gewitters mit Regenwasser aus großer atmosphärischer Höhe. Intensiveres Monitoring ist empfehlenswert.

Tabelle 1. Saisonale physiko-chemische Charakteristik des Oberflächenwassers unterschiedlicher Seentypen in Amazonas, Brasilien (Medianwerte aus Trocken- [T] und Regenzeit [R])

		09-21	03-22	09-22	03-23	08-23*	Saisonaler
See	Parameter	[T]	[R]	[T]	[R]	[T]	Unter- schied
Balbina	T°C	33.1	28.2	31.6	30.3	32.2	Ja
	pH	6.7	6.5	6.9	6.6	na	Nein
	EC ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	8	9	7	7	7	Nein
	NTU	4.6	3.3	3.0	2.0	1.6	Nein
	O ₂ (mg L ⁻¹)	7.1	7.2	7.5	7.7	9.3	Nein
	Chl-a ($\mu\text{g L}^{-1}$)	1.4	0.7	1.0	1.1	0.7	Nein
Jandira	T°C	29.7	28.9	31.0	30.2	32.7	Ja
	pH	5.6	6.0	6.1	5.9	na	Nein
	EC ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	25	8	29	8	39	Ja
	NTU	10.0	6.7	7.1	3.5	3.5	Evtl.
	O ₂ (mg L ⁻¹)	2.5	8.0	3.4	7.1	8.1	Evtl.
	Chl-a ($\mu\text{g L}^{-1}$)	9.4	4.6	3.2	7.5	2.1	Nein
Caldeirão	T°C	28.6	29.0	30.4	28.5	30.8	Ja
	pH	5.9	5.8	6.5	5.7	na	Nein
	EC ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	22	11	26	16	28	Ja
	NTU	6.8	3.9	3.7	3.8	2.4	Nein
	O ₂ (mg L ⁻¹)	2.1	7.5	6.3	3.4	3.4	Nein
	Chl-a ($\mu\text{g L}^{-1}$)	6.3	3.6	2.6	6.8	2.9	Nein
Iranduba	T°C	32.1	30.3	33.1	30.0	33.0	Ja
	pH	6.7	7.0	6.9	6.4	na	Nein
	EC ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	106	126	98	105	74	Nein
	NTU	18	5.4	7.7	2.0	3.9	Evtl.
	O ₂ (mg L ⁻¹)	6.2	7.0	6.3	2.2	6.1	Nein
	Chl-a ($\mu\text{g L}^{-1}$)	10.4	3.9	4.0	1.7	3.0	Evtl.
L. Grande	T°C	30.2	29.4	na	na	na	na
	pH	6.6	6.4	na	na	na	na
	EC ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	69	36	na	na	na	na
	NTU	6.1	3.1	na	na	na	na
	O ₂ (mg L ⁻¹)	4.1	3.9	na	na	na	na
	Chl-a ($\mu\text{g L}^{-1}$)	9.8	12.0	na	na	na	na

*Der pH Sensor war im August 2023 defekt – keine pH Daten; na: nicht verfügbar

Temperatur. An der Oberfläche bewegen sich die durchschnittlichen Temperaturen zwischen 28,2 und 33,1 Grad Celsius mit geringen Unterschieden zwischen den Seen. Dabei sind die Temperaturen in der Regenzeit etwa $2,1 \pm 1,0$ Grad Celsius geringer als zur Trockenzeit. Eine Verminderung der Temperatur mit der Tiefe ist messbar, jedoch unbedeutend für biologische und chemische Prozesse.

pH-Werte. Im Durchschnitt liegen die pH-Werte des Oberflächenwassers bei 5,6 bis 7,0 mit deutlichen Unterschieden zwischen den Gewässertypen. Am höchsten sind sie bei den Weißwasserseen wegen der Pufferung durch die mitgeführten Sedimente, am geringsten bei den Schwarzwasserseen – ohne signifikante Differenz zwischen Regen- und Trockenzeit. Wesentlich ist, dass die pH-Werte generell deutlich höher sind als die Boden-pH-Werte, die in der Regel $\leq \text{pH } 4,5$ zeigen.

Elektrische Leitfähigkeit. Analog zu den Böden der Einzugsgebiete sind die Leitfähigkeiten in der Wassersäule gering bis sehr gering ($<100 \mu\text{S cm}^{-1}$). Am geringsten im Klarwassersee Balbina ($\leq 9 \mu\text{S cm}^{-1}$), bei Schwarzwasserseen zwischen 8 und $29 \mu\text{S cm}^{-1}$, während sie bei Weißwasserseen bei 36 bis $126 \mu\text{S cm}^{-1}$ liegen. Jahreszeitliche Schwankungen sind nicht nachweisbar.

Trübung. Eine deutliche Spreize zwischen 2 und 18 NTU differenziert sich mit den Gewässertypen; am geringsten im Klarwassersee Balbina, gefolgt von Schwarzwasserseen; am höchsten in den Weißwas-

serseen. Während der Regenzeiten deutet sich ein gewisser Rückgang der Trübe an; vermutlich ein Verdünnungseffekt durch das Regenwasser.

Sauerstoff. Typisch für Seen der inneren Tropen ist sowohl die Polymixie (häufige Durchmischung/Vollzirkulation) als auch ein Sauerstoffmangel im Tiefenwasser. Während im Oberflächenwasser noch Konzentrationen von 2,1 bis 7,7 mg O₂ L⁻¹ dominieren, zeigen Tiefenwässer eine Spreize von 0,0 bis 6,4 mg O₂ L⁻¹. Besonders während der Trockenzeiten erreichen viele Seen kritische Versorgungsbedingungen, ab die sich allerdings zahlreiche, auch höhere Biota (Fischfaunen) angepasst haben. Direkte jahreszeitliche Schwankungen konnten nicht nachgewiesen werden.

Chlorophyll. Ohne saisonal relevante Schwankungen zeigen Oberflächenwässer Werte von 0,7 bis 12 µg L⁻¹; im Tiefenwasser 0,5 bis 3,5 µg L⁻¹. Balbina ist durchgehend oligotroph, die Schwarzwasserseen zeigen mesotrophe Charakteristik und die Weißwasserseen meso- bis eutrophe Verhältnisse.

Sichttiefe. Mit einer Secchischeibe gemessen, variierten die Sichttiefen zwischen 0,7 und 3,7 Metern; am tiefsten am Balbina See (3,1–3,8 m), am geringsten in den Weißwasserseen (0,7–1,5 m).

Wasserchemie

Wasserproben wurden auf DOC/DIC, sowie exemplarisch auf Haupt-, Neben- und Spurenelemente hin untersucht.

Gelöster organischer Kohlenstoff (DOC). Die Werte liegen relativ eng beieinander mit den reproduzierbar geringsten im Balbina See, den höchsten am Lagoa Grande – ohne jedoch ein Muster zwischen Schwarzwasser und Weißwasserseen zu erlauben (Tabelle 2).

Tabelle 2. Durchschnittliche DOC Konzentrationen (mg L⁻¹) in Oberflächen (top) und Tiefenwasser (bot) bei den aufeinanderfolgenden Kampagnen

Probenahme	09-21	03-22	09-22	03-23	08-23
See	dry	wet	dry	wet	dry
Balbina top	2.5	1.8	2.7	4.1	2.2
bot	1.8	1.6	3.8	2.6	2.1
Jandira top	3.0	1.8	2.9	4.1	3.5
bot	4.1	1.5	6.1	3.0	5.4
Caldeirão top	2.2	3.3	0.5	8.2	3.6
bot	3.3	3.8	8.6	7.0	5.3
Iranduba top	3.7	4.8	1.5	5.5	4.7
bot	3.6	5.2	1.0	5.3	5.9
L. Grande top	3.6	5.9	na	na	na
bot	4.0	7.7	na	na	na

Hauptionen. Verlässliche Daten zur Boden- und Wasserchemie im Amazonasbecken sind nach wie vor eher dürrig. Tabelle 3 (umseitig) stellt die Ergebnisse ausgewählter Kationen und Anionen im Vergleich zu anderen tropischen Seen sowie Regenwasser aus der Literatur dar.

Die Hauptionenkonzentrationen der Seen liegen innerhalb des für Schwarz- und Weißwasserflüsse im brasilianischen Amazonas veröffentlichten Bereichs. Mit Ausnahme von Sulfat lieferten die Niederschlagsdaten der Kola-Halbinsel aus den 1990er Jahren (Reimann et al. 1997) das reinste Wasser (Medianwerte), während die Regenwasserproben der tropischen Pazifikinseln eher höhere Werte als das Wasser der Amazonas-Seen aufweisen. Vor allem die malaysischen Daten zeigen einen deutlichen marinen Einfluss (Gischt), wie die Ca-, Na-, Cl- und SO₄²⁻-Werte zeigen. Die malaysische Probe sticht dennoch mit ungewöhnlich niedrigen EC-Werten hervor, ähnlich wie auf der Kola-Halbinsel. In allen anderen Fällen zeigen die Amazonas-Seenwässer vergleichsweise sehr niedrige Werte, die durch niedrige

Elementkonzentrationen in den Böden des Einzugsgebiets voll bestätigt werden (Matschullat et al. 2022). In den Referenzwerten aus den Flüssen des Amazonas (hier Wildwasser und Schwarzwasser) werden in der Arbeit von Küchler et al. (2000) alle Kationen und Anionen in mg L^{-1} angegeben. Die angegebenen Zahlen wären realistisch, wenn die Einheit $\mu\text{g L}^{-1}$ wäre. Wir gehen von einem Tippfehler in dem Dokument aus und verwenden die Daten hier so, als ob sie um den Faktor 1000 niedriger wären als angegeben.

Die zuverlässigste und vollständigste Datenreihe scheint von Moquet et al. (2016) zu stammen. Die Autoren präsentieren Daten zur gelösten Fracht für das Einzugsgebiet des mittleren Amazonas (Hauptkationen und -anionen). Die nächsten Probensammelstellen stammen aus dem Solimões-Fluss bei Manacapuru (Station MAN = in der Nähe der Seen Iranduba und Lagoa Grande) und aus dem Negro-Fluss mit Stationen am Oberlauf des Rio Negro (SER) und Rio Branco (CAI). Während der jährliche Abfluss bei MAN etwa $104.000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ beträgt, liegen die Werte bei SER und CAI bei 19.000 bzw. $2.900 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Um einen annähernden Wert für den unteren Rio Negro bei Manaus zu erhalten, wurden die Daten von SER und CAI mit einer Gewichtung von 6:1 zusammengeführt.

Tabelle 3. Ausgewählte Hauptkationen und -anionenkonzentrationen in RoBiMo-Trop Seenwässern im Vergleich zu Rio Negro (Schwarzwasser) und Amazonas/Solimões (Weißwasser) sowie Regenwasser aus eher abgelegenen Regionen der Tropen (Medianwerte und Bereiche; mg L^{-1}). Zahlen gerundet für mehr Klarheit

Lokation	Ca^{2+}	Fe^{3+}	K^+	Mg^{2+}	Mn^{2+}	Na^+
RoBiMo-Trop	2.52 (<0.1–14.6)	0.32 (0.03–9.56)	0.59 (0.15–8.3)	0.35 (0.09–3.95)	0.02 (0.00–2.35)	1.0 (0.46–5.3)
Weißwasser	$9.3^5 - 32.6^6$; 10.2 ± 2.6^7	$0.13 - 0.17^5$	$0.58 - 0.66^5$; 1.98^6 ; 0.97 ± 0.27^7	$1.1 - 9.1^5$ 4.42^6 ; 1.38 ± 0.29^7	$4.4 - 9.0^5$	$3.2^5 - 10.2^6$; 3.66 ± 1.38^7
Schwarzwasser	$0.42^5 - 0.71^6$; 0.58 ± 0.22^7	0.22^5	$0.30^5 - 1.41^6$; 0.54 ± 0.31^7	$0.14^5 - 0.22^6$; 0.22 ± 0.07^7	0.011^5	$0.40 - 1.21^6$; 0.83 ± 0.86^7
Kola Halbinsel ¹	0.05 (0.02–0.26)	<0.01 (<0.01–0.01)	0.05 (0.02–0.26)	0.02 (<0.01–0.04)	0.002 (0.000,5–0.006)	<0.1 (<0.1–0.13)
Borneo Regenwald ²	0.95 (0.28–17.3)	1.65 (0.63–1.71)	0.32 (0.04–6.7)	0.38 (0.13–3.5)	0.03 (0.016–0.045)	1.7 (0.22–46)
Malaysia Küste ³	2.2 (0.05–64)	0.04 (0.04–0.73)	1.4 (0.04–175)	0.99 (0.10–34)	0.04 (<0.00–1.2)	10 (0.20–314)
Samoa ⁴	0.63 (0.14–1.7)	n.d.	1.4 (0.70–3.7)	0.5 (0.18–1.2)	n.d.	1.6 (0.51–4.6)
Lokation	Si^+	Cl^-	NO_3^{2-}	SO_4^{2-}	HCO_3^-	EC
RoBiMo-Trop	2.3 (0.19–6.2)	0.58 (0.28–6.1)	0.71 (0.19–50)	0.58 (0.11–21.9)	n.d.	23 (6.9–149)
Weißwasser	$1.4 - 1.6^5$ 5.78^6 ; 9.49 ± 1.38^7	4.75^6 ; 3.90 ± 1.77^7	0.031^6	2.56^6 ; 4.32 ± 1.92^7	36.2 ± 8.24^7	$69^5 - 191^6$; 77 ± 18^7
Schwarzwasser	$0.33 - 3.35^6$; 5.31 ± 0.94^7	$0.85 - 1.28^6$; 0.32 ± 0.18^7	$0.014 - 0.11^6$	$0.61 - 4.2^6$; 0.26 ± 0.54^7	2.89 ± 1.66^7	$7.4^6 - 28^5$; 9.9 ± 4.7
Kola Halbinsel ¹	<0.1 (<0.1)	0.1 (<0.1–0.3)	0.45 (0.1–0.7)	0.8 (0.2–1.7)		0.8 (4–17)
Borneo Regenwald ²	n.d.	16.4 (12.8–69)	n.d.	n.d.	30.7 (9.2–59.5)	69 (48–88)
Malaysia Küste ³	n.d.	12.2 (0.10–356)	2.4 (0.01–425)	3.5 (0.01–187)	n.d.	0.68 (0.12–22)
Samoa ⁴	n.d.	1.5 (0.64–4.3)	2.0 (0.6–3.7)	2.0 (1.1–3.7)	n.d.	n.d.

Rainwater: ¹uncontaminated from Finland, Kola peninsula (Reimann et al. 1997); ² near coast from Limbang river catchment, Borneo (Valappil et al. 2020); ³coastal station, eastern Malaysia (Abdullah et al. 2022); ⁴near coast, Upolu Island, Samoa (Imo et al. 2021); **white and blackwaters in Amazonas:** ⁵Küchler et al. 2000 (see text); ⁶ Ríos-Villamizar et al. 2014; ⁷Moquet et al. 2016 (averages $\pm \sigma$; see text). n.d.: not determined

Spurenelemente

Die Spurenelemente im Seenwasser treten wiederum in eher sehr geringen Konzentrationen auf (Tabelle 4; umseitig). Die meisten Werte liegen nahe bei denen des Niederschlagswassers auf der Kola-Halbinsel (Reimann et al. 1997). Andere, vergleichsweise vollständige Daten (z.B. Wilkinson et al. 1997) zeigen bereits die Verschmutzung aus verschiedenen anthropogenen Quellen. Es gibt nur wenige

Arbeiten mit Multielementdaten für Amazonasgewässer. Nur sehr wenige Arbeiten enthalten genügend Metadaten, die es anderen ermöglichen, die Datenqualität zu verifizieren/falsifizieren. Die Autoren sind oft nicht mehr auffindbar. Da globale Durchschnittsdaten (z.B. Koljonen 1992) für den Vergleich mit den Süßgewässern des Amazonas-Bioms nur begrenzt geeignet sind, werden hier saubere Luftniederschlagsdaten aus der subpolaren Region der Kola-Halbinsel (Finnland) verwendet. Mit Ausnahme von Mn und Pb sind die Spurenmetallkonzentrationen im Kola-Niederschlag sogar niedriger als in den Seen des Amazonasbeckens, wenn auch nahe daran.

Balbina weist die niedrigsten absoluten Konzentrationen für die meisten Analyten auf (außer Ba, Cu, Li, Ni, Rb, Sr und V), und Lagoa Grande die höchsten. Die Unterscheidung zwischen Klarwasser-, Schwarzwasser- und Wildwasserseen ist deutlich, wobei das Wildwasser die meisten der höchsten Elementkonzentrationen aufweist. Diese Unterscheidung ist jedoch nicht sehr ausgeprägt. Im Einzelnen zeigt der Lagoa Grande seine binäre Zusammensetzung, die bei vielen Elementen zwischen denen des Schwarzwassertyps und der Iranduba-Wässer liegt (EC, pH, Al, As, Bi, Cd, Cu, Ga, Li, Mo, Rb, Sr, V). Dies gilt jedoch nicht für Ba, Ni und U, wo die Lagoa Grande ungewöhnlich hohe Werte aufweist.

Table 4. Spurenelemente in Seenwasser, Amazonas, Brasilien. Durchschnittskonzentrationen mit absoluter Standardabweichung (in $\mu\text{g L}^{-1}$), alles basierend auf ICP-QMS Analysen von Proben aus dem April 2022 (2. Kampagne). Zum Vergleich Niederschlagsdaten der Kola-Halbinsel (Median und Spreize) von Reimann et al. (1997)

	Klarwasser	Schwarzwasser		Weißwasser*		Niederschlag
Element	Balbina	Jandira	Caldeirão	Iranduba	Lagoa Grande	Kola [#]
EC	7	18	19	110	53	7 (4–28)
pH	6.7	5.9	6.0	6.8	6.5	4.8 (4.5–5.3)
Al	25±4	35±10	98±27	61±11	186±51	2.9 (0.9–8.6)
As	0.26±0.01	0.53±0.01	0.50±0.05	6.8±4.5	1.7±0.3	0.08 (<0.05–0.2)
Ba	10.5±0.5	7.7±0.6	59±45	91±47	168±69	0.59 (0.3–1.5)
Be	0.015±0.005	0.017±0.005	0.023±0.001	0.020±0.002	0.04±0.01	<0.1
Bi	0.030±0.005	0.034±0.003	0.030±0.005	0.13±0.10	0.15±0.01	<0.03
Cd	0.0095±0.0005	0.012±0.001	0.019±0.005	0.015±0.005	0.06±0.03	0.03 (<0.02–0.64)
Co	0.049±0.001	0.083±0.002	0.12±0.03	0.53±0.43	0.48±0.27	<0.02 (<–0.04)
Cr	0.48±0.01	0.54±0.03	0.69±0.06	0.54±0.11	0.52±0.01	<0.2
Cu	0.91±0.5	0.59±0.25	0.95±0.10	0.57±0.13	2.7±0.9	0.46 (0.2–2.1)
Ga	0.01±0.001	0.015±0.005	0.025±0.004	0.046±0.028	0.025±0.010	na
Li	0.25±0.03	0.15±0.02	0.20±0.06	1.39±0.04	0.72±0.14	<0.1 (<0.1–0.45)
Mn	3.4±0.9	16±2	9.0±1.4	37±35	105±62	2.9 (0.5–166)
Mo	0.064±0.007	0.06±0.01	0.071±0.007	0.18±0.10	0.138±0.002	<0.03
Ni	1.3±0.9	0.29±0.08	0.38±0.03	0.86±0.015	1.42±0.48	0.15 (<0.06–0.49)
Pb	0.07±0.01	0.09±0.04	0.19±0.10	0.067±0.04	0.74±0.47	0.7 (0.10–6.93)
Rb	3.2±0.1	0.53±0.02	0.92±0.07	9.94±0.04	3.74±0.58	0.32 (0.05–2.31)
Se	0.024±0.011	0.023±0.02	0.058±0.02	0.32±0.29	0.28±0.015	<0.5
Sr	4.5±0.8	3.3±0.1	4.9±0.3	63±4	22±2	0.24 (0.1–0.62)
Te	<0.015	<0.015	<0.015	<0.015	<0.015	na
Tl	0.011±0.001	0.006±0.002	0.009±0.001	0.010±0.003	0.014±0.03	<0.02
U	0.012±0.002	0.016±0.002	0.02±0.002	0.029±0.002	0.056±0.003	<0.01
V	0.298±0.005	0.24±0.04	0.86±0.4	0.52±0.22	0.86±0.44	0.13 (0.07–0.36)
Zn	67±50	421±130	650±150	622±100	700±72	8.4 (2.5–68.4)

*Lagoa Grande wird nicht allein vom Rio Solimoes beeinflusst (= Weißwasser) sondern auch vom Rio Negro (= Schwarzwasser). [#]Die Einzugsgebiete 7 und 8 (pristin) der Kola-Halbinsel wurden genutzt(Reimann et al. 1997)

Zwischenfazit. Die drei Süßwassertypen im Amazonas-Biom, Klarwasser, Schwarzwasser und Weißwasser (Rios-Villamizar et al. 2014) können anhand physikalisch-chemischer Daten, Haupt- und Nebenelemente unterschieden werden. Spurenelementdaten spiegeln diese Unterscheidung nicht eindeutig wider, bestätigen sie jedoch eher, als dass sie sie zurückweisen.

Sedimentchemie

In der ersten Kampagne (September 2021) wurden flache Sedimentkerne entnommen, einer aus jedem Becken. Diese Kerne wurden vor Ort in Scheiben geschnitten (in der Regel 1 cm große Abschnitte) und auf Haupt-, Neben- und Spurenelemente analysiert. In einigen Fällen mussten mehrere Zentimeter zusammengelegt werden, um genügend Masse für WD-XRF-Analysen mit gepressten Pulverpellets (PPP) und für Glasfusionsscheiben (GFD) zu erhalten.

Haupt- und Nebenelemente. Demnach unterscheidet sich Balbina deutlich von den beiden Várzea-Seen, und zwar sowohl bei den Haupt- als auch bei den Nebenelementen. Ein weiterer neuer Aspekt ist der Unterschied zwischen den Böden des Amazonas (Ferralsole/Oxisole) und den Sedimenten.

Tabelle 5. Haupt- und Nebenelementkonzentrationen (K) von Seesedimenten (Oberfläche) im Amazonasbecken

See K (wt-%)	Balbina Reservoir	Jandira L. (igapó)	Caldeirao L. (igapó)	Irاندوبا L. (várzea)	L. Grande (várzea)	BG _s	UCC
SiO ₂	88.0	47.7	51.1	62.0	50.0	66.3	66.6
TiO ₂	0.73	1.15	1.05	0.89	0.86	1.79	0.64
Al ₂ O ₃	6.0	23.9	22.3	14	18	13.7	15.4
Fe ₂ O ₃	5.37	7.85	5.93	6.37	8.59	3.81	5.6
MnO	0.026	0.039	0.032	0.10	0.06	0.01	0.10
MgO	0.15	0.71	0.90	1.52	1.36	0.095	2.48
CaO	0.04	0.24	0.31	1.27	0.79	0.025	3.59
Na ₂ O	<0.02	0.17	0.25	1.40	0.42	0.057	3.27
K ₂ O	0.26	0.87	1.09	1.98	1.81	0.065	2.80
P ₂ O ₅	0.07	0.18	0.19	0.15	0.18	0.047	0.15
C _t	2.57	6.17	6.84	0.94	7.93	1.9	
N	0.17	0.61	0.61	0.10	0.59	0.152	0.083
S	0.036	0.388	0.234	0.052	0.621	0.027	0.621

BG_s: Regional soil average (topsoil; Matschullat et al. 2022); UCC: Upper continental crust: Rudnick and Gao (2014)

Im Vergleich zur Bodenchemie (Terra Firme, BG_s) weisen Ca, Fe, K, Mg, Na (möglicherweise mit Ausnahme von Balbina), P und C_t, N und S (wiederum möglicherweise mit Ausnahme von Balbina) deutlich höhere Sedimentkonzentrationen auf, während für Bodenreste typische Residualelemente wie Ti in den Sedimenten verarmt sind. Die Ergebnisse zeigen, dass die Seen von Igapó und Várzea unterschiedliche geochemische Merkmale aufweisen, die sich jedoch nicht grundlegend unterscheiden. Die Sedimente des Várzea-Sees weisen höhere Ti-, Mn-, Mg-, Ca-, Na- und K-Konzentrationen, aber niedrigere Al-Werte auf.

Ähnlich wie die Wasserchemie und andere Parameter weisen die Sedimente des Balbina-Stausees eine ähnliche Sedimentchemie in Bezug auf empfindliche Basenkationen (Mg, Ca, Na, [K]) und P auf wie die umliegenden Terra Firme-Böden. Die Seen von Várzea zeigen eine relative Anreicherung dieser Komponenten und eine signifikante Verarmung nur bei TiO₂. Dies spiegelt wahrscheinlich den Eintrag von Basenkationen aus dem Abflusssystem des Solimões und die Rückhaltung von verwitterungsbeständigen Bodenbestandteilen wider.

Spurenelemente. Analog zur Wasserchemie sind qualitativ hochwertige Daten zur Spurenelementchemie von Böden und Gewässern im Amazonasbecken einerseits von einem, sehr begrenzten Elementumfang und auch oft von Qualitätsproblemen gekennzeichnet.

Mit einigen Ausnahmen (z. B. Cl, Zr) scheinen die Sedimente wesentlich höhere Spurenelementkonzentrationen zu liefern als die Böden (Terra Firme, BGs). Auch hier zeigen sich Unterschiede zwischen den Schwarz- und Weißwasserseen, während der Balbina Stausee in der Sedimentzusammensetzung eine eigene Gruppe bildet (Tabelle 6).

Tabelle 6. Selected trace elements (mg kg⁻¹) from surface sediments in the Amazonas basins

Lake C (mg kg ⁻¹)	Balbina Reservoir	Jandira (igapó)	Caldeirao (igapó)	Iranduba (várzea)	L. Grande (várzea)	BG _s	UCC
As	4.1	9.6	7.1	4.9	5.9	5.7	4.8
Ba	122	258	285	554 / 601	529 / 515	62	624
Cd	0.05	0.19	0.37	0.36	5.5	0.20	0.09
Ce	51	103	91	94	134	25	63
Cl	<30			72	64	0.62	370
Co	2.9	6.6	7.4	18	49 / 45	0.90	17.3
Cr	27 / 650	63	68	58 / 65	68 / 76	63	92
Cu	13.6	28	35	29 / 30	226 / 195	9.2	28
Dy	4.6	4.2	3.5	4.9	8.5	1.9	3.9
Er	3.4	2.8	2.1	2.8	4.7	1.4	2.3
Eu	0.81	1.7	1.1	1.6	2.7	0.32	1.0
Fe (wt-%)	3.18	4.25	3.41	4.13	4.54		
Gd	3.7	5.1	4.3	6.1	10.8	1.7	4.0
Ho	1.0	0.97	0.69	0.94	1.6	0.42	0.83
La	31 / 24.8	45	43	41	62 / 58	15	31
Lu	0.54	0.56	0.31	0.38	0.59	0.31	0.31
Nb	28			16	17	32	12
Nd	18.5	30	28	36	57	9.7	27
Ni	12.9	15	19	26	58	5.0	47
Pb	12.6	31	37	16 / 22	62 / 51	11	17
Pr	5.3	8.9	8.1	9.7	15	2.5	7.1
Rb	29 / 16.1	51	65	96 / 101	114 / 104	5.5	84
Sc	6.4	6.7	14	28	25	7.1	14
Sm	3.7	6.0	4.9	6.9	12	1.7	4.7
Sr	35 / 27.9	60	75	200 / 183	127 / 113	24	320
Tb	0.67	0.90	0.62	0.90	1.6	na	0.7
Th	15.8	22	18	13	17	17	10.5
Tl	0.14	0.47	0.56	0.75	1.5	0.04	0.9
Tm	0.54	0.55	0.31	0.41	0.64	0.25	0.3
U	3.6	3.0	2.9	2.9	4.4	3.1	2.7
V	46 / 40.8	112	138	117 / 123	190 / 181	77	97
Y	37 / 30.7	19	18	39 / 24	65 / 42	10	21
Yb	3.4	2.4	2.0	2.4	3.9	1.8	2.0
Zn	12 / 18.5	81	99	107 / 112	414 / 225	21	67
Zr	1030	n.d.	n.d.	298	171	1305	193

BG_s: Regional soil average (topsoil; Matschullat et al. 2022); UCC: Upper continental crust: Rudnick and Gao (2014)

Wesentlich ist der Vergleich der neuen Daten mit den sehr robusten Daten der oberen Erdkruste sowie dem regionalen Hintergrund (Tabelle 6); aus Terra Firme Oberbodenchemie ermittelt (Matschullat et al. 2022). In vielen Fällen zeigt sich eine deutliche Abreicherung.

Gasaustausch Gewässer

An jedem See wurden stets mindestens zwei Standorte tagsüber mit einem geschlossenen dynamischen Kammer-System (SEMACH-FG_{aqua}) untersucht, das auf einer schwimmenden Roboterplattform (MARF-FG) montiert war. Die Reproduzierbarkeit zwischen den Standorten war gut. Allerdings können die Unterschiede zwischen den Wiederholungen an einem Standort größer sein als die Unterschiede zwischen den Standorten. Einige Durchschnittsdaten (Median) zeigt Tabelle 7.

Tabelle 7. Durchschnittliche saisonale Spurengasflüsse am Tag (CO₂: mmol m⁻² h⁻¹; CH₄: μmol m⁻² h⁻¹; N₂O: μmol m⁻² h⁻¹); igapó: Schwarzwasser, várzea: Weißwasser

Lake	Saison	CO ₂	CH ₄	N ₂ O
Balbina reservoir	T 21	0.43	6.77	0.0078
	R 22	0.58	1.75	0.0363
	T 22	0.47	15.5	0.090
	R 23	0.22	10.5	0.123
	T 23	0.85	0.045	0.141
	soil	16.37	-2.84	8.64
Jandira (igapó)	T 21	27.67	543.1	0.676
	R 22	10.56	14.3	0.197
	T 22	3.35	387.0	0.227
	R 23	8.37	29.1	0.311
	T 23	13.4	0.38	0.076
	soil	17.95	-1.20	3.74
Caldeirão (igapó)	T 21	16.77	36.2	-0.010
	R 22	14.59	21.1	-0.016
	T 22	23.26	219.1	-0.100
	R 23	21.23	88.9	-0.143
	T 23	30.46	0.77	-0.316
	soil	20.90	-2.96	10.45
Iranduba (várzea)	T 21	18.71	668.9	-0.0119
	R 22	11.63	21.68	-0.077
	T 22	16.72	257.7	0.0002
	R 23	40.36	62.30	-0.431
	T 23	32.60	0.10	-0.347
	soil	18.69	1.38	0.813
L. Grande (várzea)	T 21	9.71	84.1	0.102
	R 22	17.22	9.23	-0.254
	T 22	na	na	na
	R 23	na	na	na
	T 23	na	na	na
	soil	27.52	-6.29	3.669
Median	Wasser	14.0	21.4	0.004
Median	Boden	18.7	-2.84	3.74

Der Balbina-Stausee zeigte minimale CO₂-Abgabe ohne jahreszeitlich relevante Schwankung, während alle anderen Seen deutliche Emissionen ebenfalls ohne jahreszeitliche Differenzierung aufwiesen. Die Weißwasserseen wiesen geringfügig niedrigere Flüsse auf als die Schwarzwasserseen. Die durchschnittliche Flussrate über alle Seen und beide Jahreszeiten betrug etwa 14 mmol CO₂ m⁻² h⁻¹, was etwa 5 μmol CO₂ m⁻² s⁻¹ entspricht und ziemlich genau im Wertebereich von Oertel et al. (2016) liegt.

Eine kürzlich erschienene Veröffentlichung mit Beispielen aus Seen und Stauseen der nördlichen Hemisphäre (Golub et al. 2022) deutet auf erheblich höhere nächtliche Emissionen im Vergleich zum Gasaustausch am Tag hin. Wenn ein solches tageszeitliches Verhalten unter feuchten tropischen Bedingungen zuträfe, müssten wir auch nachts wesentlich höhere CO₂-Emissionen feststellen. Wir haben diese Hypothese im März 2023 getestet und konnten sie nicht bestätigen. Im Gegensatz dazu waren die Gasflüsse aus einigen Wasserkörpern in der Nacht tendenziell niedriger (Tabelle 8; S. 14).

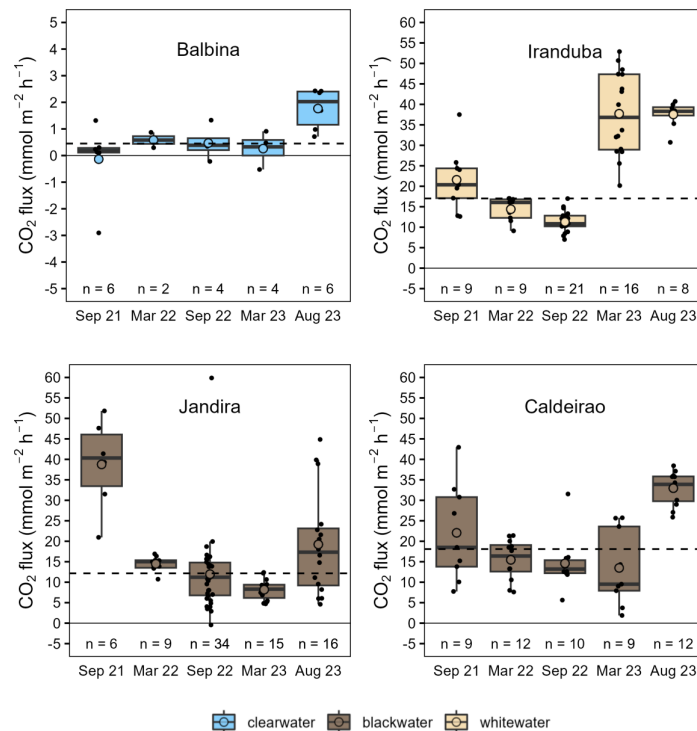


Abb. 3. CO₂-Gasflüsse der drei Seentypen. L. Grande wegen zu geringer Wiederholungen nicht dargestellt

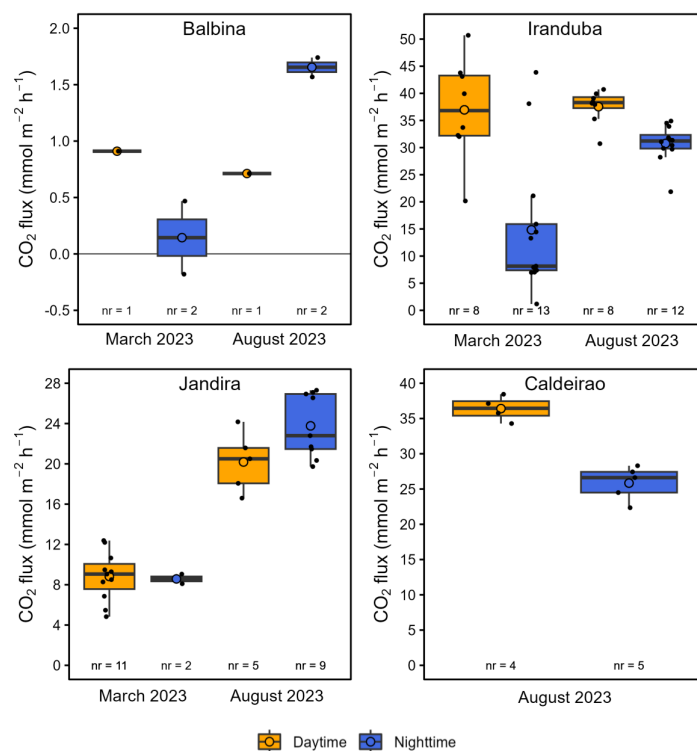


Abb. 4. Tag/Nacht CO₂-Flüsse der drei Seentypen

Methan. An allen Standorten wurden Methanemissionen (positive Flüsse) festgestellt. Diese waren im Allgemeinen in der Trockenzeit höher. Die Mittelwerte variieren stark zwischen allen Standorten. Balbina (T: $7 \mu\text{mol m}^{-2} \text{h}^{-1}$; R: $2 \mu\text{mol m}^{-2} \text{h}^{-1}$); Jandira (T: $500 \mu\text{mol m}^{-2} \text{h}^{-1}$; R: $15 \mu\text{mol m}^{-2} \text{h}^{-1}$); Caldeirão (T: $70 \mu\text{mol m}^{-2} \text{h}^{-1}$; R: $15 \mu\text{mol m}^{-2} \text{h}^{-1}$); die beiden letztgenannten igapó-Seen. Iranduba (T: $1000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{h}^{-1}$; R: $20 \mu\text{mol m}^{-2} \text{h}^{-1}$); Lagoa Grande (T: $100 \mu\text{mol m}^{-2} \text{h}^{-1}$; R: $10 \mu\text{mol m}^{-2} \text{h}^{-1}$); diese beiden sind Várzea-Seen. So lagen die Durchschnittswerte in der Regenzeit zwischen 2 und $20 \mu\text{mol m}^{-2} \text{h}^{-1}$; in der Trockenzeit zwischen 7 und $1000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{h}^{-1}$. Auch diese Werte liegen innerhalb der sehr großen Spanne, die in Oertel et al. (2016) angegeben ist.

Lachgas. Die Reaktionen der Wasserkörper variierten stark zwischen den Jahreszeiten und Standorten. In der Regenzeit waren sie meist geringer. Balbina (T: $0,075 \mu\text{mol m}^{-2} \text{h}^{-1}$; R: $0,035 \mu\text{mol m}^{-2} \text{h}^{-1}$); Jandira (T: $0,7 \mu\text{mol m}^{-2} \text{h}^{-1}$; R: $0,2 \mu\text{mol m}^{-2} \text{h}^{-1}$); Caldeirão (T: $-0,1 \mu\text{mol m}^{-2} \text{h}^{-1}$; R: $-0,05 \mu\text{mol m}^{-2} \text{h}^{-1}$); die beiden letzteren igapó-Seen. Die beiden Várzea-Seen Iranduba (T: $-0,2 \mu\text{mol m}^{-2} \text{h}^{-1}$; R: $-0,1 \mu\text{mol m}^{-2} \text{h}^{-1}$) und Lagoa Grande (T: $0,2 \mu\text{mol m}^{-2} \text{h}^{-1}$; R: $-0,3 \mu\text{mol m}^{-2} \text{h}^{-1}$) gaben in der Trockenzeit teilweise Gas ab und nahmen nur in der Regenzeit Gas auf. So lagen die Mittelwerte in der Regenzeit zwischen $-0,05$ und $0,2 \mu\text{mol m}^{-2} \text{h}^{-1}$; in der Trockenzeit zwischen $-0,2$ und $0,7 \mu\text{mol m}^{-2} \text{h}^{-1}$, Bereiche, die wiederum innerhalb der in Oertel et al. (2016) genannten Datenspreize liegen.

Tabelle 8: Durchschnittliche Gasflüsse tagsüber versus Nachts

Lake	Time	CO ₂	CH ₄	N ₂ O
Balbina reservoir	Tag 1	0.26	11.0	0.00
	Nacht 1	0.15	10.3	0.37
	Tag 2	0.87	45.9	0.14
	Nacht 2	1.67	61.1	0.19
Jandira (igapó)	Tag 1	9.76	35.8	0.33
	Nacht 1	8.60	24.1	0.37
	Tag 2	13.4	0.4	0.08
	Nacht 2	22.1	771	0.50
Caldeirão (igapó)	Tag 1	21.2	88.9	-0.14
	Nacht 1	na	na	na
	Tag 2	30.5	775	-0.32
	Nacht 2	26.1	179	-0.60
Iranduba (várzea)	Tag 1	33.5	87.1	-0.32
	Nacht 1	49.6	29.2	-0.59
	Tag 2	32.8	103.6	-0.31
	Nacht 2	29.9	46.2	-0.28
Avg. day	Tag	18.4	16.0	-0.09
Avg. night	Nacht	19.7	16.9	-0.04

Zwischenfazit. Die entwickelte Technik erlaubt sehr ortstabile und reproduzierbare Positionierung des Kammersystems und damit auch der Gasprobenahme. Das war bislang nicht so erreichbar. Zudem sind nun auch Messungen während der Nacht problemlos machbar, was aus Sicherheitsgründen zuvor nicht gemacht werden konnte. Die Nachtdaten aller drei Gase zeigen geringfügig höhere Werte als die Tagesdaten. Allerdings ist der Datensatz noch so klein, dass es unverantwortbar ist, daraus allzu große Schlüsse ziehen zu wollen.

4. Diskussion

Wassersäule/Hydrographie. Die hydrographischen Profile zeigen die grundsätzlich andere Charakteristik dieser tropischen Seen im Vergleich zu temperierten Stillgewässern. Die hohen Temperaturen verbunden mit der auch dadurch stark reduzierten Sauerstoffversorgung erzwingt radikal andere Randbedingungen für Biota aller Art. Dazu kommt die sehr hohe Strahlung; auch bei bedecktem Himmel, die vor allem Neston und Pleuston sowie oberflächennah treibenden Algen (Phytoplankton)

große Anpassungsleistungen abverlangt. Unter den Randbedingungen des Klimawandels gerade auch im äquatornahen Bereich wird dies große Herausforderungen für die aquatische Lebewelt stellen.

Wasserchemie. Die wasserchemischen DOC-Daten passen gut zu den globalen Daten von Toming et al. (2020); sie liegen etwas unter dem globalen Durchschnitt. Die Hauptanionen und -kationen scheinen eine größere Spreizung als die publizierten Daten aufzuweisen (Tabelle 3), passen jedoch in ebenfalls „ins Bild“. Spannend ist die teilweise klare Differenzierung der drei Wassertypen (Klar-, Schwarz- und Weißwasser) durch ihre chemischen Signaturen. Dies zeigt sich wiederum bei den Spurenelementen (Tabelle 4), wenngleich weniger deutlich.

Sedimentchemie. Sedimente der Seenkörper wurden aus naheliegenden Gründen (keine zu erwartende Dynamik) nur einmal genommen und im Folgenden analog zu den Böden in früheren Projekt EcoRespira-Amazon (Matschullat et al. 2023) differenziert nach Haupt-, Neben- und Spurenelementen mit einem sehr großen Parameterumfang hochauflösend erfasst (Tabellen 5 und 6). Wesentlich erscheint die Erkenntnis, dass die sich fortsetzende Verarmung der Böden (Entwaldung) mit einer relativen Anreicherung derselben Komponenten in den Sedimenten zeigt. Die Sedimente des Lagoa Grande sind offensichtlich anthropogen kontaminiert. Was diese Belastung verursacht hat, konnte leider bislang nicht aufgeklärt werden.

Gasaustausch. Während der Klarwassersee Balbina quasi treibhausgasneutral ist – ganz im Gegensatz zu den 1980er und frühen 1990er Jahren, als er als große THG-Quelle identifiziert wurde, bilden die anderen untersuchten Seen eindeutige Quellen sowohl von CO₂ als auch von Methan. Lachgas spielt bei keinem der Seen eine bedeutsame Rolle. Wesentlich erscheint die Erkenntnis, dass die Gewässer keine höheren Emissionen erzeugen als die Böden in deren Einzugsgebieten. Nicht minder spannend sind die ersten Daten aus der leider noch sehr begrenzten Zahl nächtlicher Probenahmeaktionen. Hierzu sollten unbedingt weitere Kampagnen stattfinden, um die erhaltenen auf eine robustere Basis zu stellen und zu falsifizieren, dass es sich dabei um Zufallsdaten handelt.

Die folgende Diskussion greift die eingangs formulierten Hypothesen auf und diskutiert sie auf der Grundlage der „letzten“ 5. Kampagne.

Können wir zwischen Klarwasser-, Schwarzwasser- und Wildwasserseen in Bezug auf Wasserchemie und Gasaustauschverhalten unterscheiden – angesichts teilweise widersprüchlicher Vorstellungen in der Wissenschaft? Die einfache Antwort lautet „ja“, während sie im Detail nicht ganz so eindeutig ist. Während der künstliche Klarwasserspeicher Balbina in den Dimensionen des Wasserkörpers (Wasservolumen, maximale Tiefe, etc.) heraussticht, unterscheidet sich sein Wasser deutlich von allen anderen Becken. Die elektrische Leitfähigkeit ist sehr niedrig ($<10 \mu\text{S cm}^{-1}$), die Sichtweite hoch (Durchschnitt: 3,2 m), der pH-Wert des Oberflächenwassers ist in der Trockenzeit tendenziell etwas höher als in der Regenzeit und Sauerstoff ist bis in größere Tiefen ($> 3 \text{ m}$) verfügbar. Im Gegensatz dazu weisen die Schwarzwasserseen Caldeirão und Jandira deutlich höhere EC-Werte ($\leq 25 \mu\text{S cm}^{-1}$), eine viel geringere Sichtweite (Durchschnitt: 1,2 m) und eine ähnliche pH-Dynamik auf, während der Sauerstoff ab etwa 1,5 m Wassertiefe abnimmt. Die Weißwasserseen wiesen die bei weitem höchste elektrische Leitfähigkeit (etwa $100 \mu\text{S cm}^{-1}$), eine ähnliche Sichtweite wie die Schwarzwasserseen und eine ähnliche Sauerstoffverarmung auf. Ebenso weisen Klarwasserseen die geringste und Weißwasserseen die höchsten Gasemissionsraten auf.

Wie sehen die Gasaustauschsignaturen tropischer Seen aus? Unterscheiden sich diese von denen gemäßigter Seen? Bei einer Tendenz zu höherem Gasaustausch, der allein über die Temperatur (Henry-Gesetz) erklärbar sein sollte, sind die Emissionen dennoch ähnlich.

Gibt es einen Unterschied zwischen dem Gasaustausch von Terra Firme-Böden und dem Gasaustausch in der Wassersäule von Seen, und wenn ja, wie? Nach den bisherigen Erkenntnissen weist der Gasaustausch im Seewasser ähnliche Werte auf wie der von Terra Firme-Böden (Projekt EcoRespira-

Amazon). Allerdings suggerieren die erhobenen Daten, dass entwaldete Böden eher eine noch höhere Emission aufweisen als die Gewässer.

Welchen Beitrag leisten Überschwemmungsgebiete und Seen in den inneren feuchten Tropen wahrscheinlich zur globalen Treibhausgasbilanz? Wie aus der vorangegangenen Frage ersichtlich, bestätigen die untersuchten tropischen Seen und Becken nicht die Hypothese, dass Wasserkörper aus den inneren feuchten Tropen ein größeres positives Rückkopplungssignal liefern als ihre Böden. Es scheint jedoch wahrscheinlich, dass bei noch extremeren Nass-Trocken-Bedingungen und einer allgemeinen Verringerung des verfügbaren Wassers in den Becken (weniger Niederschläge, mehr Trockenheit) die Sauerstoffverarmung noch ausgeprägter wird und gleichzeitig das derzeit in den Sedimenten und organischen Oberflächenschichten des Sees gebundene Methan oxidiert und freigesetzt wird - wodurch der allgemeine Treibhauseffekt verstärkt wird.

Nachts ermittelte THG-Flüsse deuten auf geringere Emissionen hin als tagsüber. Die Gründe für dieses kontraintuitive Verhalten sind noch nicht klar. Man würde höhere Emissionen in der Nacht erwarten, da die Algengemeinschaften und die gesamte Nahrungskette ihren Stoffwechsel verlangsamen und die Wasser- und Lufttemperaturen um einige Grad Celsius sinken. Unabhängig von der Art des Sees stellen wir jedoch bei wiederholten nächtlichen Messungen eine Verringerung des Gasaustauschs fest, und zwar unabhängig von der Jahreszeit.

Können wir aus den wasser- und sedimentchemischen Daten Empfehlungen für ein Seenmanagement ableiten? Außer für den Balbina-Stausee scheint es kein übergreifendes Seenmanagement zu geben. Das Land um alle anderen Seen ist in Privatbesitz und wird unterschiedlich genutzt. Während einige Leute Bäume und andere Vegetation direkt am Seeufer abholzen, lassen andere die Vegetation bis auf einen gewissen Zugang zu den Seen stehen. Die Menschen pumpen regelmäßig das Oberflächenwasser der Seen ab, um Wasser für die Gartenarbeit und die Landwirtschaft zu gewinnen. Die Fischerei ist eine weitere extensive Form der Wassernutzung im See – scheinbar ohne Regulierung. Je nach individuellem Verhalten kommt es zu einer mehr oder weniger starken Verschmutzung (Ableitung von Abfällen) der Gewässer.

Es erscheint wünschenswert, eine regelmäßige Überwachung des Seewassers zu installieren und die Landnutzung im Uferbereich und die damit verbundenen Bautätigkeiten zu kontrollieren. Idealerweise wachsen Bäume direkt an den Rändern aller Seen, spenden den notwendigen Schatten, verringern die Verdunstungsverluste und erhalten die Sauerstoffverfügbarkeit.

Inwieweit wurden die Ziele erreicht?

Die im Antrag formulierten Ziele wurden allesamt erreicht, beziehungsweise konnte deutlich mehr erreicht werden als wir erwartet hatten.

Woraus ergaben sich Abweichungen (Probleme, Veränderungen von Strategie oder Methoden)

Die einzige Abweichung bestand darin, dass wir nach einmaliger Beprobung kommerzieller Fischteiche im Bereich der Stadt Rio Preto da Eva und der Auswertung des Materials keine weiteren Arbeiten an Fischteichen mehr durchführten, weil diese artifiziellen Systeme keine natürliche Dynamik aufweisen (können) und daher wissenschaftlich weniger erhebliches Material brachten.

Methodisch entwickelten wir die angewandten Techniken von Kampagne zu Kampagne weiter. Die Veränderungen bezogen sich allerdings einzig auf die Technik (zusätzliche Sensoren, zunehmende Autonomie der Plattform MARP-FG), nicht auf die eigentlichen Daten.

Wie gestaltete sich die Arbeit mit den Kooperationspartnern?

Der Antragsteller ist mit den Kooperationspartnern im Sinne der Institution sowie mit einem Teil der Personen schon seit 2015 enger vertraut. Trotz Personalwechsel in der Spitze der Institution wurde für

Kontinuität und gleichbleibende Unterstützung sowohl personell als auch infrastrukturell (Zugang, Allradfahrzeuge, etc.) gesorgt. Auch alle Vorträge und Publikationen wurden und werden gemeinsam erarbeitet. Im Fazit also äußerst positiv (und tatsächlich unerlässlich).

5. Öffentlichkeitsarbeit

Mit Projektbeginn wurde eine Webseite aufgebaut, um über das Projekt und seinen Fortschritt berichten zu können. Bedauerlicherweise sind alle entsprechenden Arbeiten durch den professionellen Hackerangriff gegen die TU Bergakademie Freiberg im Januar 2023 zunichte gemacht worden – alle Dateien wurden zerstört. Eine neue Webseite ist derzeit im Aufbau.

Bei jeder der Geländekampagnen in Brasilien fand gegen Ende ein (teil)öffentlicher Workshop statt. Dazu wurden Vertreter:innen von Behörden und Forschungseinrichtungen sowie den lokalen Universitäten eingeladen. Durch die Pandemie war die Resonanz mit ca. 20 bis 50 Teilnehmenden geringer als erwartet.

Im März 2022 konnte ein Fotojournalist (Eckart Mildner) die gesamte Geländekampagne auf eigene Kosten begleiten. Parallel dazu druckte die Freie Presse in Sachsen (etwa 400.000 Leser:innen) täglich Bilder und Berichte des Projektfortschritts.

Über den gesamten Projektzeitraum berichteten deutsche und brasilianische Presseorgane (Radio, Zeitungen) immer wieder über das Projekt.

Die beteiligten Wissenschaftler:innen trugen und tragen weiterhin auf Tagungen national wie international zum Projekt vor (Brasilien, Costa Rica, Deutschland, Mexico, Österreich, Panama). Zugleich laufen aktuell Anträge, um die Arbeiten fortführen zu können.

6. Fazit

Mit erfreulich geringem materiellen und Kostenaufwand konnte innerhalb sehr kurzer Zeit in stetiger Rückkopplung zwischen wissenschaftlicher Datenakquise und technischer Weiterentwicklung eine robuste, vielseitig einsetzbare autonome aquatische Plattform entwickelt und kontinuierlich getestet werden. Diese Plattform wird in wiederum modifizierter Form inzwischen bereits in Projekten in Deutschland (mit BGR, LTV Sachsen und LMBV) eingesetzt. Die dabei eingesetzten Nutzlasten sind neben dem Kammerssystem ein Sonar zur autonomen, hochauflösenden dreidimensionalen Gewässerbeckenvermessung sowie ein System zur automatischen Erfassung hydrographischer Profile; aktuell bis zu einer Wassertiefe von 50 Metern. Das wäre ohne das DBU-Projekt nicht möglich gewesen.

Ebenso undenkbar wären nächtliche Messungen auf innertropischen Seen im Amazonasgebiet gewesen, weil nächtliche Arbeiten für Menschen zu riskant und damit nicht verantwortbar sind. Eine robotische Lösung ist hier – wie bei zahlreichen weiteren Anwendungen – die ideale Konstellation.

Schließlich gelang es, die Plattformentwicklung bis zur Praxisreife zu bringen und neue, tatsächlich reproduzierbare Daten aus Trocken- und Regenzeiten der inneren feuchten Tropen zum Treibhausgas Austausch ebenso wie zu wasserchemischen und physikalischen Parametern zu gewinnen – ein spürbarer Erkenntnisfortschritt, der aktuell publiziert wird (Matschullat et al. 2024; Zug et al. 2024). Wir danken der Deutschen Bundesstiftung Umwelt für diese wunderbare Möglichkeit, unsere Ideen entwickeln und erfolgreich testen zu können.

Hat sich die Vorgehensweise bewährt? Eindeutig ja. Gerade bei Arbeiten außerhalb des eigenen Landes ist es wesentlich, sich sowohl sprachlich als auch kulturell auf die anderen Randbedingungen einstellen zu können – und eine Vertrauensbasis aufzubauen, die trägt. Das ist hier vollumfänglich gegeben. Unabhängig vom formalen Projektende ist eine Änderung der Zielsetzung nicht notwendig. Wünschenswert wären allerdings eine großzügigere Finanzierung ebenso wie Versteigerung von Umweltmonitoring auch jenseits von Großprojekten wie dem ATTO (MPI-BGC) oder der herausragenden

Fernerkundung Brasiliens über die INPA. Hier klappt eine schmerzliche Lücke. Mit erheblich viel geringeren Mitteln als in Deutschland ließen sich in Brasilien leistungsfähige Strukturen aufbauen und erhalten. Das ist keine Aufgabe für die DBU, sondern eine Anregung für das Auswärtige Amt.

Literaturangaben

- Abdullah SNF, Ismail A, Juahor H, Ahmad RB, Lananan F, Hashim NM, Ariffin N, Zali MAS, Mohd TAT, Hussin MHF, Mahmood RISR, Jamil JRA, Desa SM (2022) Chemical composition of rainwater harvested in East Malaysia. *Environ Eng Res* 27, 2: 14 p; doi 10.4491/eer.2020.508
- Golub M, Koupaei-Abyazani N, Vesala T, Mammarella I, Ojala A, Bohrer G, Weyhenmeyer GA, Blanken PD, Eugster W, Koebisch F, Chen J, Czajkowski K, Deshmukh C, Guérin F, Heiskanen J, Humphreys E, Jonsson A, Karlsson J, Kling G, Lee X, Liu H, Lohila A, Lundin E, Morin T, Podgrajsek E, Provenza M, Rutgersson A, Sachs T, Sahlée E, Serça D, Shao C, Spence C, Strachan IB, Xiao W, Desai AR (2023) Diel, seasonal, and inter-annual variation in carbon dioxide effluxes from lakes and reservoirs. *Environ Res Lett* 18: 034046; doi 10.1088/1748-9326/acb834Imo et al. (2021)
- Koljonen T: The geochemical atlas of Finland. Part 2: Till. Espoo, Finland: Geological Survey of Finland; 1992:218
- Küchler IL, Miekely N, Fosberg BR (2000) A contribution to the chemical characterization of rivers in the Rio Negro Basin, Brazil. *J Braz Chem Soc* 11, 3: 286-292
- Matschullat J (2022) Modell für Extremwetter: Messroboter im Regenwald. *Gefahrstoffe – Reinhaltung der Luft* 03-04: 82
- Matschullat J (2022) Binnengewässer von Grund auf erfassen. *EUZeit* 1: 12 (ISSN 2363-6017)
- Matschullat J (2023) Taking the pulse of nature – How robotics and sensors assist in ecosystem management. Invited keynote lecture APANAC 2023, Panama City, Panama September 2023
- Matschullat J, Zug S (2023) Robotics and sensor-based environmental studies in the inner wet tropics. Invited talk at UFAM Workshop Conference, Manaus, Brazil, December 2023
- Matschullat J, Adam SMP, Börner E, Dobrovsky L, Dreier O, Fieback T, Jarosch L, Joseph Y, Lau M, Licht G, Pose S, Röder E, Scheytt T, Zug S (2022) Robotisches Binnengewässermonitoring (RoBiMo). *Neue Perspektiven für Vorsorge, Sicherheit und Forschung. Acamonta* 29: 43-46
- Matschullat J, Röder E, Börner E, Coimbra Martins G, Licht G, Lau M, Monteiro de Bezerra Lima R, Zug S (2022) Was lehren uns Gewässer der feuchten Tropen für Mitteleuropa? *Forum Geoökologie* 32, 3: 25–29 (ISSN 0939 6632)
- Matschullat J, Bezerra de Lima RM, Börner E, Röder E, Adam S, Licht G, Coimbra Martins G, Lau M, Schwatke C, Zug S (2024) CO₂ exchange in tropical lakes – How robotics is improving our understanding of lake dynamics. *Environ Sci Technol*, in Vorbereitung
- Moquet JS, Guyot JL, Crave A, Viers J, Filizola N, Martinez JM, Oliveira TC, Hidalgo Sánchez LS, Lagane C, Lavado Casimiro WS, Noriega L, Pombosa R (2016) Amazon River dissolved load: temporal dynamics and annual budget from the Andes to the ocean. *Environ Sci Pollut Res* 23: 11405-11429
- Reimann C, de Caritat P, Halleraker JH, Volden T, Äyräs M, Niskavaara H, Chekushin VA, Pavlov VA (1997) Rainwater composition in eight Arctic catchments in northern Europe (Finland, Norway and Russia). *Atmos Environ* 31, 2: 159-170; doi 10.1016/1352-2310(96)00197-5
- Ríos-Villamizar EA, Piedade MTF, Da Costa JG, Adeney JM, Junk WJ (2014) Chemistry of different Amazonian water types for river classification: A preliminary review. *Water and Society* 1178: 17-28; doi: 10.2495/WS130021
- Röder E, Lau M, Jarosch L, Rau A, Matschullat J (2022) Greenhouse gas exchange from artificial water bodies that dominate Central Germany. *SIL 2022 presentation*, Berlin
- Rudnick RL, Gao S (2014) Composition of the continental crust. In: Holland HD, Turekian KK (eds) *Treatise on Geochemistry*, Elsevier, Oxford, 1-51; doi 10.1016/B978-0-08-095975-7.00301-6
- Spank U, Mauder, Matschullat J, Licht G, Koschorreck M (2023) Mobile eddy covariance measurements as a key to improve estimates of momentum, mass and energy fluxes between atmosphere and inland waters. 25th Workshop on Physical Processes in Natural Waters, Brescia, Italy, 19-23 June, 2023
- Toming K, Kotta J, Uuemaa E, Sobek S, Kutser T, Tranvik LJ (2020) Predicting lake dissolved organic carbon at a global scale. *Nature Sci Rep* 10: 8471; doi 10.1038/s41598-020-65010-3
- Valappil NKM, Viswanathan PM, Hamza V (2020) Chemical characteristics of rainwater in the tropical rainforest region in northwestern Borneo. *Environ Sci Pollut Res* 27: 36994-37010; doi 10.1007/s11356-020-09542-1

Wilkinson J, Reynolds P, Neal C, Hill S, Neal M, Harrow M (1997) Major, minor and trace element composition of cloudwater and rainwater at Plynlimon. Hydrol Earth Sys Sci 1, 3: 557-569; doi 10.5194/hess-1-557-1997
Zug S, Licht G, Börner E, Bezerra de Lima RM, Matschullat J (2024) Taking the pulse of nature – How robotics and sensors assist in lake and reservoir management. JEMS (under review)

Anlagen

Diese werden ausschließlich in digitaler Form zur Verfügung gestellt.

- Tagebücher RoBiMo-Trop 01 bis 05
- Pressebegleitung des Projektes im Amazonas
- Auswahl von Fotos aus dem Projekt