

AMAZONIANA	IX	3	371 – 409	Kiel, Dezember 1985
------------	----	---	-----------	---------------------

Aus der Zusammenarbeit zwischen Max-Planck-Institut für Limnologie, Arbeitsgruppe Tropenökologie, Plön, Deutschland, und Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, Manaus – Amazonas, Brasilien

From cooperation between Max-Planck-Institute for Limnology, Working group "Tropical Ecology", Plön, West Germany, and Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, Manaus – Amazonas, Brazil

Hydrogeochemie von Fließgewässern im Bereich der Transamazônica (Nordbrasilien)

von

Karin Furch

Dr. Karin Furch, Max-Planck-Institut für Limnologie, AG Tropenökologie, Postfach 165,
D - 2320 Plön/Holstein, West Germany.

(zum Druck angenommen: Oktober 1985)

Hydrogeochemistry of freshwaters crossed by the Transamazon highway, Northern Brazil

Abstract

In the context of the comprehensive study of the hydrogeochemistry and classification of Amazon freshwaters, 80 rivers crossing the E-W transect of the Transamazon highway, between Altamira and Humaitá (Brazil) were analysed (pH, specific conductance, suspended solids, color, alkalinity, Cl, SO₄, Na, K, Mg, Ca, Ba, Sr, Al, Fe, Mn, Cu, Si, C_{org}, NH₄, and PO₄).

The chemical data were evaluated and discussed under the following headings:

- average content of major and trace elements compared to the world average.
- relative dominance of major ions compared to the percentages of sum components of major cations and anions, respectively,
- use of MAUCHA diagrams to depict the major ionic environment,
- frequency distribution of major and trace elements and their relation to Amazonian and world scales,
- variability of major and trace element content along the transect in relation to the geological conditions in the respective watersheds,
- comparison of chemical characteristics of groups of waters from geologically different watersheds with their significant differences.

The results are fully described and presented in 16 figures and 7 tables.

Keywords: Water chemistry, major and trace elements, Amazonian freshwaters, geology, classification of water types.

Die Autorin widmet diese Arbeit Herrn Prof. Dr. Harald Sioli zu seinem 75. Geburtstag.

0065-6755 / 1985 / 371 / © MPI für Limnologie, AG Tropenökologie, Plön; INPA, Manaus

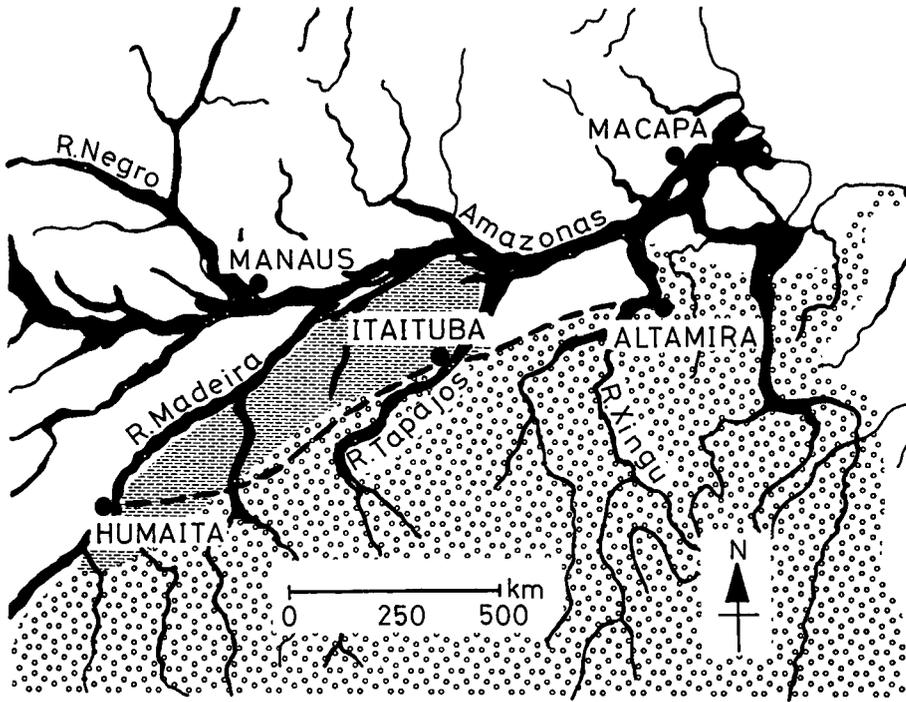


Abb. 1:
Verlauf der Transamazônica zwischen Altamira und Humaitá mit Angaben über die Verbreitung des Zentralbrasilianischen Schildes (gepunktet) und der Formação Solimões (gestrichelt).

Fig. 1:
Transamazon highway between Altamira and Humaitá with the extent of the Central Brazilian Shield (dotted area) and the Solimões Formation (dashed line area).

Material und Methoden

Von 80 Fließgewässern (Bäche, Flüsse, Ströme), die das ca. 1500 km lange Transamazônica-Transect zwischen Humaitá und Altamira kreuzen, wurden während der Trockenzeit Wasserproben entnommen. Messungen des pH-Wertes und der spezifischen Leitfähigkeit wurden mit Feldgeräten (WTW) unmittelbar nach der Probenahme vorgenommen. Die chemische Analyse der Wasserproben wurde später im Max-Planck-Institut für Limnologie durchgeführt. Nachfolgend findet sich eine Übersicht über die verwendeten Methoden. Detailliertere Angaben hierzu finden sich bei FURCH (1976, 1984).

Parameter

Na, K, Mg, Ca
Ba, Sr, Al, Fe, Mn, Cu
Si, SO₄, NH₄, PO₄
Alkalinität
C_{org}.
Cl
Schwebfracht
Farbwert (Hazen)

Methoden

Flammen-AAS (Perkin Elmer)
flammenlose AAS (Perkin Elmer)
spektrophotometrisch (Autoanalyzer, Technicon)
potentiometrische Titration (Metrohm) mit 0,02N HCl
C-Analyzer (Beckman)
Titration mit AgNO₃ mit K₂CrO₄ als Indikator (HÖLL 1970)
Membranfiltration (0,45 µm, Sartorius)
Test-Satz (Merck, Nr. 14421)

Ergebnisse und Diskussion

1. Allgemeine chemische Charakterisierung der Fließgewässer

Um eine erste Übersicht über die chemischen Eigenschaften der im Bereich des Transamazônica-Transekts angetroffenen Fließgewässer zu geben, werden die Durchschnittswerte für ihre Gehalte an Hauptkationen und -anionen und deren prozentuale Verteilung mit dem "Weltdurchschnittswasser" (Weltdurchschnitt, LIVINGSTONE 1963) verglichen (Abb. 2). Die Unterschiede zwischen den amazonischen Gewässern und dem Weltdurchschnitt sind erheblich sowohl bezüglich des Hauptionengehaltes als auch bezüglich der Ionenproportionen. Verglichen mit dem Weltdurchschnitt sind die untersuchten amazonischen Gewässer gekennzeichnet durch

- einen um ein Vielfaches geringeren Gehalt an Hauptkationen und Hauptanionen,
- eine stark abweichende prozentuale Verteilung der Hauptkationen, die in erster Linie auf einen sehr viel niedrigeren Ca-Anteil und einen sehr viel höheren K-Anteil zurückzuführen ist und
- eine geringe Abweichung in der prozentualen Verteilung der Hauptanionen, die durch einen niedrigeren SO_4 - und einen höheren Cl-Anteil gekennzeichnet ist.

Hinsichtlich der Verteilung der Hauptkationen zeigen sich also auch die Gewässer aus dem Transamazônica-Bereich, gemessen an ihren Durchschnittswerten, als "typische" Vertreter amazonischer Gewässer. Auf die Ionenarmut und insbesondere auf die mehr oder minder extreme Ca-Armut ist schon bei einer Vielzahl amazonischer Gewässer hingewiesen worden (SIOLI 1954b, 1968; FITTKAU 1964, 1967, 1971; SCHMIDT 1972; BRINKMANN & DOS SANTOS 1973; FURCH 1976, 1984, im Druck; GEISLER & SCHNEIDER 1976; FURCH & KLINGE 1978; FURCH & JUNK 1980; STALLARD 1980; BRINKMANN 1981; FURCH et al. 1982; STALLARD & EDMOND 1983; GEISLER & ANNIBAL 1984). Hinsichtlich der Anionenverteilung sind die Kenntnisse über amazonische Gewässer weitaus begrenzter. Zwar wurde verschiedentlich in Verbindung mit der generellen Ionenarmut auch auf die HCO_3 -Armut bzw. die darauf basierende schwache Pufferkapazität vieler amazonischer Gewässer verwiesen (SIOLI 1954b, 1968a, b; KLINGE & OHLE 1964; MARLIER 1967; SCHMIDT 1968, 1972; GIBBS 1970; ANONYMUS 1972; STALLARD 1980; RAI & HILL 1981, 1982; STALLARD & EDMOND 1983; FURCH 1984, im Druck; JUNK & FURCH 1985). Doch zeigt sich nun, daß auch ausgeprägt ionenarme Gewässer karbonatischer Natur sein, d. h. unter den Anionen eine HCO_3 -Dominanz aufweisen können (FURCH im Druck). Es soll später noch ausführlich darauf eingegangen werden. Es sei allerdings bereits an dieser Stelle darauf hingewiesen, daß Gewässer mit einer HCO_3 -Dominanz nur dann identisch mit klassischen Karbonat-Gewässern sind (RODHE 1949), wenn Erdalkali-Ionen, insbesondere das Ca-Ion, unter den Kationen dominieren und nicht wie hier die Alkali-Ionen.

Durchschnittswerte für den Gehalt sämtlicher Elemente, die in den Fließgewässern des Transamazônica-Bereiches bestimmt wurden, sind in Abb. 3 dargestellt. Eine Gegenüberstellung mit den entsprechenden Konzentrationsspannen, die für Flußwasser aus aller Welt angegeben sind (Weltdurchschnitt, LIVINGSTONE 1963; BOWEN 1966), zeigt deutlich, daß in den amazonischen Fließgewässern die durchschnittlichen Gehalte von denjenigen

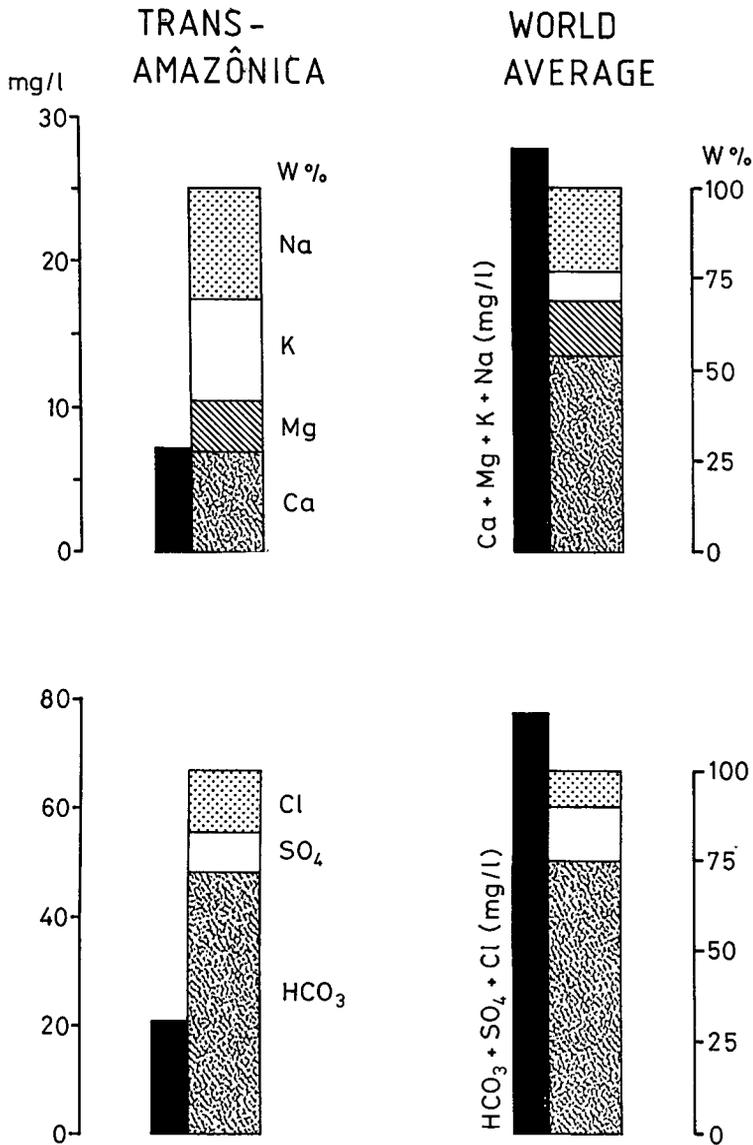


Abb. 2:
Durchschnittswerte für den Gehalt an Hauptkationen (Summe von Na, K, Mg und Ca) und Hauptanionen (Summe von HCO₃, SO₄ und Cl) in mg/l (schwarze Säulen) und deren prozentuale Verteilung (links) im Vergleich zum Weltdurchschnitt nach LIVINGSTONE (1963), rechte Seite.

Fig. 2:
Average values of major cation (sum of Na, K, Mg and Ca) and major anion levels (sum of HCO₃, SO₄, and Cl) in mg/l (dark columns), with their percentage distribution in waters of the Transamazon highway transect (left), compared with the world average, after LIVINGSTONE (1963) (right).

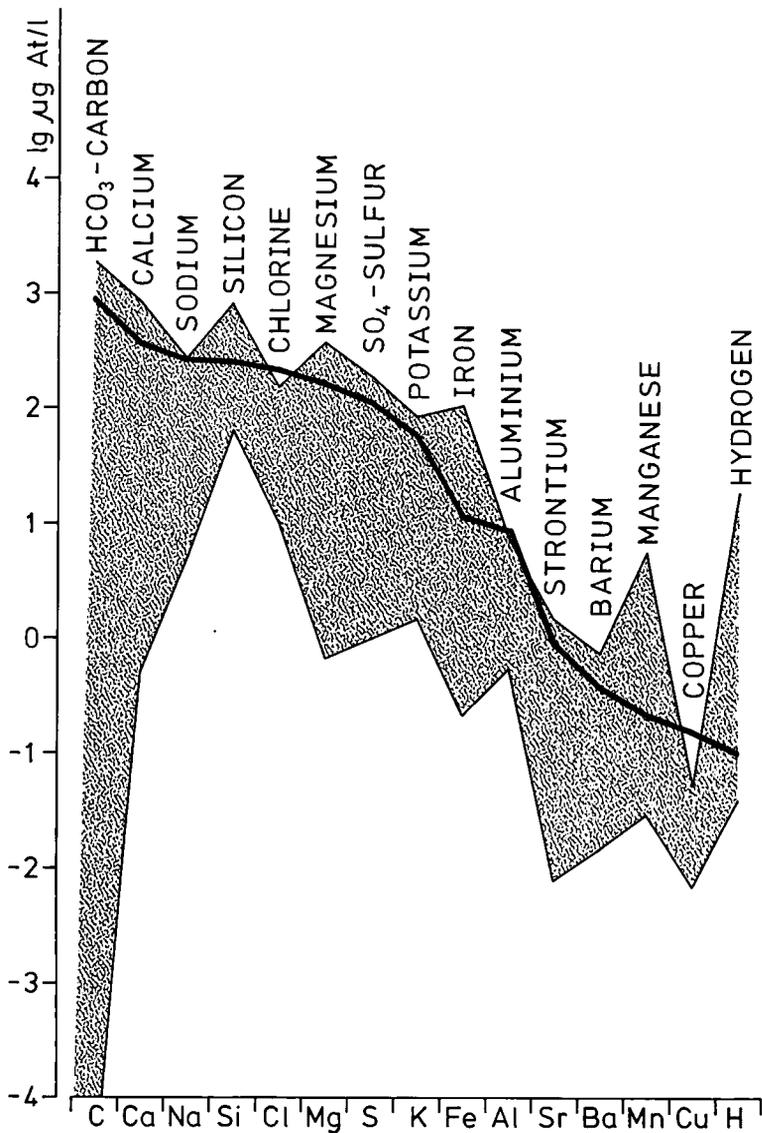


Abb. 3:
 Durchschnittswerte für den Gehalt an wichtigen Haupt- und Spurenelementen in den Fließgewässern des Transamazônica-Transsekt, geordnet nach abnehmenden Konzentrationen (durchgezogene schwarze Linie) im Vergleich zu den Konzentrationsspannen für diese Elemente, die nach LIVINGSTONE (1963) und BOWEN (1966) für Flußwasser aus aller Welt angegeben sind (gerasterte Fläche).

Fig. 3:
 Averages of selected major and trace elements in waters of the Transamazon highway transect, arranged by decreasing concentration (dark line) compared to the element concentrations given for freshwaters (shaded area), after LIVINGSTONE (1963) and BOWEN (1966).

Elementen, die die Hauptionen repräsentieren ($\text{HCO}_3\text{-C}$, Ca, Na, Mg, Cl, K, $\text{SO}_4\text{-S}$), besonders gering sind. Sie liegen ohne Ausnahme unterhalb der Gehalte, die bisher für Fließgewässer angegeben wurden. Die durchschnittlichen Gehalte für Si und für die Spurenelemente Fe, Al, Mn, Ba, Sr und Cu liegen dagegen innerhalb der für Fließgewässer angegebenen Konzentrationsspannen. Der Durchschnittswert für den Protonengehalt in den untersuchten Fließgewässern liegt dagegen oberhalb des Weltdurchschnitts. Ganz allgemein ließen sich somit die untersuchten Gewässer charakterisieren als arm im Gehalt an Hauptionen, normal im Gehalt an Si und Spurenelementen und als reich im Gehalt an H-Ionen.

Jedoch ist eine solche Charakterisierung mit Hilfe von Durchschnittswerten unzureichend, da die chemische Qualität der Gewässer außerordentlich heterogen ist, was durch die großen Unterschiede zwischen den aufgefundenen Minimal- und Maximalkonzentrationen eines jeweiligen Elements zum Ausdruck kommt (Abb. 4, Tab. 1). Als Maß für diese Unterschiede ist in Tab. 1 der Quotient Max : Min wiedergegeben. Er ist für die einzelnen Ionenarten sehr unterschiedlich, jedoch auffallend hoch für jene Parameter, die Wasserhärte und Alkalinität repräsentieren: Ca, Mg, HCO_3 , H. Wir haben daher bei diesen Eigenschaften mit besonders großen Unterschieden zwischen den untersuchten amazonischen Gewässern und dem Weltdurchschnitt zu rechnen.

Tab. 1: Chemische Zusammensetzung der Fließgewässer aus dem Bereich des Transamazônica-Transekts. K_{20} : spezifische Leitfähigkeit (20°C), TDS: Summe von Hauptkationen, -anionen und SiO_2 , TSS: Schwebstoffgehalt, TOC: Gesamtgehalt an organischem Kohlenstoff, Hazen: Farbwert nach HAZEN (1892).

Tab. 1: Chemical composition of freshwaters along the Transamazon highway transect. K_{20} : specific conductance (20°C), TDS: total dissolved solids (sum of major cations, major anions, and SiO_2), TSS: total suspended solids, TOC: total organic carbon, Hazen: colour after HAZEN (1892).

		Durchschnitt	Max	Min	Quotient (Max:Min)
Na	mg/l	1,69	6,31	0,12	53
K	mg/l	1,17	3,30	0,06	55
Mg	mg/l	1,10	9,02	0,02	451
Ca	mg/l	3,23	29,5	0,02	1475
SO_4	mg/l	1,18	18,0	0,19	95
Cl	mg/l	1,41	5,28	0,35	15
HCO_3	mg/l	18,0	115,2	< 0,031	> 378
Si	mg/l	7,0	23,0	1,93	12
pH	—	5,64	7,37	4,73	433
K_{20}	$\mu\text{S/cm}$	32,1	180,0	3,4	53
TDS	mg/l	42,6	205,6	6,25	33
TSS	mg/l	4,1	14,0	0,1	140
TOC	mg/l	6,2	12,1	3,5	3
Hazen	—	30	70	5	14
Sr	$\mu\text{g/l}$	14,4	131,1	0,7	187
Ba	$\mu\text{g/l}$	33,4	105,1	2,1	83
Al	$\mu\text{g/l}$	83,4	194,0	16,3	12
Fe	$\mu\text{g/l}$	831	5802	12,2	476
Mn	$\mu\text{g/l}$	40,4	317	1,7	186
Cu	$\mu\text{g/l}$	1,42	3,29	0,46	7
$\text{PO}_4\text{-P}$	$\mu\text{g/l}$	5,9	31,1	< 0,5	> 62
$\text{NH}_4\text{-N}$	$\mu\text{g/l}$	20,1	147,5	< 0,5	> 295

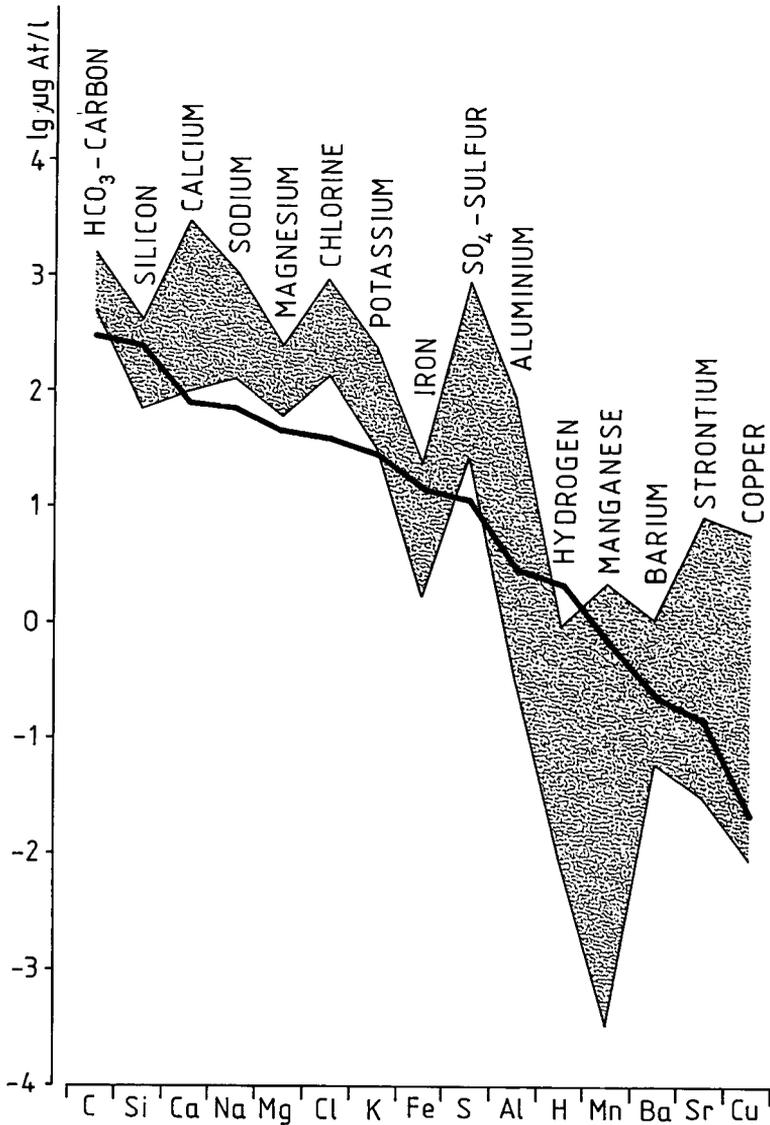


Abb. 4:
 Weltdurchschnittswerte wichtiger Haupt- und Spurenelemente in Fließgewässern nach LIVINGSTONE (1963) und BOWEN (1966), geordnet nach abnehmenden Konzentrationen (durchgezogene schwarze Linie) im Vergleich zu den Konzentrationsspannen dieser Elemente, die in den Fließgewässern des Transamazônica-Transekts beobachtet wurden (gerasterte Fläche).

Fig. 4:
 World average of selected major and trace elements in freshwaters, after LIVINGSTONE (1963) and BOWEN (1966), arranged by decreasing concentration (dark line), compared to concentrations of those in water along the Transamazon highway transect (shaded area).

Abb. 4 zeigt die aufgefundenen Konzentrationsbereiche der verschiedenen Elemente in den untersuchten Fließgewässern im Vergleich zu den für Flußwasser angegebenen Durchschnittswerten (Weltdurchschnitt) nach LIVINGSTONE (1963) und BOWEN (1966)*. Die Kurve für den Weltdurchschnitt durchkreuzt die Spanne an der oberen Grenze der für die untersuchten Fließgewässer beobachteten Elementkonzentrationen mit Ausnahme von Si, Mn und H. Während die aufgefundenen Konzentrationsminima für alle untersuchten Elemente weit unterhalb des Weltdurchschnitts liegen, überschreiten die beobachteten Konzentrationsmaxima nicht bei allen Elementen den Weltdurchschnitt: die Konzentrationen der Elemente Cl, Al und Cu liegen in allen untersuchten Gewässern unterhalb des Weltdurchschnitts und die höchste Na-Konzentration erreicht gerade den Weltdurchschnitt (Abb. 4).

In Tab. 2 ist die Anzahl der untersuchten Fließgewässer aufgeführt, die hinsichtlich ihrer Elementgehalte vom Weltdurchschnitt jeweils sowohl nach oben als auch nach unten abweichen. Bei den Hauptionen liegen die Konzentrationen bei der überwiegenden Mehrzahl der untersuchten Fließgewässer (92 - 100 %) deutlich unterhalb des Weltdurchschnitts, bei den Spurenelementen ist dies nur bei Sr, Al und Cu zu beobachten. Auch sind die Abweichungen vom Weltdurchschnitt (linke Spalte in Tab. 2) bei den Hauptelementen in der Regel größer als bei den Spurenelementen.

* In einer neueren Ausgabe (BOWEN 1979) sind z. T. veränderte Angaben über Durchschnittsgehalte von Spurenelementen in Fließgewässern zu finden. Die alten Angaben wurden aus Gründen der Einheitlichkeit (FURCH 1976; FURCH et al. 1982) als Bezugsgröße jedoch beibehalten.

Tab. 2: Weltdurchschnitt für Haupt- und Spurenelementgehalte im Flußwasser (mittlere Spalte) und Anzahl der Fließgewässer des Transamazônica-Transekts, deren Elementgehalte niedriger als der Weltdurchschnitt (linke Spalte) bzw. höher als der Weltdurchschnitt sind (rechte Seite).

Tab. 2: World average of major and trace elements in river water compared to those freshwaters along the Transamazon highway transect, whose element content is below the world average (left) and those above the world average (right).

	Gewässer elementärmer als der Weltdurchschnitt		Weltdurchschnitt*) Konzentration	Gewässer elementreicher als der Weltdurchschnitt	
	Anzahl der Proben	Durchschnitts- konzentration		Durchschnitts- konzentration	Anzahl der Proben
Si	39	4,1 mg/l	6,1 mg/l	9,7 mg/l	41
HCO ₃	74	12,0 mg/l	58,4 mg/l	91,2 mg/l	6
Ca	75	1,8 mg/l	15,0 mg/l	24,1 mg/l	5
K	75	1,1 mg/l	2,3 mg/l	2,6 mg/l	5
Mg	76	0,8 mg/l	4,1 mg/l	5,9 mg/l	4
SO ₄	79	1,0 mg/l	11,2 mg/l	18,0 mg/l	1
Na	79	1,6 mg/l	6,3 mg/l	6,3 mg/l	1
Cl	80	1,4 mg/l	7,8 mg/l	–	–
Mn	19	6,1 µg/l	12 µg/l	51 µg/l	61
Fe	39	362 µg/l	670 µg/l	1277 µg/l	41
Ba	66	23 µg/l	54 µg/l	86 µg/l	13
Sr	78	12 µg/l	80 µg/l	109 µg/l	2
Al	80	83 µg/l	240 µg/l	–	–
Cu	80	1,4 µg/l	10 µg/l	–	–

*) LIVINGSTONE (1963); BOWEN (1966)

2. Spezifische Aspekte der chemischen Gewässercharakterisierung

Wie aus der obigen Schilderung hervorgeht, hat die Mehrzahl der hier untersuchten amazonischen Gewässer – verglichen mit dem Weltdurchschnitt – geringe Gehalte an Hauptkationen und Hauptanionen. Es bleibt nun zu untersuchen, ob die Mehrzahl dieser Gewässer hinsichtlich einer chemischen Verwandtschaft in sich relativ einheitlich zusammengesetzt ist.

2a) Häufigkeitsverteilung der Elemente

Werden die Gewässer hinsichtlich ihrer Gesamtgehalte an Hauptionen (Summe von Hauptkationen und -anionen) auf 10 gleichgroße Konzentrationsbereiche aufgeteilt, so zeigt sich ein ungewöhnliches Verteilungsmuster (Abb. 5, linke Seite). Die Mehrzahl der Proben (54 %) liegt im untersten Zehntel des gesamten Konzentrationsbereiches (zwischen 0 und 0,42 mVal Hauptkationen/Liter) und nicht im mittleren Konzentrationsbereich, wie man es entsprechend einer Normalverteilung hätte erwarten können. Eine weitere große Portion an Proben (28 %) ist im zweituntersten Konzentrationsbereich (0,42 - 0,84 mVal/l) angesiedelt, während sich der Rest der Proben (18 %) auf 8 unterschiedliche Konzentrationsbereiche verteilt und kein regelmäßiges Verteilungsmuster mehr erkennen läßt.

Wählt man für eine detailliertere Betrachtung von den Hauptionen das für Süßwasser jeweils wichtigste Kation (Ca) und jeweils wichtigste Anion (HCO_3) aus (Abb. 5), so findet sich für die Häufigkeitsverteilung von HCO_3 ein ganz ähnliches Verteilungsmuster wie bei der Ionensumme. Beim Ca ist die Situation dagegen noch extremer: hier liegen mehr als 80 % der untersuchten Gewässer im untersten der 10 Konzentrationsbereiche (0 - 0,2 mVal Ca/l). Ein weiterer kleiner Teil der Proben (9 %) fällt in den zweituntersten Konzentrationsbereich (0,2 - 0,4 mVal Ca/l), während alle weiteren Konzentrationsbereiche nur mit jeweils 1 - 2 % der Gewässer vertreten sind. Eine Spreizung des untersten Konzentrationsbereiches (0 - 0,2 mVal/l, Abb. 5) zeigt, daß die Mehrzahl der Gewässer wiederum in die niedrigsten Konzentrationsbereiche fallen. Die Mehrzahl der untersuchten Fließgewässer ist somit – verglichen mit dem Weltdurchschnitt – nicht nur generell gekennzeichnet durch eine ausgeprägte Ionenarmut, sondern besonders durch eine vergleichsweise extrem ausgeprägte Ca-Armut.

Die relativ schlechte Übereinstimmung zwischen den Verteilungsmustern von Ca und HCO_3 besonders im gespreizten untersten Konzentrationsbereich (Abb. 5) ist ein erster direkter Hinweis darauf, daß es sich bei der Mehrzahl der Proben nicht um typische Karbonat-Gewässer handelt, in denen Ca und HCO_3 die dominanten Ionen sind; dies unterstreicht die fehlende chemische Verwandtschaft zwischen den untersuchten Fließgewässern und dem Weltdurchschnitt. Auch bezüglich der absoluten Gehalte an Ca- und HCO_3 - sowie des Gesamtionengehaltes unterscheiden sich die Gewässer deutlich vom Weltdurchschnitt: unter den insgesamt 80 untersuchten Fließgewässern findet sich nur jeweils eine Probe, die im Konzentrationsbereich des Weltdurchschnitts liegt (s. Pfeile in Abb. 5).

Die Verteilungsmuster für die Konzentrationsbereiche der übrigen Haupt- und Spurenelemente in den untersuchten amazonischen Gewässern sind in Abb. 6 und Abb. 7 dargestellt. Eine symmetrische Häufigkeitsverteilung der Gewässer auf die verschiedenen Konzentrationsbereiche läßt sich bei keinem Element beobachten. Die Mehrzahl der Proben liegt in den unteren Konzentrationsbereichen des jeweiligen Elements, besonders stark ausgeprägt ist dies bei Mg, SO_4 und Sr.

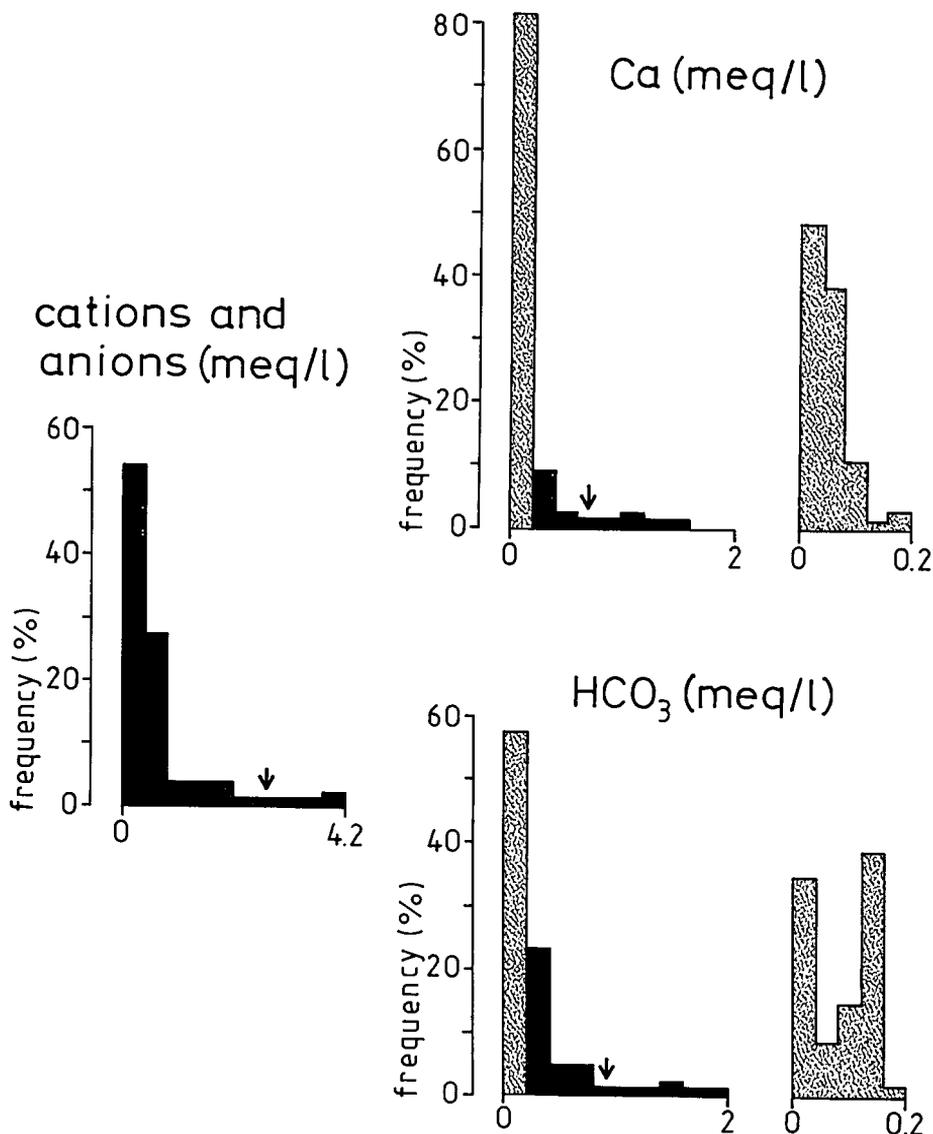


Abb. 5:

Häufigkeitsverteilung der auftretenden Konzentrationen von Hauptanionen und Hauptkationen (links) und von Ca und HCO₃ (rechts) in den Fließgewässern des Transamazônica-Transekts. Die Abszissenbegrenzung gibt jeweils die höchste Konzentration an, die in den Fließgewässern beobachtet wurde. Dieser Wert ist in 10 gleichgroße Intervalle unterteilt. Im Falle von Ca und HCO₃ ist das unterste Konzentrationsintervall zusätzlich auf das 5-fache gespreizt. Der Pfeil kennzeichnet das Konzentrationsintervall, in dem der betreffende Wert für den Weltdurchschnitt liegt.

Fig. 5:

Frequency distribution of observed major anion and major cation (left and Ca and HCO₃ (right) concentrations in waters along the Transamazon highway transect. The value to the right of the abscissa is the highest observed concentration. This values is divided into 10 equal intervals. In the case of Ca and HCO₃ the lowest concentration interval is further divided into five sub-intervals. The arrow indicates the world average concentration world average for that parameter.

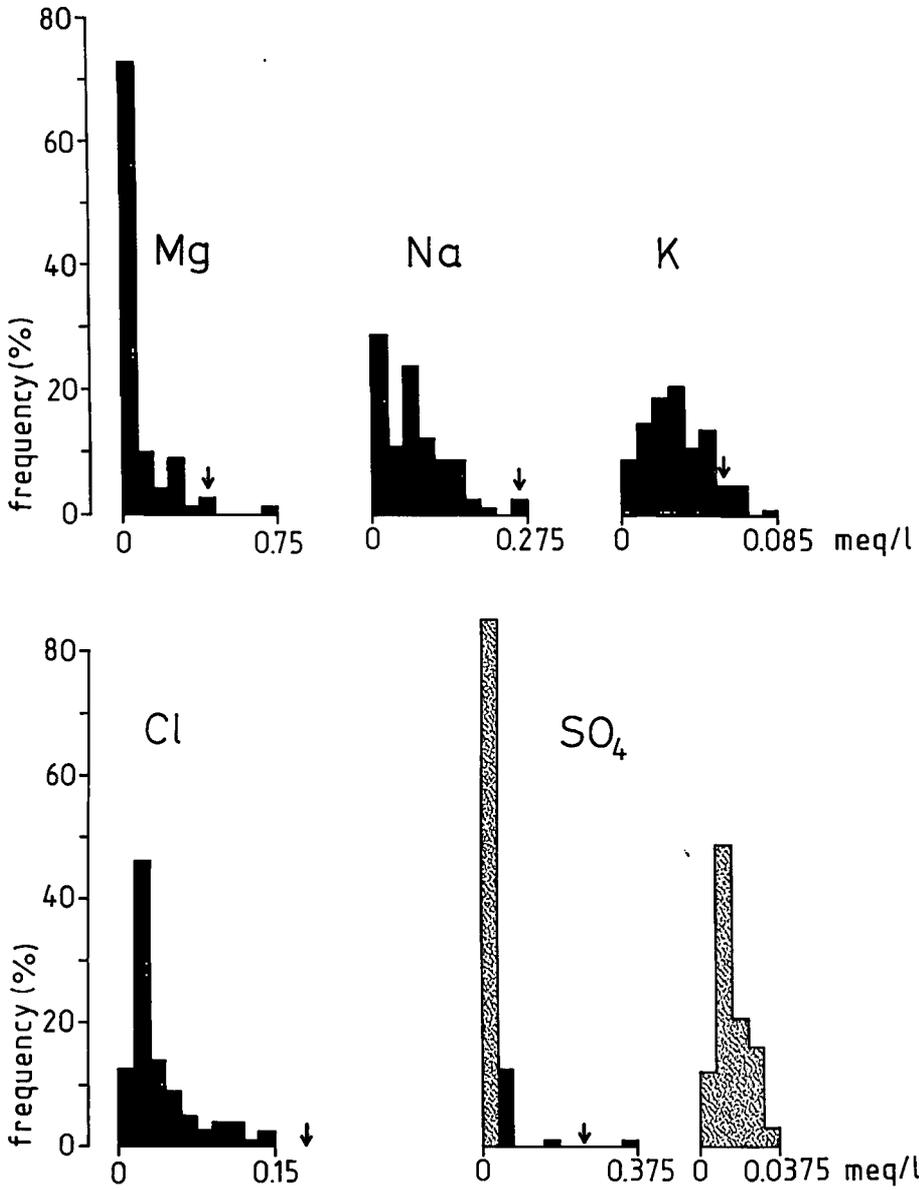


Abb. 6:
Häufigkeitsverteilung der in den Fließgewässern des Transamazônica-Transektiv auftretenden Konzentrationen von Mg, Na, K, Cl und SO₄. Weitere Erklärungen: siehe Abb. 5.

Fig. 6:
Frequency distribution of Mg, Na, K, Cl and SO₄ concentration, observed in waters along the Transamazon highway transect. For additional explanation see fig. 5.

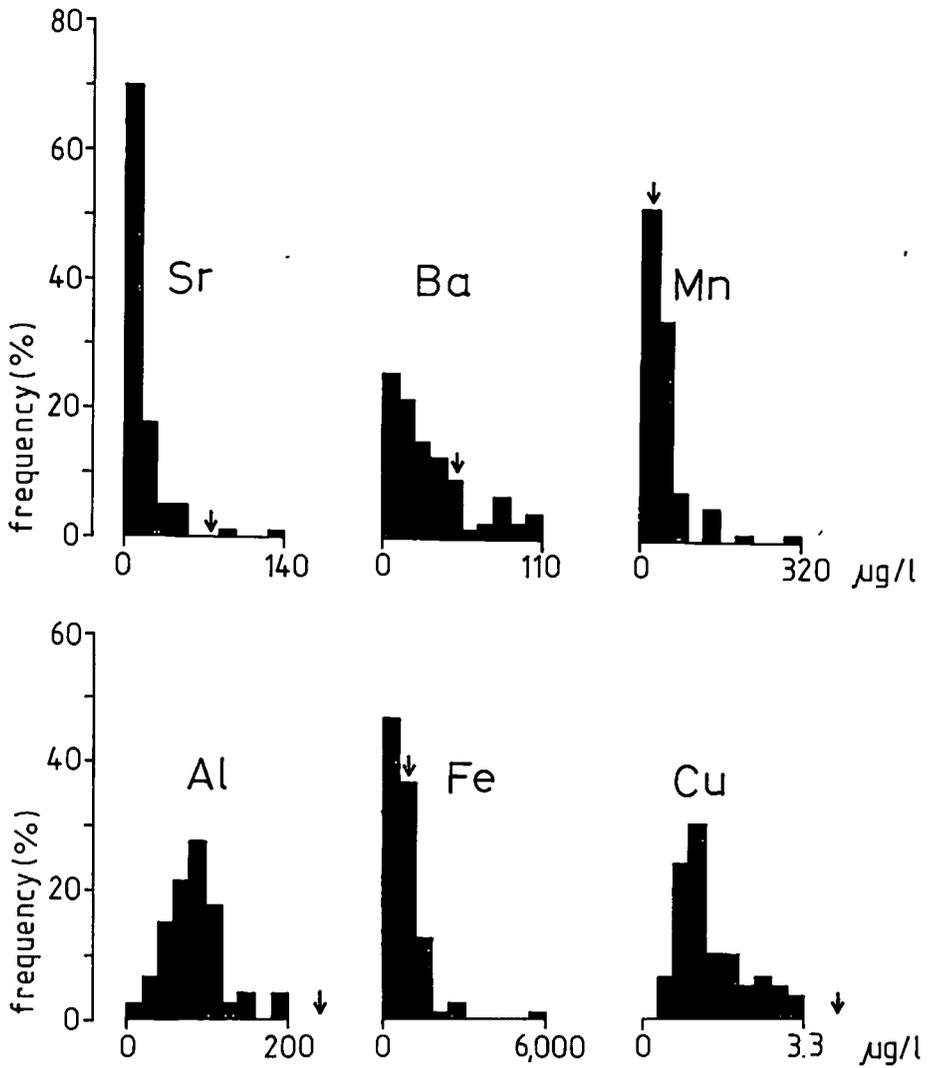


Abb. 7:

Häufigkeitsverteilung der in den Fließgewässern des Transamazônica-Transekts auftretenden Konzentrationen von Sr, Ba, Mn, Al, Fe und Cu. Weitere Erklärungen: siehe Abb. 5.

Fig. 7:

Frequency distribution of Sr, Ba, Mn, Al, Fe and Cu concentration, observed in waters along the Transamazon highway transect. For additional explanation see fig. 5.

Bezogen auf die gesamte Konzentrationsspanne, die jeweils für ein bestimmtes Element in den untersuchten Gewässern beobachtet wurde (amazonischer Maßstab), ist also die Mehrzahl der Gewässer gekennzeichnet durch geringe Elementgehalte. Bezogen auf die Durchschnittswerte für Flußwasser nach LIVINGSTONE (1963) und BOWEN (1966), d. h. bezogen auf den Weltmaßstab, ist die Elementarmut der untersuchten Gewässer teilweise noch extremer (s. Pfeile in Abb. 6 und 7); das gilt besonders für die Elemente Mg, Na, Cl, SO₄-S, Sr, Al und Cu, hingegen nicht für die Elemente Mn und Fe.

2b) Chemische Zusammensetzung (Ionenproportionen)

Für die chemische Charakterisierung von Fließgewässern ist neben der Kennzeichnung durch absolute Gehalte an verschiedenen gelösten anorganischen Substanzen auch eine Kennzeichnung der proportionalen Verteilung dieser Stoffe im Wasser von Bedeutung, um auf diese Weise zu einer Aussage über das chemische Milieu im Gewässer zu gelangen. Der einfachste Weg dahin ist die Aufteilung der Proben nach der sequentiellen Abfolge der Ionen dominanz (MEYBECK 1979; STALLARD 1980). Unter diesen Gesichtspunkten repräsentieren die untersuchten amazonischen Gewässer eine Vielfalt verschiedener Wassertypen (Tab. 3). Bezogen auf die Hauptkationensequenzen ist eine Dominanz von Na unter den Hauptkationen am häufigsten vertreten; allerdings finden sich unter Na-dominierten Gewässern 6 verschiedene Typen, abhängig von der Verteilung der übrigen 3 Hauptkationen. An 2. Stelle stehen die Ca-dominierten Gewässer mit 3 verschiedenen Typen, gefolgt von den Mg-dominierten Gewässern, ebenfalls mit 3 Typen, und den K-dominierten Gewässern mit 2 Typen. Bezogen auf Hauptanionensequenzen (Tab. 3) lassen sich insgesamt 5 Wassertypen voneinander unterscheiden: 2 Typen mit HCO₃-Dominanz, 2 mit Cl-Dominanz und 1 mit SO₄-Dominanz. Die HCO₃-dominierten Gewässer sind bei weitem in der Überzahl.

Die Anzahl der nach Ionensequenzen unterschiedenen Wassertypen erhöht sich bei der Kombination von Hauptkationen und -anionen auf 26 (Tab. 4). Demnach würde im Durchschnitt jedes dritte der im Bereich des Transamazônica-Transektes angetroffenen Fließgewässer einem anderen Gewässertypus angehören. Dies dürfte als Hinweis auf die chemische Heterogenität der untersuchten Fließgewässer gelten, die bereits auf Grund der großen Konzentrationsspannen für die verschiedenen Elemente angesprochen wurde (Tab. 1).

Jedoch kommen mir Zweifel, ob Ionensequenzen (Tab. 4) geeignete Kriterien für eine Definition von chemischen Wassertypen sind. Dieser Zweifel wird deutlich durch eine Gegenüberstellung von 6 Fließgewässern, die als einzige aus dem Transamazônica-Bereich bezüglich ihrer Ionensequenz identisch mit dem Weltdurchschnitt sind (Tab. 5) und somit einen chemisch homogenen Wassertyp erwarten lassen: Ca > Mg > Na > K – HCO₃ > SO₄ > Cl. Die zahlenmäßigen Angaben für die prozentualen Anteile der Anionen und Kationen an der jeweiligen Anionen- bzw. Kationensumme zeigen jedoch so große Unterschiede zwischen diesen 6 Gewässern, daß eine enge Verwandtschaft im Sinne eines chemisch homogenen Gewässertyps nicht gegeben ist. Hinzu kommt, daß sich auch erhebliche Unterschiede zwischen diesen Gewässern und dem Weltdurchschnitt sowohl bezüglich der Prozentanteile an Hauptanionen und -kationen als auch bezüglich der Gesamtgehalte an Hauptionen zeigen (Tab. 5).

Tab. 3: Häufigkeitsverteilung der verschiedenen Kationensequenzen (linke Spalte) und Anionensequenzen (rechte Spalte), die in den Fließgewässern des Transamazônica-Transekts gefunden wurden. * Anionen- bzw. Kationensequenzen des Weltdurchschnitts. Die Sequenzen beziehen sich auf Äquivalentkonzentrationen.

Tab. 3: Frequency distribution of cation (left) and anion sequences (right) observed in freshwaters along the Transamazon highway transect. * Sequences of cations and anions equal to those of the world average. The frequencies refer to equivalent concentrations.

Kationensequenzen	Proben-Anzahl	Anionensequenzen	Proben-Anzahl
Na > Ca > Mg > K	13	HCO ₃ > SO ₄ > Cl*	14
Na > Ca > K > Mg	8	HCO ₃ > Cl > SO ₄	53
Na > K > Ca > Mg	7	Summe	67
Na > K > Mg > Ca	6		
Na > Mg > Ca > K	5	Cl > SO ₄ > HCO ₃	9
Na > Mg > K > Ca	3	Cl > HCO ₃ > SO ₄	3
Summe	42	Summe	12
Ca > Mg > Na > K*	16	SO ₄ > Cl > HCO ₃	1
Ca > Mg > K > Na	2		
Ca > Na > Mg > K	2		
Summe	20		
Mg > Ca > K > Na	5		
Mg > Ca > Na > K	3		
Mg > Na > Ca > K	3		
Summe	11		
K > Na > Mg > Ca	5		
K > Mg > Na > Ca	2		
Summe	7		

Auf der Suche nach Kriterien, die eine Zuordnung der untersuchten Gewässer zu verschiedenen chemischen Gewässergruppen erlauben, sollten daher weniger strenge numerische Abgrenzungen zwischen den Ionensequenzen gefordert, sondern vielmehr Ähnlichkeiten zwischen den Gewässern hinsichtlich der numerischen Beträge für die verschiedenen in Betracht gezogenen Parameter aufgezeigt werden. Hierfür eignet sich in besonderem Maße das Ionendiagramm nach MAUCHA (1932), das auf eindrucksvolle Weise Ionenproportionen bzw. -dominanzen erfaßbar macht und optisch vorführt. Gekoppelt mit einer Angabe über den jeweiligen Gesamtionengehalt (Abb. 8) gelangt man zu einer guten Übersicht über charakteristische Merkmale der verschiedenen chemischen Gewässergruppen.

Tab. 4: Häufigkeitsverteilung der verschiedenen Ionensequenzen (Kombination von Kationen und Anionen), die in den Fließgewässern des Transamazônica-Transektiv auftreten. Weitere Erläuterungen s. Tab. 3.

Tab. 4: Frequency distribution of ionic sequences (combination of cations and anions) observed in the freshwaters along the Transamazon highway transect. For further explanation see table 3.

Ionensequenzen	Proben-Anzahl
Na > Ca > Mg > K - HCO ₃ > Cl > SO ₄	13
Na > Ca > K > Mg - HCO ₃ > Cl > SO ₄	5
Na > Ca > K > Mg - HCO ₃ > SO ₄ > Cl	2
Na > Ca > K > Mg - Cl > HCO ₃ > SO ₄	1
Na > K > Ca > Mg - HCO ₃ > Cl > SO ₄	4
Na > K > Ca > Mg - HCO ₃ > SO ₄ > Cl	2
Na > K > Ca > Mg - SO ₄ > Cl > HCO ₃	1
Na > K > Mg > Ca - Cl > SO ₄ > HCO ₃	4
Na > K > Mg > Ca - HCO ₃ > Cl > SO ₄	2
Na > Mg > Ca > K - HCO ₃ > Cl > SO ₄	1
Na > Mg > Ca > K - Cl > HCO ₃ > SO ₄	2
Na > Mg > Ca > K - HCO ₃ > SO ₄ > Cl	1
Na > Mg > Ca > K - Cl > SO ₄ > HCO ₃	1
Na > Mg > K > Ca - HCO ₃ > SO ₄ > Cl	2
Na > Mg > K > Ca - Cl > SO ₄ > HCO ₃	1
Summe	42
Ca > Mg > Na > K - HCO ₃ > Cl > SO ₄	10
Ca > Mg > Na > K - HCO ₃ > SO ₄ > Cl*	6
Ca > Mg > K > Na - HCO ₃ > Cl > SO ₄	2
Ca > Na > Mg > K - HCO ₃ > Cl > SO ₄	1
Ca > Na > Mg > K - HCO ₃ > SO ₄ > Cl	1
Summe	20
Mg > Ca > K > Na - HCO ₃ > Cl > SO ₄	5
Mg > Ca > Na > K - HCO ₃ > Cl > SO ₄	3
Mg > Na > Ca > K - HCO ₃ > Cl > SO ₄	3
Summe	11
K > Na > Mg > Ca - Cl > SO ₄ > HCO ₃	3
K > Na > Mg > Ca - HCO ₃ > Cl > SO ₄	2
K > Mg > Na > Ca - HCO ₃ > Cl > SO ₄	2
Summe	7

In Abb. 8 (B - G) sind die entsprechenden Ionendiagramme nach MAUCHA (1932) von 6 weiteren ausgewählten Fließgewässern des Transamazônica-Transektiv dargestellt, die auf Grund ihrer Ähnlichkeit sowohl hinsichtlich der Ionengehalte als auch hinsichtlich der Ionenproportionen ganz offensichtlich 2 verschiedenen Gruppen zugeordnet werden können. Bei der einen Gruppe (B, C, D) handelt es sich um relativ ionenarme Gewässer, die eine ausgeprägte Hydrogencarbonat-Dominanz unter den Hauptanionen aufweisen, eine stark ausgeprägte Dominanz eines der 4 Hauptkationen läßt sich hingegen nicht beobachten.

Tab. 5: Variation der chemischen Zusammensetzung bei Fließgewässern des Transamazônica-Transekts mit identischen Ionensequenzen ($\text{Ca} > \text{Mg} > \text{Na} > \text{K} - \text{HCO}_3 > \text{SO}_4 > \text{Cl}$).
* Weltdurchschnitt

Tab. 5: Variation of the chemical composition of freshwaters along the Transamazon highway transect with ionic sequences identical to the world average (*): $\text{Ca} > \text{Mg} > \text{Na} > \text{K} - \text{HCO}_3 > \text{SO}_4 > \text{Cl}$.

Kationen + Anionen $\mu\text{Val}/\text{l}$	% (Val)				% (Val)		
	Na	K	Mg	Ca	HCO_3	SO_4	Cl
814	17,7	2,4	36,0	43,9	78,9	10,8	10,3
1658	12,2	1,6	21,1	65,0	69,7	18,2	12,1
4134	7,3	1,5	19,3	71,9	75,2	18,0	6,8
636	27,8	15,0	28,5	28,7	87,1	8,8	4,1
298	18,0	11,4	32,1	38,5	72,5	18,8	8,7
1258	3,4	2,7	17,2	76,7	89,4	7,8	2,8
2836	19,2	4,1	24,0	52,6	67,9	16,5	15,6*

Bei der anderen Gruppe (E, F, G) handelt es sich um deutlich ionenreichere Gewässer mit sowohl einer stark ausgeprägten HCO_3 -Dominanz als auch einer stark ausgeprägten Ca-Dominanz. Auch zeigen sie bezüglich ihrer Ionenproportionen eine größere Ähnlichkeit mit dem Weltdurchschnitt (Abb. 8A) als die Gewässergruppe B, C, D. Ordnet man die Gewässer in Abb. 8 nun nicht hinsichtlich der Ähnlichkeit ihrer Ionendiagramme und -gehalte sondern lediglich hinsichtlich einer numerischen Abgrenzung zwischen den Ionensequenzen, wie es zuvor diskutiert wurde, so müßten alle Gewässer jeweils innerhalb einer Gruppe als typfremd voneinander unterschieden werden (s. S. 385). Lediglich die Gewässer B und E müßten auf Grund ihrer identischen Ionensequenzen ein und demselben chemischen Gewässertyp zugeordnet werden; dies aber verwehren ihre stark voneinander abweichenden Ionendiagramme. Da die numerische Übereinstimmung der Ionenproportionen bei den Gewässern, die in Abb. 8 auf Grund der sich ähnelnden Ionendiagramme jeweils einer Gruppe zugeordnet wurden, sehr viel größer ist als bei den Gewässern, die auf Grund identischer Ionensequenzen zusammengestellt wurden (Tab. 5), soll im folgenden die chemische Charakterisierung der Gewässer mit Hilfe von Ionendiagrammen unter Berücksichtigung der Gesamtionengehalte vorgenommen werden.

Einen Überblick über Ionenproportionen und -mengen von ausgewählten Fließgewässern bzw. zu Gruppen zusammengestellten Fließgewässern aus dem Bereich des Transamazônica-Transekts gibt Abb. 9. Solche Gruppen wurden zusammengestellt nach Wasserführung (big rivers, Abb. 9E) und Ionengehalten (Abb. 9B, C). Als weitere Gruppe wurden alle Gewässer zusammengefaßt (Abb. 9D). Jede dieser Gruppen ist in Form von Durchschnittswerten dargestellt. Zum Vergleich ist wiederum der Weltdurchschnitt mitaufgeführt (Abb. 9A). Die größte Verwandtschaft mit dem Weltdurchschnitt sowohl bezüglich des Gesamtionengehaltes als auch bezüglich der Ionenproportionen zeigt die Gruppe der Gewässer mit den höchsten Ionengehalten (Abb. 9B). Ihre Zugehörigkeit zur Klasse der Karbonatgewässer (RODHE 1949) ist durch eine starke Dominanz von Ca und HCO_3 klar gekennzeichnet. Unterschieden sind diese

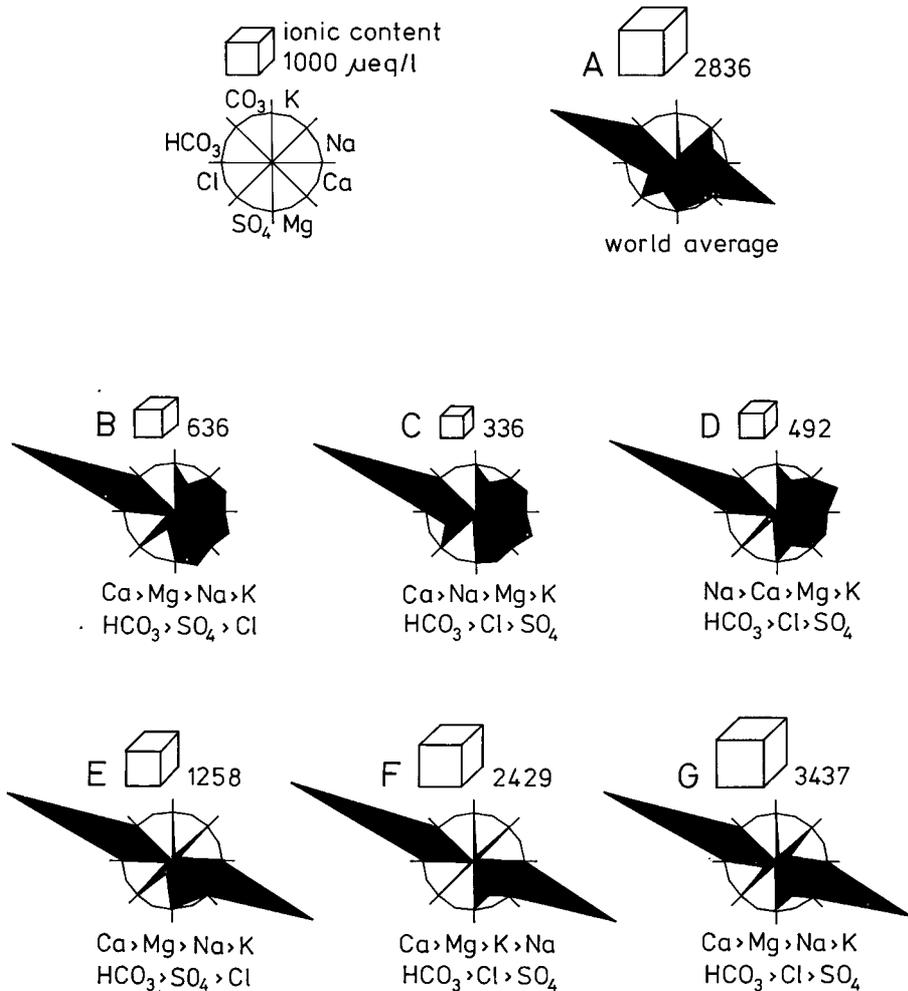


Abb. 8:

Ionengehalt (Summe von Hauptkationen und -anionen) und Ionendiagramm (nach MAUCHA 1932) von 6 ausgewählten Fließgewässern des Transamazônica-Transektiv (für weitere Erklärungen s. S. 387). Im Ionendiagramm sind in der linken Hälfte die Hauptanionen CO₃, HCO₃, Cl und SO₄ jeweils als Äquivalent-Prozent von der Anionensumme, in der rechten Hälfte die Hauptkationen K, Na, Ca und Mg jeweils als Äquivalent-Prozent von der Kationensumme dargestellt. Die Zahlen an den Würfeln geben den Ionengehalt in µVal/l wieder.

Fig. 8:

Ionic content (sum of major cations and major anions) and ionic diagrams, after MAUCHA (1932), of 6 selected waters along the Transamazon highway transect (for further explanation see page 387). On the left-hand side of the ionic diagram the major anions, CO₃, HCO₃, Cl and SO₄, are given as % eq of their sum, and on the right-hand side of the diagram, the major cations, K, Na, Ca and Mg, are given in % eq of their sum. The numbers to the right of the cubes give the ionic content as µeq/l.

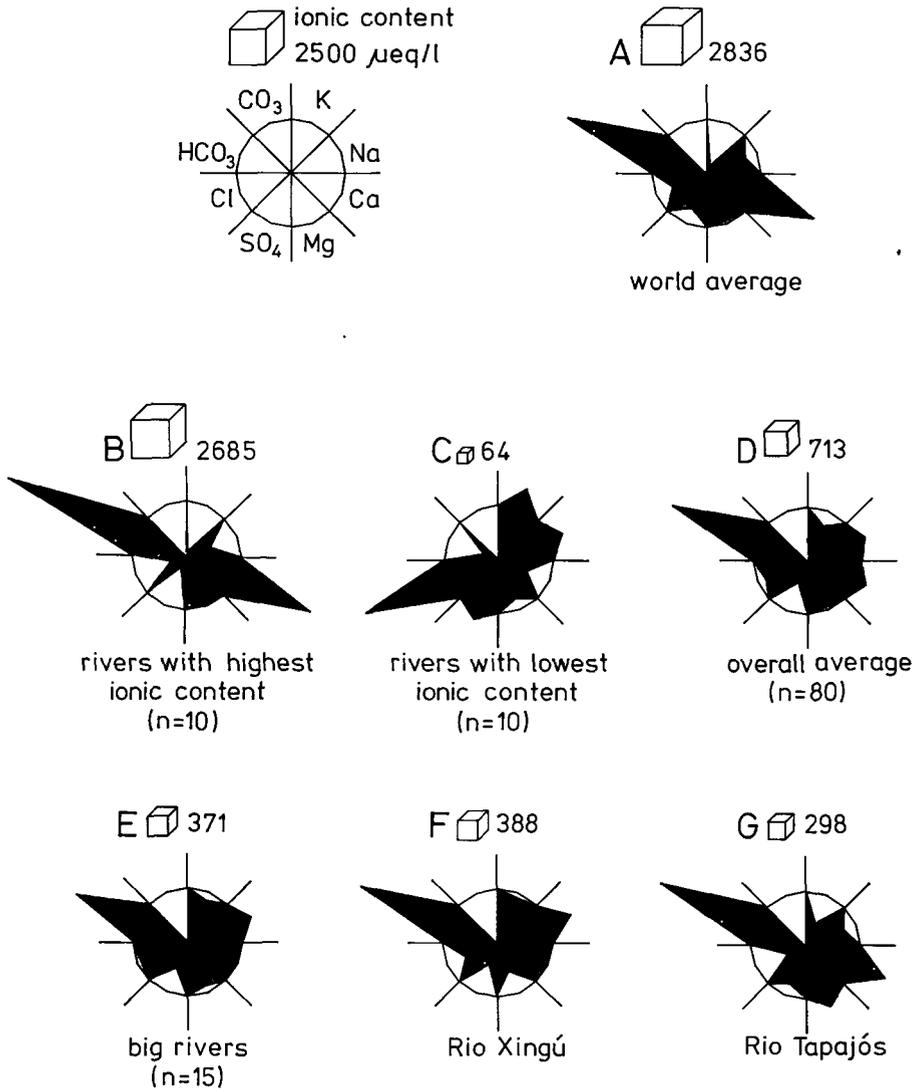


Abb. 9:

Ionengehalt (Summe von Hauptkation und -anionen) und Ionendiagramm (nach MAUCHA 1932) von ausgewählten Fließgewässern bzw. zu Gruppen zusammengestellten Fließgewässern aus dem Bereich des Transamazônica-Transektiv im Vergleich zum Weltdurchschnitt. Weitere Erklärungen: s. Abb. 8.

Fig. 9:

Ionic content (sum of major cations and major anions) and ionic diagrams, after MAUCHA (1932), of selected waters and groups of waters along the Transamazon highway transect, compared to the world average. For further explanation see fig. 8.

Gewässer vom Weltdurchschnitt durch die stärker ausgeprägten Dominanzen von Ca und besonders von HCO_3 , was mit einer entsprechenden Verringerung der Na-, SO_4 - und Cl-Anteile einhergeht. Den krassesten Gegensatz dazu bildet die Gruppe der Gewässer mit den geringsten Ionengehalten (Abb. 9C). Diese Gewässer gehören mit durchschnittlich $64 \mu \text{Val/l}$ Hauptionen zu den elektrolytärsten Gewässern, die bisher in Amazonien angetroffen wurden (SIOLI 1954b, 1968a, b; FITTKAU 1964, 1971; SCHMIDT 1972; FURCH 1976, 1984, im Druck; FURCH & JUNK 1980; FURCH et al. 1982; GEISLER & ANNIBAL 1984). Ihr Ionendiagramm läßt erkennen, daß Karbonat praktisch gar nicht und Calcium auffallend gering vertreten ist. Dominante Kationen in diesen Gewässern sind die Alkali-Ionen, wobei im Einzelfall sowohl K als auch Na die ausgeprägtere Dominanz übernehmen kann. Unter den Anionen ist Cl dominant, der SO_4 -Anteil ist jedoch mit durchschnittlich ca. 30 % der Anionensumme relativ hoch.

Einen Überblick über alle 80 Fließgewässer, die naturgemäß keine chemisch homogene Gewässergruppe bilden, gibt Abb. 9D. Ihr Ionendiagramm zeigt eine Mittelstellung zwischen extrem ionenarmen Alkali-chloridischen Gewässern und elektrolytreichen Calcium-karbonatischen Gewässern. Verglichen mit den extrem ionenarmen Gewässern sind die Anteile der Alkali-, Cl- und SO_4 -Ionen zurückgegangen, die der Erdalkali-Ionen, besonders des Ca, und des HCO_3 haben zugenommen, während der Ionengehalt mehr als 10-fach höher liegt.

Die weiteren in Abb. 9 dargestellten Ionendiagramme weichen nur geringfügig vom Gesamtdurchschnitt (Abb. 9D) ab. Der Durchschnitt für die 15 größten Ströme des untersuchten Transekts (Abb. 9E) zeigt einen etwas geringeren HCO_3 -Anteil und eine schwach ausgeprägte Alkali-Dominanz, allerdings deutlich geringere Ionengehalte. Ein ähnliches Bild zeigt der Rio Xingú (Abb. 9F), einer der beiden größten Ströme dieses Transektes. Der Rio Tapajós, der zweite bedeutende Strom (Abb. 9G), zeigt eine größere Ähnlichkeit mit den Karbonatgewässern; seine Ionenarmut (ca. ein Zehntel des Weltdurchschnitts) und seine nur schwach ausgeprägte Ca-Dominanz stellen seine Zugehörigkeit zum klassischen Typ des Karbonatgewässers allerdings in Frage.

Von den Alkali-chloridischen Gewässern abgesehen (Abb. 9C), haben die ionenarmen Gewässer – und das ist die Mehrzahl aller Gewässer des untersuchten Transekts – einen auffallend hohen HCO_3 -Anteil unter den Hauptanionen (Abb. 9E - G); ein entsprechend hoher Ca-Anteil unter den Kationen fehlt dagegen in der Regel. Das Vorkommen von Karbonat in diesen Gewässern läßt sich somit nicht allein auf die chemische Verwitterung von Karbonatmineralien zurückführen; auch Silikatmineralien müssen dafür in Betracht gezogen werden (GARRELS & MACKENZIE 1971; KEMPE 1979; PAGEL 1981). Berechnungen haben ergeben, daß in den untersuchten ionenarmen Gewässern der überwiegende Teil des vorhandenen HCO_3 tatsächlich aus der chemischen Verwitterung von Silikatmineralien stammt. Ein Vergleich mit den Angaben von GARRELS & MACKENZIE (1971) zeigt, daß sich die amazonischen Gewässer aus dem Bereich des Transamazônica-Transekts auch in dieser Beziehung fundamental vom Weltdurchschnitt unterscheiden.

3. Hydrochemie und Geologie

Die bereits erwähnte relativ kleinräumig wechselnde Abfolge geologisch verschiedener Formationen im Bereich des Transamazônica-Transektiv zwischen Altamira und Humaitá spiegelt sich wieder in den Fließgewässern dieses Gebietes in einem häufigen Wechsel des Gehaltes an verschiedenen gelösten mineralischen Substanzen (Abb. 10 - 13). Binnen kürzester Distanzen (wenige km) können sich die Fließgewässer bezüglich ihrer Werte für folgende chemische Parameter um mehr als eine Zehnerpotenz unterscheiden: pH, Leitfähigkeit, Hauptionengehalt, Na, Mg, Ca, Sr, Ba, HCO_3 , SO_4 , Fe, Mn, Al, NH_4 , PO_4 und Schwebfracht. Hohe Konzentrationen an Hauptkationen, Hauptanionen und einer Reihe an Spurenelementen finden sich in einigen Fließgewässern der östlichen Hälfte des untersuchten Transektivs. Ihren Ionenreichtum verdanken sie Kalk-, Dolomit-, Anhydrit- oder Mergelhaltigen Gesteinen aus dem Karbon (Formação Nova Olinda und Formação Itaituba), Devon (Formação Curuá) und Jura/Kreide (Diabasio Penatecaua), die vereinzelt in diesem Gebiet angetroffen werden können (PROJETO RADAM 1974, 1975, 1976, 1978a, b). Die überwiegende Mehrzahl der Gewässer, zu der auch die 4 größten Ströme dieses Gebietes gehören, der R. Aripuanã, R. Sucunduri, R. Tapajós und R. Xingú, ist durch eine mehr oder minder ausgeprägte Ionenarmut gekennzeichnet. Solche relativ ionenarmen Gewässer sind im Verlauf des beinahe gesamten Transamazônica-Transektivs anzutreffen. Sie haben ihren Ursprung in der Regel auf dem Zentralbrasilianischen Schild und durchkreuzen eine Vielzahl geologischer Formationen vorwiegend präkambrischen Alters, in denen saure und basenarme Gesteine vorherrschen (Granite, Gneise, Diorite, Vulkanite, Sandsteine, kaolinitische Tongesteine).

Von diesen ionenarmen Gewässern lassen sich extrem ionenarme Gewässer im Westen des Transektivs unterscheiden (Abb. 10 - 12); sie entwässern die pliozän-pleistozänen wenig verfestigten Sandsteine (Formação Solimões), die in weiten Teilen des zentralen Amazonas-Beckens vorherrschen. Diese extrem ionenarmen Gewässer zeigen eine große chemische Verwandtschaft mit Fließgewässern nördlich und südlich von Manaus (Formação Barreiras) und gehören zu den elektrolytärmsten Gewässern überhaupt, die bisher in Amazonien angetroffen wurden (SIOLI 1954b, 1968a, b; FITTKAU 1964, 1971; SCHMIDT 1972; BRINKMANN & DOS SANTOS 1973; FURCH 1976, 1982, 1984; GEISLER & SCHNEIDER 1976; FURCH & KLINGE 1978; FURCH & JUNK 1980; FURCH et al. 1982).

Neben dem häufigen Wechsel der chemischen Eigenschaften der Fließgewässer im Verlauf des Transamazônica-Transektivs zeigt sich eine von Osten nach Westen kontinuierlich verlaufende Abnahme in ihrem Ionengehalt. Das Ausmaß dieser Tendenz zeigt allerdings Unterschiede bei den einzelnen chemischen Parametern. Eine relative starke Abnahme von Ost nach West ist beim pH-Wert, der spezifischen Leitfähigkeit, dem Gesamtgehalt an gelösten mineralischen Substanzen (TDS) und den Gehalten an Na, Mg, Sr, Ba, HCO_3 und Mn zu beobachten (Abb. 10 - 12). Eine schwächer ausgeprägte Abnahme zeigt sich beim K-, Cl-, SO_4 -, Si- und Fe-Gehalt (Abb. 10 und 11), während eine entsprechende Tendenz beim Al-, Cu-, NH_4 -, PO_4 -, TOC- und Schwebstoffgehalt (TSS) gar nicht oder nur schwach ausgeprägt ist (Abb. 12 und 13).

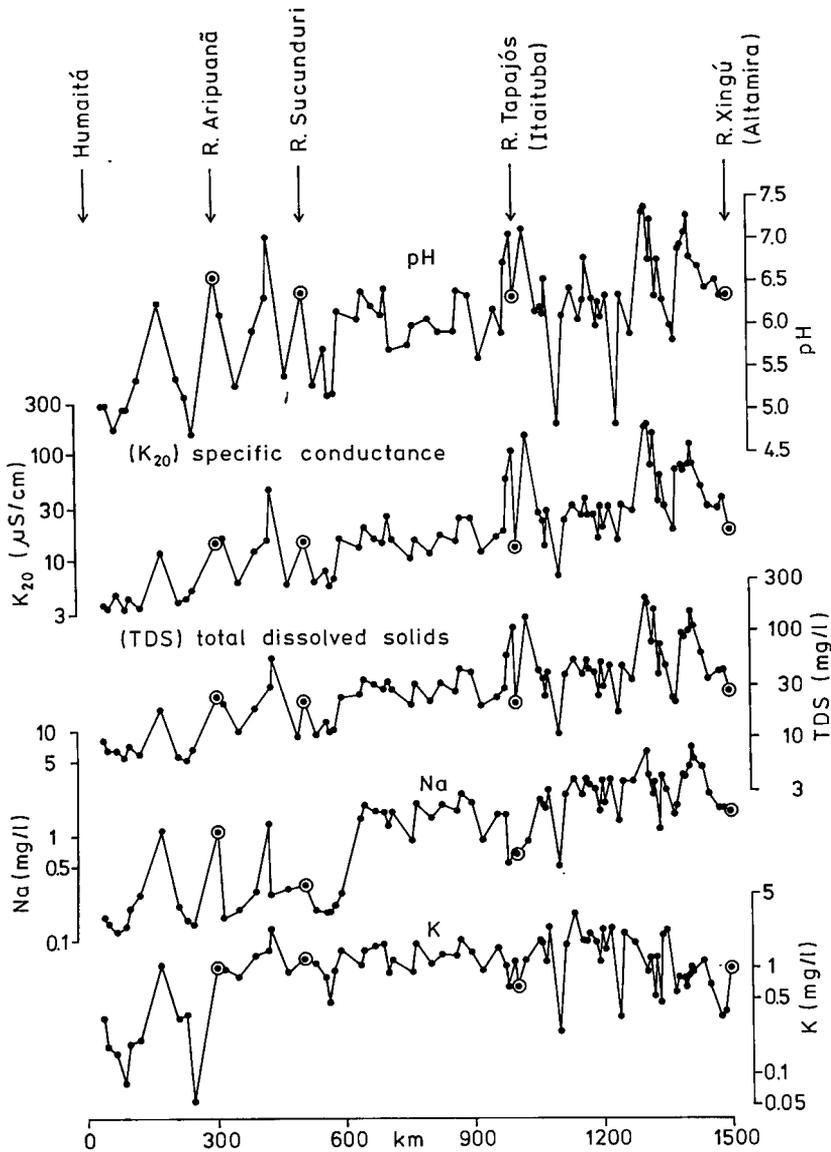


Abb. 10:

Schwankungen des pH-Wertes, der spezifischen Leitfähigkeit, des gelösten anorganischen Substanzen (TDS: Summe von Hauptkationen, -anionen und SiO_2) und des Gehaltes an Na und K in den untersuchten Fließgewässern des Transamazônica-Transekts. Die vier größten Ströme, die die Transamazônica kreuzen, sind durch Kreise gekennzeichnet.

Fig. 10:

Variation in pH, specific conductance, total dissolved solids (TDS: sum of major cations, major anions, and SiO_2) and Na and K in waters along the Transamazon highway transect. The 4 big rivers, which are crossed by the Transamazon highway are marked by circles.

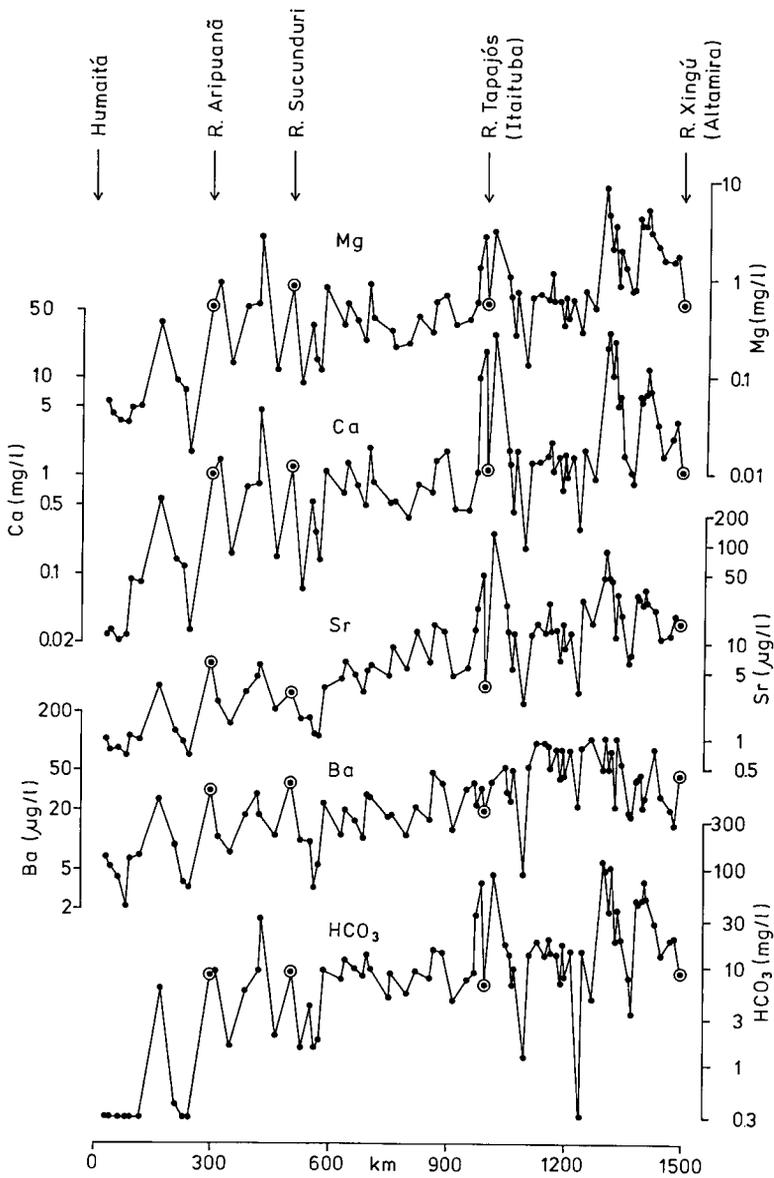


Abb. 11:
Schwankungen des Gehaltes an Mg, Ca, Sr, Ba und HCO_3 in den untersuchten Fließgewässern des Transamazônica-Transekts. Weitere Erklärungen s. Abb. 10.

Fig. 11:
Variation in Mg, Ca, Sr, Ba, and HCO_3 levels in waters along the Transamazon highway transect. For further explanation see fig. 10.

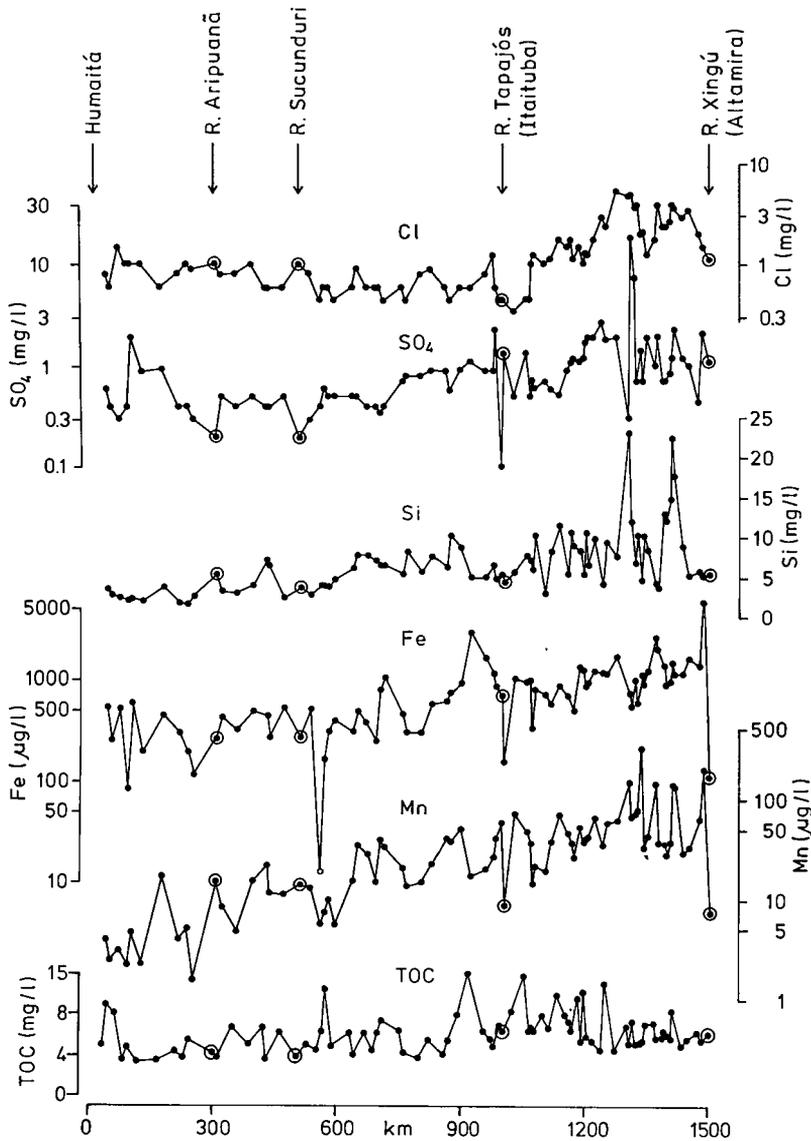


Abb. 12:

Schwankungen des Gehaltes an Cl, SO₄, Si, Fe, Mn und Ges. C_{org.} (TOC) in den untersuchten Fließgewässern des Transamazônica-Transektiv. Weitere Erklärungen s. Abb. 10.

Fig. 12:

Variation in Cl, SO₄, Si, Fe, Mn, and total organic carbon (TOC) levels in waters along the Transamazon highway transect. For further explanation see fig. 10.

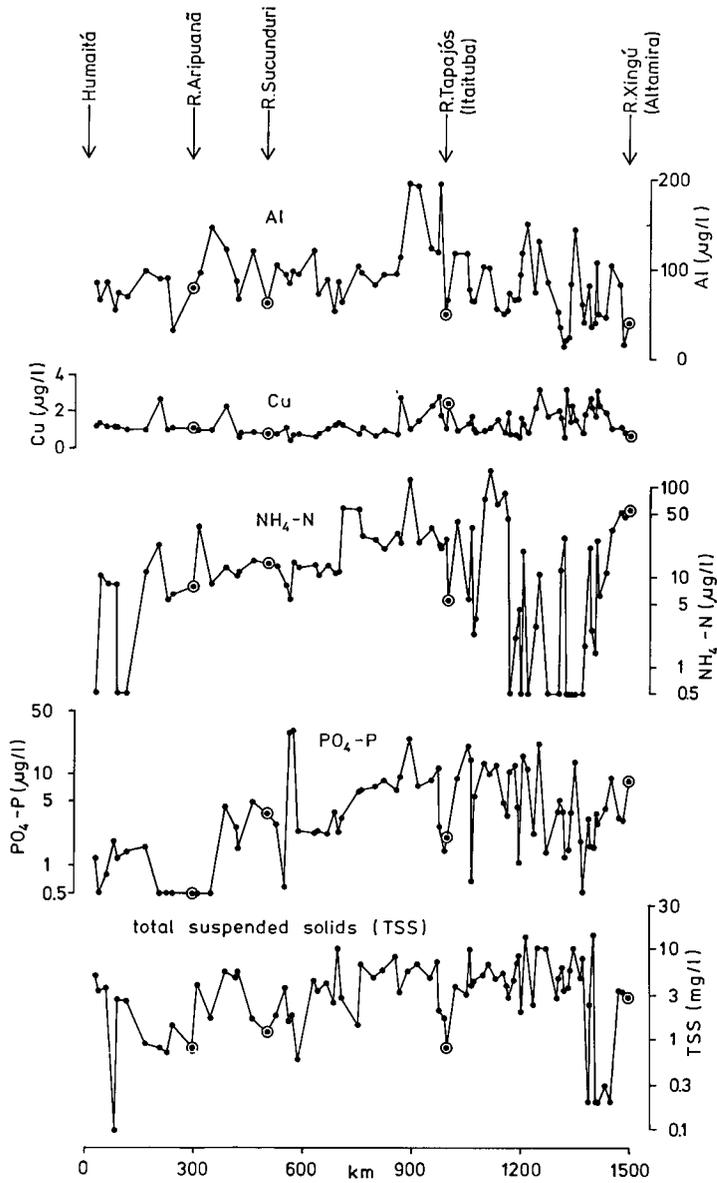


Abb. 13:
Schwankungen des Gehaltes an Al, Cu, N, P und Schwebfracht (TSS) in den untersuchten Fließgewässern des Transamazônica-Transekts. Weitere Erklärungen s. Abb. 10.

Fig. 13:
Variation in Al, Cu, N, P, and total suspended solids (TSS) in waters along the Transamazon highway transect. For further explanation see fig. 10.

Bei einem Vergleich der in den Abb. 10 - 13 dargestellten Kurven findet sich bei einer Reihe der untersuchten Parameter eine auffallende Parallelität. Die Kurvenbilder für den pH-Wert, die spezifische Leitfähigkeit und den Gehalt an gelösten Substanzen (TDS), Mg, Ca, Sr und HCO_3 sind praktisch identisch, lediglich die Ausprägung der Minima und Maxima kann stark variieren. Die Kurvenbilder für den Na-, K-, Ba-, Fe- und Mn-Gehalt der Gewässer zeigen nur noch streckenweise eine Parallelität mit den zuvor genannten Parametern, während der Kurvenverlauf für den Cl-, SO_4 -, Si-, Al-, Cu-, NH_4 -, PO_4 -, TOC- und Schwebstoffgehalt jeweils nur noch lokal Ähnlichkeiten mit dem der anderen Parameter aufweist. Diese Beobachtungen zeigen, daß die untersuchten Gewässer nicht einem chemisch homogenen Gewässertypus angehören, der in verschiedenen Verdünnungsstufen auftritt, sondern daß erhebliche Unterschiede in der chemischen Komposition zwischen den Gewässern vorhanden sein müssen (s. auch Abb. 8 und 9).

Die differenzierten Angaben zur räumlichen Verteilung geologischer Formationen, die den Karten des PROJETO RADAM zu entnehmen sind, lassen es zu, die Gewässer mit der Geologie ihrer Einzugsgebiete in Zusammenhang zu bringen. Deshalb konnte der Versuch gemacht werden, Gewässer derselben geologischen Herkunft zu Gruppen zusammenzustellen, und diese Gruppen bezüglich ihrer chemischen Charakteristika gegeneinander abzugrenzen. Insgesamt konnten 47 Fließgewässer 8 geologischen Formationen zugeordnet werden (Tab. 6). Die Geologie im Einzugsgebiet der restlichen 33 Gewässer war hingegen so heterogen, daß eine Zusammenstellung von Gewässern zu Gruppen nicht sinnvoll erschien. Von den 8 ausgewählten Gewässergruppen sind 3 präkambrischer, 1 devonischer, 2 karbonischer, 1 jurassisch-kretazischer und 1 plio-pleistozäner Herkunft. Einen Überblick über die ionale Zusammensetzung und den Gesamtgehalt an Hauptkationen und -anionen der zu Gruppen zusammengefaßten Gewässer im Vergleich mit dem Weltdurchschnitt gibt Abb. 14.

Die ionenreichsten Gewässer, die entlang des Transamazônica-Transekte anzutreffen sind, sind devonischer Herkunft (Tab. 6, Gruppenindex 1, Abb. 14 - 1, Formação Curuá). Ihr Ionengehalt liegt mit mehr als durchschnittlich $3300 \mu\text{Val/l}$ sogar oberhalb des Weltdurchschnitts. In ihren Ionenproportionen zeigen diese Gewässer weitgehend die Merkmale der typischen Ca-Karbonatgewässer (Weltdurchschnitt), allerdings mit stärker ausgeprägten Dominanzen von Ca und HCO_3 und geringeren Anteilen an Na, Cl und SO_4 als der Weltdurchschnitt.

Noch ausgeprägter sind die Dominanzen von Ca und HCO_3 in den Gewässern der karbonischen Formationen Nova Olinda und Itaituba (Tab. 6, Gruppenindex 2, Abb. 14-2). Die Ca- und HCO_3 -Anteile sind so überragend, daß mit Ausnahme von Mg keines der übrigen Anionen und Kationen in nennenswerten Prozentsätzen in Erscheinung tritt. Die Gesamtionenmengen in den Gewässern sind mit durchschnittlich ca. $2300 \mu\text{Val/l}$ für amazonische Verhältnisse noch relativ hoch (vgl. auch SIOLI 1963). Die chemischen Charakteristika der Gewässer beider Gruppen stimmen weitgehend mit jenen überein, die für die 10 ionenreichsten Gewässer in Abb. 9B dargestellt sind.

Die letzte Gruppe der relativ ionenreichen Gewässer ist jurassisch-kretazischer Herkunft (Tab. 6, Gruppenindex 3, Diabasio Penatecaua, Abb. 14-3); ihre Gewässer haben nur noch geringe Ähnlichkeit mit typischen Ca-Karbonat-Gewässern. Zwar sind auch in ihnen Karbonat unter den Anionen und Ca unter den Kationen dominant, doch ist der Ca-Anteil wesentlich kleiner als bei den ionenreichen Gewässern der ersten beiden Gruppen und kaum größer als der Mg-Anteil, so daß sie als Erdalkali-Karbonat-Gewässer beschrieben werden können.

Tab. 6: Auswahl von geologischen Formationen aus dem Bereich des Transamazônica-Transekts (mit Angaben über vorherrschende Gesteinsarten), deren zugeordnete Fließgewässer jeweils zu Gruppen zusammengestellt wurden. Der Index für die Gewässergruppen ist in der rechten Spalte angegeben.

Tab. 6: Characterization of a selection of geological formations from the Transamazon highway transect area (with remarks on predominant rock types), whose respective freshwaters were grouped. The index for each group is given in the last column.

Geologisches Zeitalter	Formation	Vorherrschendes Gestein	Gruppenindex
Präkambrium	Xingú	Granite, Granodiorite, Quarzite, Schiefer, Diorite, Gneise	4
Präkambrium	Prosperança	Sandsteine, Arkosen, Itabirite	7
Präkambrium	Beneficente	Quarzite, Itabirite	6
Devon	Curuá	glimmerführende Sandsteine und Siltite	1
Karbon	Monte Alegre	Sandsteine	5
Karbon	Nova Olinda/ Itaituba	Anhydrite, Kalk, Mergel, Sandsteine	2
Jura/Kreide	Penatecaua	Diabase, Granodiorite	3
Pliozän/Pleistozän	Solimões	Sandsteine	8

Die Gewässer der restlichen 5 Gruppen (Tab. 6, Gruppenindices 4 - 8, Abb. 14 - 4, 5, 6, 7, 8) sind durchweg mehr oder minder extrem elektrolytarm. In keinem Falle handelt es sich um Ca-Karbonatgewässer oder Erdalkali-Karbonatgewässer; eine Dominanz von HCO_3 unter den Anionen ist häufiger als eine Cl-Dominanz anzutreffen. Unter den Kationen findet sich stets eine Dominanz der Alkaliionen, auch wenn diese in der Regel bei weitem nicht so stark ausgeprägt ist wie die Ca-Dominanz bei Ca-Karbonatgewässern. Bei diesen ionenarmen Gewässern handelt es sich also entweder um Alkali-Karbonat- oder Alkali-Chlorid-Gewässer. Den krassesten Gegensatz zu den Karbonatgewässern des Karbons und Devons bilden die Gewässer der plio-pleistozänen Solimões-Formation (Tab. 6, Gruppenindex 8, Abb. 14-8); neben ihren extrem geringen Ionengehalten von durchschnittlich ca. $60 \mu\text{Val/l}$ sind sie karbonatfrei und auffallend arm an Ca. Die Dominanz der Alkali-Ionen unter den Kationen und des Chlorids unter den Anionen ist bei ihnen am stärksten ausgeprägt. Ionengehalt und Ionenzusammensetzung dieser Gewässer sind praktisch identisch mit denen der 10 elektrolytärmsten Gewässer im Bereich des Transekts (vgl. Abb. 9C). Somit lassen sich nicht nur große Unterschiede zwischen den elektrolytarmen Gewässern der Gruppen 4 - 8 und elektrolytreichen Gewässern der Gruppen 1 - 3 beobachten, sondern auch innerhalb der Gruppen der elektrolytarmen Gewässer.

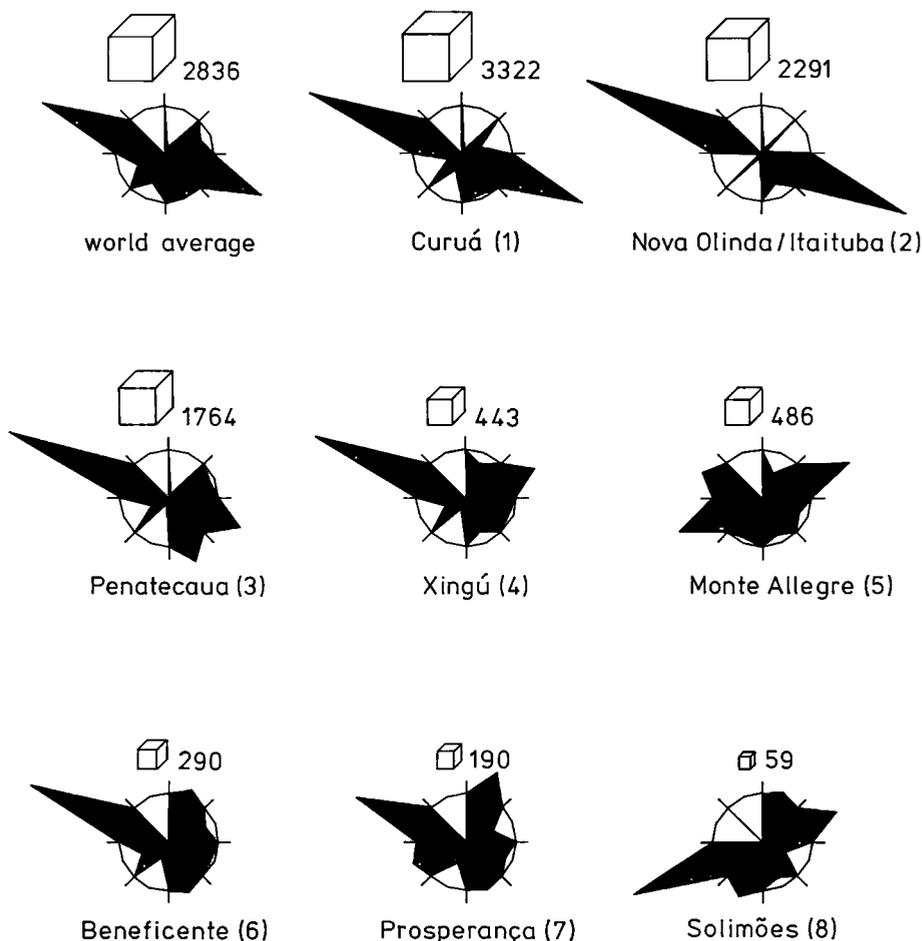


Abb. 14:
 Ionengehalt (Summe von Hauptkationen und -anionen) und Ionendiagramm (nach MAUCHA 1932) von Gewässern verschiedener geologischer Formationen aus dem Bereich des Transamazônica-Transektiv im Vergleich zum Weltdurchschnitt. Weitere Erklärungen zum Ionendiagramm: s. Abb. 8. Die in Klammern gesetzten Zahlen von 1 - 8 kennzeichnen den Gruppenindex (s. Tab. 6).

Fig. 14:
 Ionic content (sum of major cations and major anions) and ionic diagrams, after MAUCHA (1932) of waters flowing from different geological formations along the Transamazon highway transect, compared to the world average. For further explanation of the ionic diagrams see fig. 8. The numbers 1 - 8 in parenthesis refer to the group indices (see tab. 6).

Mit Hilfe von Durchschnittswerten und Standardabweichungen der chemischen Parameter der Gewässergruppen (Tab. 7) wurden die Signifikanzen der Unterschiede in der chemischen Qualität der Gewässergruppen (Gruppenindices 1 - 8) berechnet (t-Test nach RENNER 1970). Hierfür wurden die 20 in Tab. 7 aufgeführten Parameter ausgewählt, die

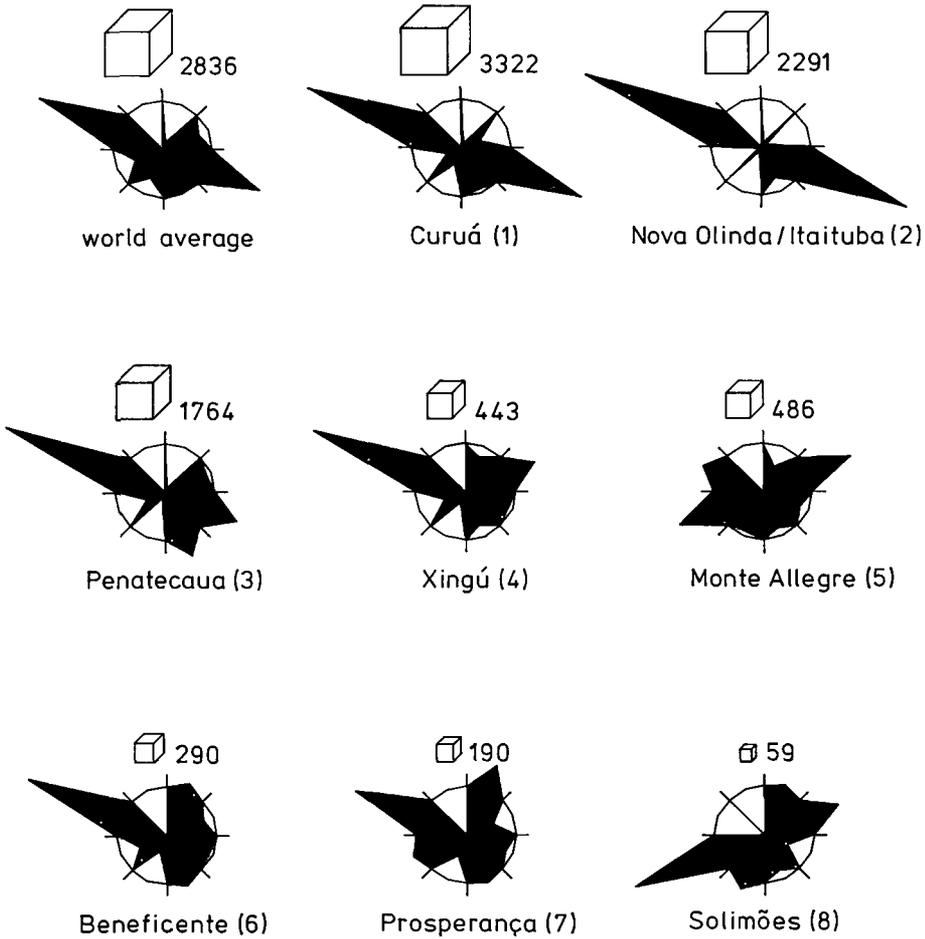


Abb. 14:
 Ionengehalt (Summe von Hauptkationen und -anionen) und Ionendiagramm (nach MAUCHA 1932) von Gewässern verschiedener geologischer Formationen aus dem Bereich des Transamazônica-Transekts im Vergleich zum Weltdurchschnitt. Weitere Erklärungen zum Ionendiagramm: s. Abb. 8. Die in Klammern gesetzten Zahlen von 1 - 8 kennzeichnen den Gruppenindex (s. Tab. 6).

Fig. 14:
 Ionic content (sum of major cations and major anions) and ionic diagrams, after MAUCHA (1932) of waters flowing from different geological formations along the Transamazon highway transect, compared to the world average. For further explanation of the ionic diagrams see fig. 8. The numbers 1 - 8 in parenthesis refer to the group indices (see tab. 6).

Mit Hilfe von Durchschnittswerten und Standardabweichungen der chemischen Parameter der Gewässergruppen (Tab. 7) wurden die Signifikanzen der Unterschiede in der chemischen Qualität der Gewässergruppen (Gruppenindices 1 - 8) berechnet (t-Test nach RENNER 1970). Hierfür wurden die 20 in Tab. 7 aufgeführten Parameter ausgewählt, die

Tab. 7: Fortsetzung
Tab. 7: Continuation

Formation (Anzahl der Proben)	Curuá (4)	Nova Olinda/ Itaituba (3)	Penatecaua (6)	Xingú (14)	Monte Allegre (3)	Beneficiente (4)	Prosperança (5)	Solimões (8)
Val % SO ₄	9,3 (10,1)	2,9 (4,3)	2,8 (1,5)	5,8 (2,4)	22,2 (16,3)	8,8 (6,6)	11,1 (4,7)	30,4 (14,9)
Val % Cl	7,9 (2,8)	1,5 (1,1)	9,7 (2,6)	11,6 (4,0)	44,9 (22,0)	14,8 (10,8)	28,6 (12,3)	69,6 (14,9)
Val % HCO ₃	82,8 (12,1)	95,6 (5,3)	87,5 (3,9)	82,6 (5,1)	32,9 (35,1)	76,3 (16,0)	60,3 (15,9)	- -
Si (mg/l)	13,06 (6,97)	5,42 (0,49)	14,73 (4,65)	7,92 (1,64)	7,13 (2,64)	5,20 (2,22)	3,43 (0,62)	2,70 (0,58)
Sr (µg/l)	55,9 (20,4)	67,9 (56,3)	27,9 (4,8)	9,3 (4,4)	15,6 (12,3)	4,0 (3,6)	2,2 (0,7)	0,9 (0,2)
Ba (µg/l)	70,0 (25,6)	30,4 (7,9)	40,9 (20,8)	33,7 (22,5)	69,9 (43,9)	13,5 (8,5)	11,0 (3,8)	4,8 (1,8)
Al (µg/l)	31,2 (16,5)	119,6 (72,1)	60,5 (28,3)	85,0 (36,4)	97,0 (30,1)	86,1 (17,1)	115,7 (19,2)	67,0 (19,3)
Fe (µg/l)	703 (206)	857 (173)	1149 (239)	576 (267)	1305 (305)	318 (56)	457 (84)	317 (211)
Mn (µg/l)	90,9 (37,6)	58,6 (16,3)	66,0 (52,1)	30,9 (16,0)	51,9 (14,3)	11,2 (4,0)	11,0 (4,2)	3,4 (1,4)
Cu (µg/l)	1,9 (1,1)	1,3 (0,5)	2,4 (0,5)	1,1 (0,3)	2,5 (0,8)	0,9 (0,2)	1,2 (0,6)	1,1 (0,1)
H (µg/l)	82 (62)	117 (65)	129 (59)	677 (457)	5765 (8432)	2095 (2821)	3152 (2090)	10160 (4830)

den chemischen Charakter der Gewässer sowohl bezüglich der absoluten Gehalte von Haupt- und Spurenkomponenten als auch bezüglich der relativen Gehalte (Ionenproportionen) widerspiegeln. Unterschiede zwischen den Durchschnittswerten sind für die absoluten Gehalte an Hauptkationen in der Regel sehr viel größer als die Unterschiede zwischen den relativen Gehalten dieser Elemente. Besonders auffällig zeigt sich dies beim Ca. Die Gewässergruppe mit den höchsten Ca-Konzentrationen (Gruppenindex 1) ist mehr als 400-fach Ca-reicher als die Ca-ärmste Gruppe (Gruppenindex 8), während die Gruppe mit dem höchsten Ca-Prozentsatz (Gruppenindex 2) nur gut 6-fach Ca-reicher ist als die Gruppe mit den niedrigsten Ca-Prozentsatz (Gruppenindex 8). Andererseits zeigt sich, daß signifikante Unterschiede ($p < 0,01$) zwischen den Gruppen bei den absoluten Hauptkationengehalten durchaus nicht häufiger als bei den Kationenproportionen auftreten. Dies ist wiederum ein Hinweis auf die Relevanz der Ionenproportionen für die chemische Charakterisierung dieser Gewässer.

Einen Überblick über die gesamte Anzahl der ausgewählten gewässerchemischen Parameter, in denen sich jeweils eine Gewässergruppe von allen anderen Gruppen signifikant ($p < 0,01$) unterscheidet, gibt Abb. 15. Sie zeigt, daß es keine Gewässergruppe gibt, die sich in allen der 20 gewählten Parameter signifikant von einer anderen Gruppe unterscheidet. Die geringsten chemischen Ähnlichkeiten sind zwischen Gruppe 3 (Formação Penatecaua) und Gruppe 8 (Formação Solimões) zu beobachten, die in 18 Parametern signifikant voneinander verschieden sind. Das andere Extrem wird von den Gewässergruppen 6 (Formação Beneficente) und 7 (Formação Prosperança) gebildet, die in keinem der 20 gewählten Parameter signifikant verschieden sind. Zwischen diesen beiden Extremen gibt es fließende Übergänge im Ausmaß der chemischen Verwandtschaft zwischen den Gewässergruppen;

Für einen Überblick über die chemischen Eigenschaften der Fließgewässer des Transamazônica-Transekt bezüglich ihrer Stellung im amazonischen Maßstab soll abschließend ein Vergleich mit den Fließgewässern des Cuiabá – Porto Velho – Manaus – Transekt (NS-Transekt, FURCH & JUNK 1980) vorgenommen werden. Unterschiede finden sich zunächst in der Abfolge geologischer Formationen im Bereich der beiden Straßentransekte. Während die Geologie im Bereich des Transamazônica-Transekt (OW-Transekt) über weite Strecken sehr kleinräumig wechselt, verläuft das NS-Transekt über größere Strecken durch jeweils geologisch einheitliche Gebiete. Dies spiegelt sich unmittelbar wieder in einem starken Wechsel der chemischen Eigenschaften der Fließgewässer binnen kürzester Distanzen einerseits (OW-Transekt) bzw. in einer relativ großen chemischen Uniformität der Fließgewässer binnen großer Distanzen andererseits (NS-Transekt). Beim Vergleich der Chemie der Fließgewässer beider Transekte finden sich jedoch eine Reihe von Gemeinsamkeiten. Ebenso wie bei den Fließgewässern des OW-Transekt dominieren auch bei den Fließgewässern des NS-Transekt ionenarme Gewässer. Ihr durchschnittlicher Gehalt an Hauptkationen ist nahezu identisch mit dem der Fließgewässer des OW-Transekt. Auch sind extrem ionenarme Fließgewässer mit ausgeprägter Alkalidominanz ebenso wie extrem ionenreiche Ca- bzw. Ca-Mg-Karbonat-Gewässer im Bereich beider Transekte anzutreffen, und für eine Reihe von Elementen sind die auftretenden Konzentrationsspannen in den Fließgewässern beider Transekte recht ähnlich.

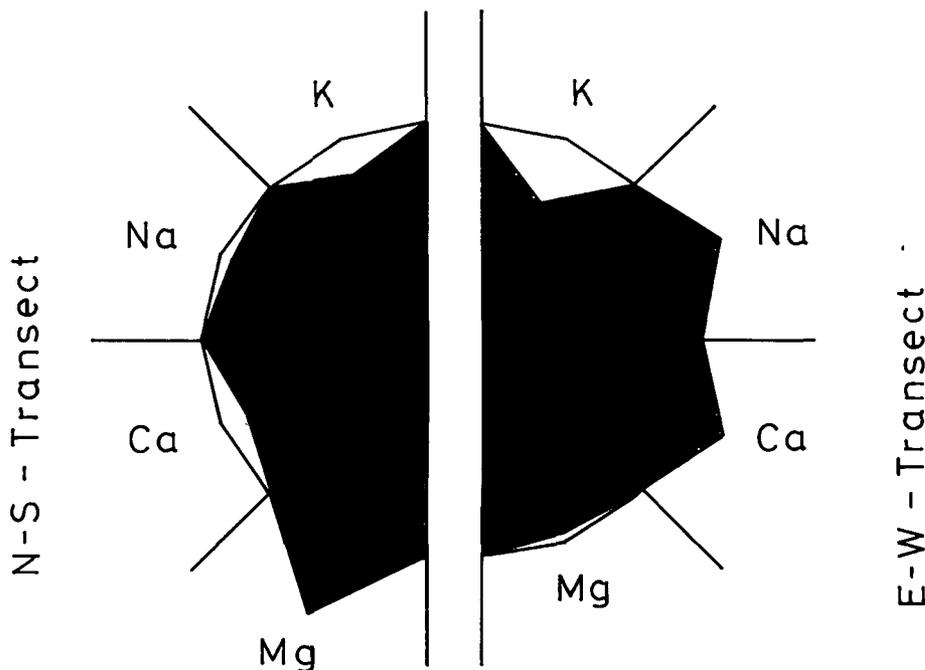


Abb. 16:
 Vergleich der durchschnittlichen Kationenverteilung von Fließgewässern zweier Straßen- transekte in Amazonien. NS-Transsekt: Cuiabá – Porto Velho – Manaus (FURCH & JUNK 1980). EW-Transsekt: Altamira – Itaituba – Humaitá (Transamazonica). Weitere Erklärungen s. Abb. 8.

Fig. 16:
 Comparison between average distribution of major cations of freshwaters along two road transects in Amazonia. NS-transect: Cuiabá – Porto Velho – Manaus (FURCH & JUNK 1980). EW-transect: Altamira – Itaituba – Humaitá (Transamazon highway). For further explanation see fig. 8.

Ein detaillierter Vergleich der chemischen Charakteristika der untersuchten Fließgewässer in Abhängigkeit von der Geologie ihrer Einzugsgebiete soll später erfolgen, wenn die chemischen Daten von Fließgewässern weiterer Straßen- transekte vorliegen. Ein solcher Vergleich muß auch die Tatsache berücksichtigen, daß die Aussagen über die chemische Qualität der untersuchten Fließgewässer auf einer jeweils einmaligen Probenahme basieren und jahreszeitliche Änderungen im Gehalt an gelösten Substanzen nicht erfassen. In großen amazonischen Strömen sind derartige Änderungen im Jahresgang verschieden stark ausgeprägt (ANONYMUS 1972; GIBBS 1972; STALLARD 1980; FURCH 1982; KEMPE 1982; FURCH et al. 1983; DOS SANTOS 1983; FURCH & JUNK 1985). Sie sind grundsätzlich auch in Fließgewässern mit geringer Wasserführung zu erwarten. Neuere Untersuchungen an zentralamazonischen Waldbächen belegen dies (FURCH unpubl.). Inwieweit jedoch auch die grundsätzlichen Merkmale der chemischen Struktur der Fließgewässer davon betroffen sind, muß im Einzelfalle überprüft werden.

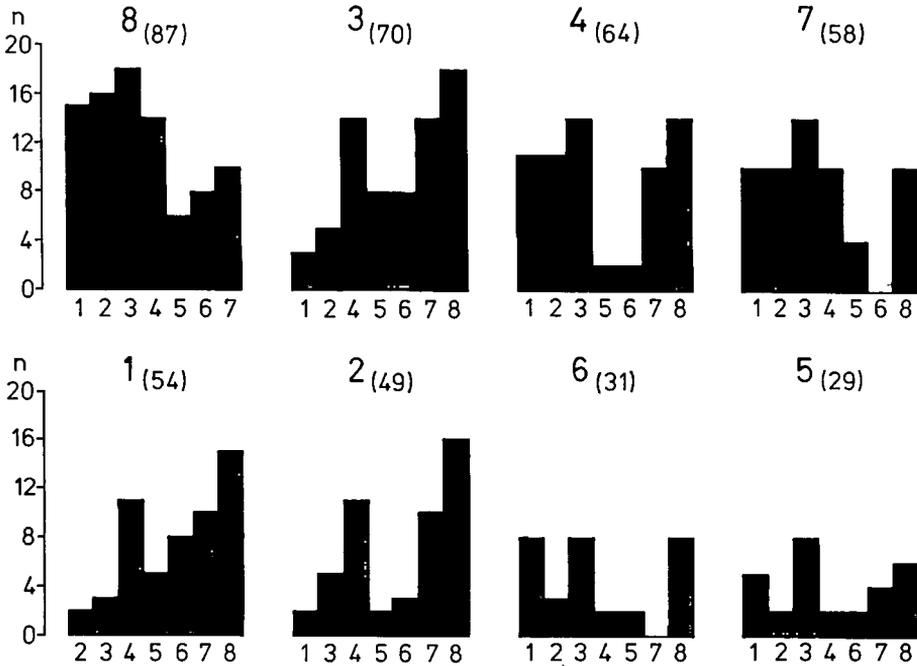


Abb. 15:

Anzahl (n) von chemischen Parametern (vgl. Tab. 7), in denen sich die Gewässer einer geologischen Formation von denen der anderen Formationen signifikant ($p < 0,01$) unterscheiden. Die Zahlen unter und über den Säulendiagrammen kennzeichnen den Gruppenindex (s. Tab. 6). Die eingeklammerten Zahlen sind die Summe aller chemischen Parameter, in denen sich jeweils eine Gewässergruppe von den übrigen 7 Gewässergruppen unterscheidet.

Fig. 15:

Number (n) of chemical parameters (compare tab. 7) for which waters of a given geological formation are statistically significantly ($p < 0.01$) different from those flowing from other formations. The numbers below and above the diagrams refer to the group indices (see tab. 6), the numbers in parenthesis refer to the sum of all chemical parameters, by which a given group of waters is statistically significantly different from the other 7 groups of waters.

Auffallende Unterschiede zeigen sich dagegen beim Mg. Im Vergleich mit den Fließgewässern des OW-Transekts sind die Fließgewässer des NS-Transekts deutlich Mg-reicher, der durchschnittliche Gehalt liegt fast doppelt so hoch, und Mg-dominierte Gewässer sind sehr viel häufiger anzutreffen als Na-dominierte. Dementsprechend findet sich auch bei den Proportionen der Hauptkationen ein durchschnittlich höherer Mg-Prozentsatz, der eine Verschiebung der Anteile von Na, K und Ca an der Kationensumme zur Folge hat. Eine Gegenüberstellung der Kationenproportionen in den Fließgewässern beider Transekte findet sich in Abb. 16.

Resumo

Foi analisada a composição química da água de 80 igarapés e rios, que cortam a Transamazônica num trecho de cerca de 1.500 km entre Altamira e Humaitá (pH, condutividade elétrica, material em suspensão, cor, alcalinidade, Cl, SO₄, Na, K, Mg, Ca, Ba, Sr, Al, Fe, Mn, Cu, Si, C_{org.}, NH₄, e PO₄).

1. Em comparação com o valor médio mundial, a maioria dos rios e igarapés estudados mostram baixas e, até extremamente baixas, concentrações dos cátions principais (Na, K, Mg, Ca), ânions principais (HCO₃, Cl, SO₄) e dos elementos traços Ba, Sr, Al e Cu. As concentrações de Si e Fe correspondem ao valor médio mundial, enquanto as de Mn e H são superiores.

2. Apesar da frequente pobreza em elementos inorgânicos, os rios e igarapés investigados são quimicamente muito heterogêneos. Isso é demonstrado pela grande diferença entre os valores máximos e mínimos para vários parâmetros. A variação é especialmente grande para os parâmetros que influenciam a alcalinidade e a dureza (Ca, Mg, HCO₃, H).

3. A relação das águas, de acordo com a frequência das concentrações encontradas de cada elemento, mostra, em geral, uma distribuição que não corresponde à distribuição normal. Considerando as concentrações de Ca, HCO₃, Mg, Na, SO₄, Sr, Ba, Mn e Fe o maior número das águas investigadas encontra-se dentro dos primeiros dez porcentos da concentração máxima.

4. Uma listagem dos rios e igarapés, de acordo com a sequência da dominância dos íons principais, resulta em 26 combinações iônicas. Águas dominadas por Na e HCO₃ são as mais frequentes, seguidas por águas influenciadas por Ca e HCO₃. Porém, uma comparação das águas com idêntica sequência de íons mostra, que elas não pertencem a um tipo homogêneo por causa das grandes diferenças quantitativas em relação às percentagens dos íons. Um bom método para demonstrar similaridade, entre águas em relação à sua concentração de íons, é a comparação de seus diagramas iônicos, que permitem a comparação direta dos valores para as proporções e dominâncias dos íons principais.

5. A comparação das águas desse transecto da Transamazônica, na base dos seus diagramas iônicos, mostra que as águas mais ricas em íons são intimamente dominadas por Ca e HCO₃ (águas carbonatadas). As águas mais pobres em íons são de natureza alcali-cloretadas (Na, K). A maioria porém, pertence as águas carbonatadas sem dominância nítida de um dos cátions principais. A ocorrência de HCO₃, que até em águas pobres em íons é o ânion dominante, explica-se pela decomposição química dos silicatos.

6. Águas de origem geológica similar foram listadas em grupos e comparadas através de seus diagramas iônicos, concentrações totais de íons e avaliadas em relação a diferenças significantes através de 20 parâmetros.

Os três grupos de águas ricas em íons são de origem devônica, carbônica ou jurasso-cretácica. Eles pertencem às águas carbonatadas de Ca (devônio, carbônico) e às águas carbonatadas de Ca e Mg (jurasso – cretácico). As águas, dos outros 5 grupos, são de origem precâmbria, carbônica ou plio-pleistocênica. São pobres até extremamente pobres em íons. Nenhuma delas pertence ao grupo das águas carbonatadas de Ca ou alcalino-terrosas. Em geral, os cátions dominantes são íons alcalinos (Na, K). O ânion principal mais frequente é HCO₃ seguido por uma dominância de cloretos.

A maior similaridade química encontra-se entre 2 grupos de águas, ambos de origem precâmbria (pre-cambriano), que se distinguem significativamente em nenhum dos 20 parâmetros usados. As menores similaridades químicas ocorrem entre as águas de origem jurasso-cretácica e à queelas de origem plio-pleistocênica, as quais mostram diferenças significantes em 18 dos 20 parâmetros usados.

Summary

Chemical analyses were carried out on 80 water samples taken from south-eastern Amazonia along a 1500 km long EW-transect of the Transamazon highway between Altamira and Humaitá (Brazil) (pH, specific conductance, total suspended solids, color, alkalinity, Cl, SO₄, Na, K, Mg, Ca, Ba, Sr, Al, Fe, Mn, Cu, Si, C_{org.}, NH₄, and PO₄).

The results may be summarized as follows:

1. In comparison with the world average most waters have low to extremely low levels of major cations (Na, K, Mg, Ca), major anions (HCO_3 , Cl, SO_4) and the trace metals Ba, Sr, Al, and Cu. The levels of Si and Fe are similar to the world average while the levels of Mn, and H are above the world average.

2. In spite of the general poverty of elements, the waters are chemically very heterogeneous as shown by large differences between minimum and maximum values for a number of chemical parameters. The ranges of parameters which govern the alkalinity and hardness (Ca, Mg, HCO_3 , H) are particularly wide.

3. The ordination of waters with respect to the frequency of observed concentrations of a given element usually shows a non-normal distribution pattern. For levels of Ca, HCO_3 , Mg, Na, SO_4 , Sr, Ba, Mn and Fe most waters fall in the lowest tenth of the total concentration range.

4. Ordination of the waters with respect to sequences of major ion dominance results in the recognition of 26 ionic combinations. Most frequently waters are dominated by Na and HCO_3 , followed by those dominated by Ca and HCO_3 . Comparison of waters with identical ionic sequences, however, shows that a chemically uniform water type is not represented, since differences in the percentages of various ions are too great. A good method for depicting chemical relationships due to ionic milieu is the comparison of ionic diagrams. This allows direct perception of the proportions of major ions and their dominances.

5. Comparison of the ionic diagrams of waters crossing Transamazon highway transect shows that the ion-richest waters have clear Ca and HCO_3 dominance (carbonate waters). The ion poorest waters are of an alkali (Na, K) – chloride nature. However, the majority are carbonate waters lacking well-expressed dominance of a single major cation. The presence of HCO_3 , frequently the dominant anion even in ion poor waters, may be largely explained by the chemical weathering of silicate minerals.

6. Waters flowing from geologically uniform watersheds were grouped and their ionic diagrams and ionic contents compared. With respect to 20 different chemical parameters significant differences were tested.

Three groups of ion rich waters represent watersheds composed of Devonian, Carboniferous and Jurassic-Cretaceous rocks, respectively. They are Ca-carbonate waters, except those flowing from Jurassic-Cretaceous watersheds, which are Ca-Mg-carbonate waters. The waters of the remaining 5 groups flow from watersheds composed of Precambrian, Carboniferous and Plio-Pleistocene rocks and are moderately to extremely poor in ions. These groups do not possess Ca- or Ca-Mg-carbonate waters. As a rule Na or K are the dominant cations. Of the anions, HCO_3 is more frequently dominant than is Cl.

The closest chemical relationship is observed between two groups of waters flowing from Precambrian watersheds. There is no significant differences between any of the 20 selected parameters. The most distant chemical relationship is observed between waters from Jurassic-Cretaceous watersheds and those from Plio-Pleistocene watersheds. They differ statistically in 18 of the 20 selected parameters.

Zusammenfassung

Aus dem südöstlichen Amazonasgebiet wurden 80 Bäche, Flüsse bzw. Ströme, die das ca. 1500 km lange Transamazônica-Transect zwischen Altamira und Humaitá kreuzen, chemisch analysiert (pH, spezifische Leitfähigkeit, Schwebfracht, Farbe, Alkalinität, Cl, SO_4 , Na, K, Mg, Ca, Ba, Sr, Al, Fe, Mn, Cu, Si, C_{org} , NH_4 und PO_4).

Die Ergebnisse lassen sich in folgenden Punkten zusammenfassen:

1. Im Vergleich mit dem Weltdurchschnitt zeigt die Mehrzahl der untersuchten Fließgewässer geringe bis extrem geringe Gehalte an Hauptkationen (Na, K, Mg, Ca), Hauptanionen (HCO_3 , Cl, SO_4) und den Spurenelementen Ba, Sr, Al und Cu. Der Si- und Fe-Gehalt ähnelt dem Weltdurchschnitt, der Mn- und H-Gehalt liegt sogar oberhalb.

2. Trotz der häufigen Elementarmut sind die untersuchten Fließgewässer chemisch sehr heterogen, was durch weite Konzentrationsspannen zwischen den beobachteten Minimal- und Maximalwerten für eine Reihe der chemischen Parameter zum Ausdruck kommt. Besonders weit sind die Spannen bei jenen Parametern, die Alkalinität und Härte der Gewässer bestimmen (Ca, Mg, HCO_3 , H).

3. Eine Aufgliederung der Fließgewässer hinsichtlich der Häufigkeit auftretender Konzentrationen eines jeweiligen Elements zeigt in der Regel ein nicht der Normalverteilung entsprechendes Verteilungsmuster. Bezüglich der Gehalte an Ca, HCO₃, Mg, Na, SO₄, Sr, Ba, Mn und Fe fällt jeweils die höchste Anzahl der untersuchten Gewässer ins unterste Zehntel der gesamten Konzentrationsspanne.

4. Eine Aufgliederung der Fließgewässer nach der sequentiellen Abfolge ihrer Hauptionendominanzen führt zur Unterscheidung von 26 Ionenkombinationen. Na- und HCO₃-dominierte Gewässer sind am häufigsten vertreten, ihnen folgen die Ca- und HCO₃-dominierten Gewässer. Ein Vergleich von Gewässern mit identischer Ionensequenz ergibt jedoch, daß sie nicht einem chemischen einheitlichen Gewässertyp angehören, da die numerischen Beträge für die prozentualen Ionenanteile zu unterschiedlich sind. Eine gute Methode, Verwandtschaften zwischen Gewässern bezüglich ihres Ionenmilieus sichtbar zu machen, ist der Vergleich ihrer Ionendiagramme, die die Beträge für die Hauptionenproportionen und -dominanzen direkt erfaßbar machen.

5. Ein Vergleich der Gewässer des Transamazônica-Transekt an Hand ihrer Ionendiagramme zeigt, daß die ionenreichsten Gewässer stark ausgeprägte Dominanzen von Ca und HCO₃ aufweisen (Karbonatgewässer), die ionenärmsten Gewässer Alkali (Na, K) – chloridischer Natur, die Mehrzahl aber Karbonatgewässer ohne eine stark ausgeprägte Dominanz eines der Hauptkationen sind. Das Vorkommen von HCO₃, das auch in ionenarmen Gewässern häufig dominantes Anion ist, läßt sich überwiegend auf die chemische Verwitterung von Silikatmineralien zurückführen.

6. Fließgewässer von jeweils derselben geologischen Herkunft wurden zu Gruppen zusammengestellt, an Hand ihrer Ionendiagramme und -gehalte miteinander verglichen und mit Hilfe von 20 chemischen Parametern auf signifikante Unterschiede überprüft.

Die 3 Gruppen ionenreicher Gewässer sind devonischer karbonischer oder jurassisch-kretazischer Herkunft. Es sind Ca-Karbonatgewässer (Devon, Karbon) und Ca-Mg-Karbonatgewässer (Jura-Kreide). Die Gewässer der restlichen 5 Gruppen sind präkambrischer, karbonischer oder plio-pleistozäner Herkunft und mäßig bis extrem ionenarm. In keinem Falle handelt es sich um Ca- oder Erdalkali-Karbonatgewässer. Unter den Kationen sind in der Regel Alkaliionen (Na, K) dominant, unter den Anionen tritt eine HCO₃-Dominanz häufiger als eine Cl-Dominanz auf.

Die größte chemische Verwandtschaft findet sich zwischen 2 Gruppen von Gewässern, die beide präkambrischer Herkunft sind und sich in keinem der 20 ausgewählten Parameter signifikant unterscheiden. Die geringsten chemischen Ähnlichkeiten sind zwischen den Gewässern jurassisch-kretazischer Herkunft und denen plio-pleistozäner Herkunft festzustellen, die in 18 der 20 Parameter signifikant voneinander verschieden sind.

Danksagung

Mein besonderer Dank gilt Frau K. Junk und Frau H. Purnhagen, die Probenahme und Messungen im Feld durchführten, Herrn J. Dieterich und Herrn D. Lemcke, die die Wasserproben chemisch analysierten, Herrn Dr. H. Klinge für seine kritischen Anmerkungen und Anregungen bei der Abfassung des Manuskriptes, Frau E. Harms und Frau F. Möller für die Anfertigung der Abbildungen und Frau Dr. E. Cox für ihre Hilfe bei der Übersetzung ins Englische.

Literatur

- ANONYMUS (1972): Die Ionenfracht des Rio Negro, Staat Amazonas, Brasilien, nach Untersuchungen von Dr. Harald Ungemach.- Amazoniana 3: 175 - 185.
- BOWEN, H. J. M. (1966): Trace Elements in Biochemistry.- Academic Press, London, New York, 241 pp.
- BOWEN, H. J. M. (1979): Environmental Chemistry of the Elements.- Academic Press, London, New York, 333 pp.
- BRINKMANN, W. L. F. (1981): Zum Chemismus von Schwarzwässern in Zentralamazonien.- Beitr. Hydrol. Sonderheft 2: 121 - 135.

- BRINKMANN, W. L. F. & A. DOS SANTOS (1973): Natural waters in Amazonia. V. Soluble calcium properties.- *Acta Amazonica* 3: 33 - 40.
- FITTKAU, E. J. (1964): Remarks on limnology of Central-Amazonian rain-forest streams.- *Verh. Internat. Verein. Limnol.* 15: 1092 - 1096.
- FITTKAU, E. J. (1967): On the ecology of Amazonian rain-forest streams.- *Atas Simpósio Biota Amazônica* 3 (Limnologia): 97 - 108.
- FITTKAU, E. J. (1971): Ökologische Gliederung des Amazonasgebietes auf geochemischer Grundlage.- *Münster. Forsch. Geol. Paläontol.* 20/21: 35 - 50.
- FURCH, K. (1976): Haupt- und Spurenmetallgehalte zentralamazonischer Gewässertypen.- *Biogeographica* 7: 27 - 43.
- FURCH, K. (1982): Jahreszeitliche chemische Veränderungen in einem Várzea-See des mittleren Amazonas (Lago Calado, Brasilien).- *Arch. Hydrobiol.* 95: 47 - 67.
- FURCH, K. (1984): Water chemistry of the Amazon. The distribution of chemical elements among freshwaters.- In: SIOLI, H. (Hrsg.) *The Amazon - limnology and landscape ecology of a mighty tropical river and its basin.* Junk, The Hague: 167 - 199.
- FURCH, K. (im Druck): Hydrogeochemistry of Amazonian freshwaters along the Transamazônica in Brazil.- *Zentralblatt Geol. Paläontol.*
- FURCH, K. & W. J. JUNK (1980): Water chemistry and macrophytes of creeks and rivers in Southern Amazonia and the Central Brazilian Shield.- In: J. I. FURTADO (Hrsg.) *Tropical Ecology and Development:* 771 - 796.
- FURCH, K. & W. J. JUNK (1985): Dissolved carbon in a floodplain lake of the Amazon and in the river channel.- In: DEGENS, E. T., KEMPE, S. & R. HERRERA (Hrsg.) *Transport of Carbon and Minerals in Major World Rivers, Part 3.* Mitt. Geol.-Paläontol. Inst. Univ. Hamburg 58: 285 - 298.
- FURCH, K., JUNK, W. J., DIETERICH, J. & N. KOCHERT (1983): Seasonal variation of the major cation (Na, K, Mg and Ca) content of the water of Lago Camaleão, an Amazonian floodplain-lake near Manaus, Brazil.- *Amazoniana* 8: 75 - 89.
- FURCH, K., JUNK, W. J. & H. KLINGE (1982): Unusual chemistry of natural waters from the Amazon region.- *Acta cient. venez.* 33: 269 - 273.
- FURCH, K. & H. KLINGE (1978): Towards a regional characterisation of the biogeochemistry of alkali- and alkali-earth metals in the northern South America.- *Acta cient. venez.* 29: 434 - 444.
- GARRELS, R. J. & F. T. MACKENZIE (1971): *Evolution of Sedimentary Rocks.*- Norton, New York, 397 pp.
- GEISLER, R. & S. R. ANNIBAL (1984): Ökologie des Cardinal-Tetra *Paracheirodon axelrodi* (Pisces, Characoidea) im Stromgebiet des Rio Negro/Brasiliens sowie zuchtrelevante Faktoren.- *Amazoniana* 9: 53 - 86.
- GEISLER, R. & J. SCHNEIDER (1976): The element matrix of Amazon waters and its relationship with the mineral content of fishes. (Determination using neutron activation analysis).- *Amazoniana* 6: 47 - 65.
- GIBBS, R. J. (1967): The geochemistry of the Amazon river System, I: The factors that control the salinity and the composition and concentration of suspended solids.- *Geol. Soc. Amer. Bull.* 78: 1203 - 1232.
- GIBBS, R. J. (1970): Mechanisms controlling world water chemistry.- *Science* 170: 1088 - 1090.
- GIBBS, R. J. (1972): Water chemistry of the Amazon river.- *Geochim. Cosmochim. Acta* 36: 1061 - 1066.
- HAZEN, A. (1892): A new color-standard for natural waters.- *Amer. Chem. J.* 14: 300 - 310.
- HÖLL, K. (1970): *Wasser.*- Walter de Gruyter & Co., Berlin, 423 pp.
- IRION, G. (1976): Mineralogisch-geochemische Untersuchungen an der pelithischen Fraktion amazonischer Oberböden und Sedimente.- *Biogeographica* 7: 7 - 25.
- JUNK, W. J. & K. FURCH (1985): The physical and chemical properties of Amazonian waters and their relationships with the biota.- In: PRANCE, G. T. & T. E. LOVEJOY (Hrsg.) *Amazonia.*- Pergamon Press, Oxford: 3 - 17.
- KEMPE, S. (1979): Carbon in the rock cycle.- In: BOLIN, B., DEGENS, E. T., KEMPE, S. & P. KETNER (Hrsg.): *The Global Carbon Cycle.* Wiley, Chichester: 343 - 377.

- KEMPE, S. (1982): Long-term records of the CO₂ pressure fluctuations in fresh waters.- In: DEGENS, E. T. (Hrsg.) Transport of Carbon and Minerals in Major World Rivers, Part 1. Mitt. Geol.-Paläontol. Inst. Univ. Hamburg 52: 91 - 332.
- KLINGE, H. & W. OHLE (1964): Chemical properties of rivers in the Amazonian area in relation to soil conditions.- Verh. Internat. Verein. Limnol. 15: 1067 - 1076.
- LIVINGSTONE, D. A. (1963): Chemical composition of rivers and lakes.- U. S. Geol. Surv. Prof. Paper 440-G: 1 - 64.
- MARLIER, G. (1967): Ecological studies on some lakes of the Amazon valley.- Amazoniana 1: 91 - 115.
- MAUCHA, R. (1932): Hydrochemische Methoden in der Limnologie.- Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart, 173 pp.
- MEYBECK, M. (1979): Concentrations des eaux fluviales en éléments majeurs et apports en solution aux océans.- Rev. Géol. Dynam. Geogr. Phys. 21: 215 - 246.
- MÜLLER, P. & J. SCHMITHÜSEN (1976): Harald Sioli zum 65. Geburtstag.- Biogeographica 7: ix - xv.
- PAGEL, H. (1981): Grundlagen des Nährstoffhaushaltes tropischer Böden.- VEB Deutscher Landwirtschaftsverlag, Berlin, 192 pp.
- PROJETO RADAM, Levantamento de Recursos Naturais, Vol. 5: (1974), Rio de Janeiro.
- PROJETO RADAM, Levantamento de Recursos Naturais, Vol. 7: (1975), Rio de Janeiro.
- PROJETO RADAM, Levantamento de Recursos Naturais, Vol. 10: (1976), Rio de Janeiro.
- PROJETO RADAM, Levantamento de Recursos Naturais, Vol. 16: (1978a), Rio de Janeiro.
- PROJETO RADAM, Levantamento de Recursos Naturais, Vol. 17: (1978b), Rio de Janeiro.
- PUTZER, H. (1984): The geological evolution of the Amazon basin and its mineral resources.- In: SIOLI, H. (Hrsg.) The Amazon - limnology and landscape ecology of a mighty tropical river and its basin. Junk, The Hague: 15 - 46.
- RAI, H. & G. HILL (1981): Physical and chemical studies of Lago Tupé; a central Amazonian black water "Ria Lake".- Int. Revue ges. Hydrobiol. 66: 37 - 82.
- RAI, H. & G. HILL (1982): On the nature of the ecological cycle of Lago Janauari; a central Amazonian Ria/Várzea Lake.- Tropical Ecology 23: 1 - 50.
- RENNER, E. (1970): Mathematisch-statistische Methoden in der praktischen Anwendung.- Verlag Paul Parey, Berlin, Hamburg, 116 pp.
- RODHE, W. (1949): The ionic composition of lake waters.- Verh. Internat. Ver. Limnol. 10: 377 - 386.
- SANTOS, A. DOS (1983): Limnologia do sistema Tocantins-Araguaia: aspectos físicos e biogeoquímicos.- Ph. D. Thesis, São Carlos, 257 pp, 36 tabelos, 47 fig.
- SCHMIDT, G. W. (1968): Zum Problem der Bestimmung der Kohlensäure in kalkarmen tropischen Gewässern.- Amazoniana 1: 323 - 326.
- SCHMIDT, G. W. (1972): Chemical properties of some waters in the tropical rain-forest region of Central-Ama-zonia along the new road Manaus - Caracará.- Amazoniana 3: 199 - 207.
- SIOLI, H. (1951): Estudo preliminar das relações entre a geologia e a limnologia da Zona Bragantina (Pará).- Bol. Técn. Inst. Agron. Norte 24: 67 - 76.
- SIOLI, H. (1954a): Gewässerchemie und Vorgänge in den Böden im Amazonasgebiet.- Naturwissenschaften 41: 456 - 457.
- SIOLI, H. (1954b): Beiträge zur regionalen Limnologie des Amazonasgebietes. II. Der Rio Arapiuns. Limnologische Untersuchung eines Gewässers des Tertiärgebietes, Serie der "Barreiras", des unteren Amazonas.- Arch. Hydrobiol. 49: 448 - 518.
- SIOLI, H. (1963): Beiträge zur regionalen Limnologie des brasilianischen Amazonasgebietes. V. Die Gewässer der Karbonstreifen Unteramazoniens (sowie einige Angaben über Gewässer der anschließenden Devonstreifen).- Arch. Hydrobiol. 59: 311 - 350.
- SIOLI, H. (1968a): Hydrochemistry and Geology in the Brazilian Amazon Region.- Amazoniana 1: 267 - 277.
- SIOLI, H. (1968b): Zur Ökologie des Amazonas-Gebietes.- Biogr. Ecol. South Amer. 1: 137 - 170.
- STALLARD, R. F. (1980): Major element geochemistry of the Amazon river system.- Ph. D. Thesis, Cambridge, MA, 366 pp.
- STALLARD, R. F. (1985): River chemistry, geology, geomorphology, and soils in the Amazon and Orinoco basins.- In: DREVER, J. I. (Hrsg.) The Chemistry of Weathering, D. Reidel Publ. Co., Dordrecht, Holland: 293 - 316.
- STALLARD, R. F. & J. M. EDMOND (1983): Geochemistry of the Amazon. 2. The influence of geology and weathering environment on the dissolved load.- J. Geophys. Res. 88: 9671 - 9688.

