

**CHEMISCHE ZUSAMMENSETZUNG VON NEBEL UND
REGEN AM STANDORT „EL TIRO“, ECUADOR**

DIPLOMARBEIT

**INSTITUT FÜR LANDSCHAFTSÖKOLOGIE
WESTFÄLISCHE WILHELMS-UNIVERSITÄT MÜNSTER**

EVA BEIDERWIEDEN

MÜNSTER, AUGUST 2004

ERSTGUTACHTER: PROF. DR. OTTO KLEMM

ZWEITGUTACHTER: DR. THOMAS WRZESINSKY

INHALTSVERZEICHNIS

| | |
|---|-----|
| Inhaltsverzeichnis | i |
| Abbildungsverzeichnis | iii |
| Tabellenverzeichnis | v |
| Zusammenfassung | 1 |
| Summary | 2 |
| Resumen | 3 |
| 1 Einleitung | 5 |
| 1.1 Einführung | 5 |
| 1.2 Definitionen | 8 |
| 1.2.1 Physikalische Eigenschaften | 8 |
| 1.2.2 Sichtweite | 10 |
| 1.2.3 Flüssigwassergehalt | 10 |
| 1.2.4 Nebelklassifikation | 11 |
| 1.3 Zielsetzung | 12 |
| 1.4 Überblick zur Nebelforschung | 12 |
| 2 Untersuchungsgebiet | 14 |
| 2.1 Geographische Lage | 14 |
| 2.2 Klima | 16 |
| 2.2.1 Klassifikation von typischen Windsituationen | 19 |
| 2.3 Vegetation | 20 |
| 3 Material und Methoden | 23 |
| 3.1 Nebelsammler | 23 |
| 3.1.1 Zylindrischer Nebelsammler | 24 |
| 3.1.2 Standardnebefänger | 26 |
| 3.2 Regensammler | 27 |
| 3.3 Probenahmen | 28 |
| 3.4 Herkunftsberechnung der gesammelten Nebelproben | 28 |
| 3.5 Chemische Analytik | 30 |
| 3.5.1 Elektrische Leitfähigkeit | 30 |
| 3.5.2 pH-Wert | 30 |
| 3.5.3 Ionenkonzentrationen | 31 |
| 3.5.4 Qualitätskontrolle | 31 |
| 4 Ergebnisse | 33 |
| 4.1 Trajektorien | 33 |
| 4.2 Chemische Zusammensetzung der Nebelproben | 36 |

| | | |
|-------|--|----|
| 4.2.1 | Allgemeines | 36 |
| 4.2.2 | pH-Wert und elektrische Leitfähigkeit | 36 |
| 4.2.3 | Konzentrationen der wichtigsten Ionen | 37 |
| 4.2.4 | Qualitätsprüfung für Nebelproben | 42 |
| 4.2.5 | Statistische Auswertung der Messergebnisse | 44 |
| 4.2.6 | Vergleich einzelner Ionen von „Kontinent“- und „Pazifik“-Proben | 47 |
| 4.3 | Chemische Zusammensetzung der Regenproben | 49 |
| 4.3.1 | Allgemeines | 49 |
| 4.3.2 | pH-Wert und elektrische Leitfähigkeit | 49 |
| 4.3.3 | Konzentrationen der wichtigsten Ionen | 49 |
| 4.3.4 | Qualitätsprüfung für Regenproben | 51 |
| 4.4 | Vergleich der chemischen Zusammensetzung der Nebel- und Regenproben | 52 |
| 4.5 | Vergleich von zwei passiven Nebelsammlern | 53 |
| 5 | Diskussion | 57 |
| 5.1 | Quellen der Probeninhaltsstoffe | 57 |
| 5.2 | Herkunftsbestimmung | 59 |
| 5.3 | Qualität der Messergebnisse | 60 |
| 5.4 | Zusammenhang zwischen Windsituation und Art der Probe | 62 |
| 5.5 | Vergleich von Nebel- und Regenwasser | 63 |
| 5.5.1 | Beurteilung der Wasserqualität | 64 |
| 6 | Ausblick | 66 |
| 7 | Literatur | 67 |
| 8 | Dank | 74 |
| 9 | Anhang | A1 |

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

| | |
|--|----|
| Abbildung 1: Schema zur Impaktion von Partikeln (Quelle: MÖLLER 2003)..... | 7 |
| Abbildung 2: Köhler-Kurve für unterschiedliche Partikel und Mengen (Quelle: O. KLEMM)..... | 10 |
| Abbildung 3: Lage des Untersuchungsgebiets (Quelle: HAGEDORN 2001)..... | 14 |
| Abbildung 4: Schema zur Passatzirkulation und Entstehung der Hadley-Zelle (Quelle: verändert nach FORKEL 2004) | 17 |
| Abbildung 5: Klimadiagramm des Messortes "El Tiro" (Quelle: R. ROLLENBECK)..... | 18 |
| Abbildung 6: Beispiele für Windsituation I und Windsituation II, gemessen am Messort „El Tiro“. Vom 23. bis 26.12. herrschte Windsituation I und vom 27. bis 29.12. Windsituation II. | 20 |
| Abbildung 7: typische Páramo-Vegetationsform im Untersuchungsgebiet (Quelle: U. SOLTAU)..... | 21 |
| Abbildung 8: an der Vegetation impaktierte Nebeltröpfchen (Quelle: U. SOLTAU).... | 22 |
| Abbildung 9: impaktierte Nebeltröpfchen an den Harfen des passiven Nebelsammlers CFC (Quelle: U. SOLTAU) | 23 |
| Abbildung 10: zylindrischer Nebelsammler (CFC) (Quelle: R. ROLLENBECK)..... | 25 |
| Abbildung 11: Standardnebefänger (SFC) (Quelle: R. ROLLENBECK)..... | 26 |
| Abbildung 12: Niederschlagssammler RS200 (Quelle: UMS) | 27 |
| Abbildung 13: 120-Stunden-Rückwärtstrajektorien berechnet mit dem HYSPLIT- Model für alle 59 Nebelproben | 33 |
| Abbildung 14: Zirkulation über Südamerika für die Monate Februar bis März (Quelle: BENDIX und LAUER 1992)..... | 35 |
| Abbildung 15: Verlauf der Innertropischen Konvergenzzone im Januar (Quelle: EASTERN ILLINOIS UNIVERSITY) | 35 |
| Abbildung 16: mediane Ionenzusammensetzung der „Kontinent“-Proben (insgesamt $139 \mu\text{eq L}^{-1}$), gesammelt vom 3.11.2003 bis 10.2.2004, 48 Proben..... | 39 |
| Abbildung 17: mediane Ionenzusammensetzung der „Pazifik“-Proben (insgesamt $111 \mu\text{eq L}^{-1}$), gesammelt vom 3.11.2003 bis 10.2.2004, 8 Proben..... | 39 |
| Abbildung 18: Vergleich der Nitrat-Messmethoden FIA und IC..... | 41 |
| Abbildung 19: Vergleich der gemessenen und berechneten Leitfähigkeit der 48 „Kontinent“-Proben [$\mu\text{S cm}^{-1}$] | 42 |

| | |
|--|----|
| Abbildung 20: Vergleich der gemessenen und berechneten Leitfähigkeit der 8 "Pazifik"-Proben [$\mu\text{S cm}^{-1}$]..... | 43 |
| Abbildung 21: Beispiel für die Verteilung des Datensatzes von 10000 Medianen für Nitrat beim Bootstrap-Resampling | 46 |
| Abbildung 22: Vergleich der medianen Zusammensetzung von "Kontinent"- und "Pazifik"-Proben für die betrachteten Ionen H^+ , NH_4^+ , K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , NO_3^- , PO_4^{3-} , SO_4^{2-} [$\mu\text{eq L}^{-1}$]..... | 48 |
| Abbildung 23: mediane Ionenzusammensetzung der Regenwasserproben (insgesamt $34,4 \mu\text{eq L}^{-1}$), gesammelt vom 3.11.2003 bis 10.2.2004, 11 Proben | 50 |
| Abbildung 24: Vergleich der gemessenen und berechneten Leitfähigkeit der 11 Regenproben [$\mu\text{S cm}^{-1}$]..... | 52 |
| Abbildung 26: Vergleich der Fangmengen [mm] der Nebelfänger CFC und SFC während des Zeitraumes vom 11.11.2003 bis zum 6.1.2004 Fehler! Textmarke nicht definiert. | |
| Abbildung 27: in der Zeit vom 11.11.2003 bis zum 6.01.2004 gefangene Nebelmengen [mL] der Nebelsammlern SFC und CFC, Fangmengen gegeneinander aufgetragen..... | 55 |
| Abbildung 28: Beispiel für Peaks der Messungen mit dem Ionenchromatographen (für Probe 19)..... | 61 |

TABELLENVERZEICHNIS

| | |
|---|----|
| Tabelle 1: Mittelwerte der gemessenen Parameter von Windsituation I und Windsituation II..... | 20 |
| Tabelle 2: verwendete Verfahren zur Quantifizierung der chemischen Parameter und deren geschätzte Bestimmungsgrenzen [mg L^{-1}]..... | 31 |
| Tabelle 3: spezifische Leitfähigkeiten der gemessenen Ionen in $\mu\text{S cm}^{-1} \mu\text{eq}^{-1} \text{L}$ (D' ANS UND LAX 1992) | 32 |
| Tabelle 4: Art der im Messzeitraum genommenen Wasserproben | 36 |
| Tabelle 5: Statistische Kenngrößen der chemischen Zusammensetzung der "Kontinent"-Proben. Angegebene Parameter: pH-Wert (pH), elektrische Leitfähigkeit (LF) [$\mu\text{S cm}^{-1}$], berechnete Leitfähigkeit (ber. LF) [$\mu\text{S cm}^{-1}$], Äquivalentkonzentrationen der Ionen [$\mu\text{eq L}^{-1}$]: Wasserstoff (H^+), Ammonium (NH_4^+), Kalium (K^+), Natrium (Na^+), Calcium (Ca^{2+}), Magnesium (Mg^{2+}), Chlorid (Cl^-), Nitrat (NO_3^-) und Sulfat (SO_4^{2-})..... | 37 |
| Tabelle 6: Statistische Kenngrößen der chemischen Zusammensetzung der "Pazifik"-Proben. Angegebene Parameter: pH-Wert (pH), elektrische Leitfähigkeit (LF) [$\mu\text{S cm}^{-1}$], berechnete Leitfähigkeit (ber. LF) [$\mu\text{S cm}^{-1}$], Äquivalentkonzentrationen der Ionen [$\mu\text{eq L}^{-1}$]: Wasserstoff (H^+), Ammonium (NH_4^+), Kalium (K^+), Natrium (Na^+), Calcium (Ca^{2+}), Magnesium (Mg^{2+}), Chlorid (Cl^-), Nitrat (NO_3^-) und Sulfat (SO_4^{2-}) | 38 |
| Tabelle 7: Statistische Kenngrößen der chemischen Zusammensetzung der Blindproben. Angegebene Parameter: pH-Wert (pH), elektrische Leitfähigkeit (LF) [$\mu\text{S cm}^{-1}$], berechnete Leitfähigkeit (ber. LF) [$\mu\text{S cm}^{-1}$], Äquivalentkonzentrationen der Ionen [$\mu\text{eq. L}^{-1}$]: Wasserstoff (H^+), Ammonium (NH_4^+), Kalium (K^+), Natrium (Na^+), Calcium (Ca^{2+}), Magnesium (Mg^{2+}), Chlorid (Cl^-), Nitrat (NO_3^-) und Sulfat (SO_4^{2-}) | 44 |
| Tabelle 8: Anteile [%] an der Gesamtäquivalentkonzentration der medianen Zusammensetzung für "Kontinent"- und "Pazifik"-Proben..... | 47 |
| Tabelle 9: statistische Kenngrößen der chemischen Zusammensetzung der Regen- Proben. Angegebene Parameter: pH-Wert (pH), elektrische Leitfähigkeit (LF) [$\mu\text{S cm}^{-1}$], berechnete Leitfähigkeit (ber. LF) [$\mu\text{S cm}^{-1}$], Äquivalentkonzentrationen der Ionen [$\mu\text{eq L}^{-1}$]: Wasserstoff (H^+), Ammonium (NH_4^+), Kalium (K^+), Natrium (Na^+), Calcium (Ca^{2+}), Magnesium (Mg^{2+}), Chlorid (Cl^-), Nitrat (NO_3^-) und Sulfat (SO_4^{2-}) | 50 |

| | |
|--|----|
| Tabelle 10: Anteile an der Gesamtäquivalentkonzentration der medianen Zusammensetzung der Regenproben | 51 |
| Tabelle 11: Kenngrößen und Grenzwerte zur Beurteilung der Beschaffenheit des Trinkwassers (Quelle: verändert nach Trinkwasserverordnung des BUNDESMINISTERIUMS FÜR VERBRAUCHERSCHUTZ, ERNÄHRUNG UND LANDWIRTSCHAFT) | 65 |

ZUSAMMENFASSUNG

CHEMISCHE ZUSAMMENSETZUNG VON NEBEL UND REGEN AM STANDORT „EL TIRO“, ECUADOR

Zielsetzung dieser Arbeit war es, die Zusammensetzung von Nebel- und Regenwasser zu analysieren, den Einfluss des Pazifiks auf die chemische Zusammensetzung von Nebel zu untersuchen, sowie zwei unterschiedliche passive Nebelsammlermodelle zu vergleichen.

Dieser Arbeit lag die Annahme zugrunde, dass maritim beeinflusster Nebel höhere Konzentrationen an K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} und Cl^- aufweist, dagegen kontinental geprägter Nebel mehr NH_4^+ , NO_3^- und SO_4^{2-} enthält. Die Messperiode fand statt von November 2003 bis Februar 2004 am Standort „El Tiro“ an der Ostabdachung der ecuadorianischen Anden statt. Die Probenahmen für Nebel fand täglich und die Probenahme für Regen wöchentlich statt. Für jede Nebelprobe wurden mit dem HYSPLIT-Model 120-Stunden-Rückwärtstrajektorien berechnet. Auf Grundlage der Trajektorien fand eine Klassifizierung in „Kontinent“- und „Pazifik“-Proben statt. Es wurden 49 Nebelproben als „Kontinent“-Proben und 10 als „Pazifik“-Proben identifiziert. Die Nebel- und Regenproben wurden im Labor des Institutes für Landschaftsökologie chemisch analysiert. Die Ergebnisse der chemischen Analytik wurden mit dem Bootstrap-Resampling statistisch ausgewertet. Die statistische Auswertung ergab, dass sich die „Kontinent“- und „Pazifik“-Proben in ihrer chemischen Zusammensetzung nicht signifikant voneinander unterscheiden. Die Ablehnung der Arbeitshypothese wird damit begründet, dass sich der Messort nicht optimal eignet, um die Unterschiede nachzuweisen. Ein Standort in unmittelbarer Nähe zum Ozean wäre besser geeignet, um anthropogenen Einfluss aus dieser Anströmrichtung auszuschließen.

Die Nebel- und Regenproben unterscheiden sich jedoch deutlich in ihrer chemischen Zusammensetzung. Die Gesamtäquivalenzkonzentration von Nebel ist bei den „Kontinent“-Proben ($139 \mu eq L^{-1}$) und bei den „Pazifik“-Proben ($111 \mu eq L^{-1}$) bedeutend höher als von Regen ($34,4 \mu eq L^{-1}$). Die größten Unterschiede bestehen in den Konzentrationen von H^+ , NH_4^+ , NO_3^- und SO_4^{2-} . Als Ursache für die Konzentrationsunterschiede werden die Orte der Bildung angesehen. Nebel entsteht in den unteren, anthropogen beeinflussten Schichten der Troposphäre, während Regen in höheren, wenig kontaminierten Schichten gebildet wird.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden zwei unterschiedliche passive Nebelsammler verwendet, die Fangmengen verglichen und die Gründe hierfür interpretiert. In die Betrachtung wurde die Windsituation mit einbezogen. Der Standardnebelfänger

dagegen fängt, auf die absoluten Mengen bezogen, insgesamt größere Nebelmengen. Dieser Sammler hat zudem die Vorteile, dass er preiswert und leicht herzustellen ist. Der zylindrische Nebelsammler hat eine kleinere spezifische Auffangfläche und fängt daher relativ mehr.

SUMMARY

CHEMICAL COMPOSITION OF FOG AND RAIN WATER AT THE “EL TIRO” SITE, ECUADOR

The scope of this study was to analyse the composition of fog and rain water at the “El Tiro” site at the eastern Andes cordillera, to study the influence of the Pacific Ocean to the chemical composition of the fog water, and to compare two different passive fog water collector designs.

One hypothesis of this study was, that fog samples influenced by the Pacific Ocean show higher concentrations of K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , and Cl^- , and that the samples influenced by the continent contain higher concentrations of NH_4^+ , NO_3^- and SO_4^{2-} . The sampling period was from November 2003 through February 2004. The fog water samples were collected on a daily basis, the rain samples were taken once a week. For each fog sample, a 120 hour trajectory was computed by the use of the HYSPLIT model. On the basis of these trajectories, the fog samples were classified in “continent” and “pacific” samples, respectively. 49 samples were characterized as “continent” samples and 10 as “pacific” samples.

The fog water and rain water samples were analysed in the laboratory at the University of Münster. The results were tested statistically after Bootstrap-Resampling. The differences of the chemical composition between the “continent” and “pacific” samples are not statistically significant. The sampling site is probably not well suited to exhibit such differences. A sample site located closer to the Pacific Ocean would be more suitable to exclude the anthropogenic influence on the “pacific” samples.

The chemical composition of the fog and rain samples shows pronounced differences. The total equivalent concentrations of the “continent” fog samples ($139 \mu\text{eq L}^{-1}$) and of the “pacific” fog samples ($111 \mu\text{eq L}^{-1}$) are considerable higher than that of the rain samples ($34.4 \mu\text{eq L}^{-1}$). The greatest differences exist for H^+ , NH_4^+ , NO_3^- und SO_4^{2-} . One reason may be the height of the formation of the droplets: fog is formed in lower layer of the atmosphere which is stronger influenced by continental emissions. Rain droplets are formed in higher altitudes where the atmosphere is less polluted.

For this study, two passive fog collectors were used. The differences of the collected fog water volumes were analysed. Wind data were used to help interpret the data. The standard, square shaped fog collector captures absolutely more water. This collector has the advantage that it is less expensive and easy to build. The cylindrical fog collector has a smaller specific collection surface but collects more water per collection surface.

RESUMEN

COMPOSICIÓN QUÍMICA DE NIEBLA Y DE PRECIPITACIÓN AL SITIO “EL TIRO”, ECUADOR

La meta de este trabajo era analizar la influencia del Océano Pacífico al la composición química del agua de niebla y comparar dos diferentes diseños de colectores pasivos de la niebla.

Una hipótesis de este estudio era que las muestras de niebla influidas por el Océano Pacífico contienen concentraciones más altas de K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , y Cl^- , mientras las muestras influidas por el continente muestran concentraciones más altas de NH_4^+ , NO_3^- y SO_4^{2-} . El período de la toma de muestras fue entre noviembre 2003 y febrero 2004. Las muestras de la niebla fueron colectado cada día y las muestras de la precipitación una vez en la semana. Para cada muestra de niebla, una trayectoria de las últimas 120 horas fue computado con el uso del modelo HYSPLIT. Según estas trayectorias, las muestras de niebla fueron clasificado en muestras “continente” e en muestras “pacífico”. 49 muestras fueron caracterizado como muestras “continente” y 10 como muestras “pacífico”.

El agua de la niebla y de la precipitación fue analizado en el laboratorio de la Universidad de Münster. Los resultados fueron examinado estadísticamente por el Bootstrap-Resampling. Las diferencias de la composición química entre las muestras „continente“ y de las muestras „pacífico“ no son significante estadísticamente. Probablemente el sitio de la toma de muestra no es idóneo para exhibir estas diferencias. Un lugar situado más cerca del Océano Pacífico sería más idóneo para excluir una influencia humana.

La composición química de las muestras de la niebla y de la precipitación muestra diferencias pronunciadas. Las concentraciones equivalente total de las muestras “continente” ($139 \mu eq L^{-1}$) y de las muestras “pacífico” ($111 \mu eq L^{-1}$) son considerablemente más altas que las de las muestras de la precipitación ($34,4 \mu eq L^{-1}$). Las diferencias más altas existen para H^+ , NH_4^+ , NO_3^- y SO_4^{2-} . Una causa puede ser la altura de la formación de las gotas: la niebla se forma en las capas más bajas de la

atmósfera influidas por emisiones continentales. Las gotas de la precipitación se forman en capas más altas donde la atmósfera se encuentra menos contaminada. Para este estudio, dos colectores pasivos de niebla fueron usados. Las diferencias de los volúmenes de la niebla colectada fueron analizadas. Datos del viento fueron usados para interpretar los datos. El colector de niebla cuadrado capta absolutamente más agua. Tiene la ventaja de ser menos caro y fácil de construir. El colector cilíndrico tiene una superficie específica para captar más pequeña pero capta más agua por su superficie específica.

1 EINLEITUNG

1.1 EINFÜHRUNG

Zurzeit bedecken tropische Regenwälder etwa 10,4 Millionen km², was 7,4 % der Erdoberfläche entspricht. Bergregenwälder zählen zu den Ökosystemen mit der höchsten Gefäßpflanzen-Diversität mit mehr als 5000 Arten auf 10000 km² (FREY und LÖSCH 2004) und werden als Biodiversitäts-Hotspots bezeichnet (BARTHLOTT et al. 1996, BUSSMANN 2001). Tropische Ökosysteme stellen die kompliziertesten natürlichen Funktionseinheiten dar (Fittkau 1989) und gehören gleichzeitig zu den am meisten bedrohten Ökosystemen der Erde. Mit jährlichen Abholzungsraten von 2,2 Millionen Hektar werden 1,1 % des weltweiten Bergregenwaldes vernichtet (GROESCHEL 2001). Vor allem durch Wanderfeldbau (*shifting cultivation*), großflächige Rodungen und das Abbrennen von Wald zur Gewinnung von Weideland sowie Flächen für Tee-, Kakao- und Ölpalmenanbau ist der tropische Regenwald in seinen ursprünglichen Verbreitungsgebieten stark bedroht (FREY und LÖSCH 2004). Bis zu 90 % des ursprünglichen Waldbewuchses der Anden sind bereits anthropogen gestört, verändert oder sogar völlig zerstört (HAMILTON et al. 1995). Obwohl tropische Regenwälder nur 7 % des Festlandes bedecken, kommen in ihnen mehr als die Hälfte aller Tier- und Pflanzenarten vor (FREY und LÖSCH 2004). Die relativ geringen Höhen der Anden in Südecuador von 2800 bis 3600 m (HAGEDORN 2001) ermöglichen Migration und Genaustausch bei Tier- und Pflanzenarten aus dem Amazonastiefland in das Küstentiefland (BECK und MÜLLER-HOHENSTEIN 2001, BUSSMANN 2001). Häufig auftretende Erdbeben schaffen ständig neue Lebensräume und sorgen für eine natürliche Dynamik mit hohem „Turnover“. Ein weiterer Grund für den Strukturreichtum von tropischen Bergregenwäldern ist, dass von vielen Pflanzenarten (besonders von Epiphyten wie Farnen und Lebermoosen) neben Regen auch Nebel als Wasser- und Nährstoffressource genutzt wird (WALMSLEY et al. 1996). Da Nebelhäufigkeit mit der Höhe zunimmt, spielt besonders in Hochgebirgen der Stoffeintrag durch Auskämmen von Nebel eine wichtige Rolle (ZIMMERMANN und ZIMMERMANN 2002, OLIVIER und DE RAUTENBACH 2002, HOLDER 2004).

Nebel kommt wegen des direkten und häufig auch lange andauernden Kontakts mit der Vegetationsoberfläche eine bedeutende pflanzenphysiologische Stressrolle zu. Interzipierte Nebeltröpfchen verweilen bis zu vier Stunden auf der Blattoberfläche, bis die Benetzungskapazität erreicht ist und die Tropfen zu Boden fallen

(ZIMMERMANN und ZIMMERMANN 2002). Außerdem enthält Nebel 10 bis 100-fach höhere Ionenkonzentrationen als Regentropfen (ZIMMERMANN und ZIMMERMANN 2002, WRZESINSKY 2004). Häufig wird das Absterben der Baumkronen der sauren Nebeldeposition zugeschrieben, denn bereits pH-Werte von 3 haben einen direkten Effekt auf die Vegetation (IGAWA et al. 1998, IGAWA et al. 2002, BRIDGES et al. 2002). In höheren Lagen treten typischerweise höhere Nebelhäufigkeiten und größere Windgeschwindigkeiten auf als im Flachland, was ebenfalls zu einem erhöhten Nebelbeitrag und somit verstärkter Ionendeposition führt (CLARK et al. 1998, SCHEMENAUER und CERECEDA 1994, MINAMI und ISHIZAKA 1996, WALMSLEY et al. 1996, OLIVIER und DE RAUTENBACH 2002, IGAWA et al. 2002). Nebelimpaktion kann bis zu 30 % (SCHATZMANN 1999) bzw. 48 % (HOLDER 2004) des gesamten Wasserinputs in ein Ökosystem ausmachen. An hoch gelegenen Orten ist Nebel der bedeutendste Eintragspfad für Verschmutzungen in Boden und Vegetation (SCHEMENAUER und CERECEDA 1994). Die Effizienz, mit der Nebel von der Vegetation oder von Nebelsammlern gefangen wird, hängt von der Windgeschwindigkeit, der lokalen Nebelhäufigkeit, der Exposition zur Hauptwindrichtung und vom Flüssigwassergehalt ab (SCHEMENAUER und CERECEDA 1994).

Der Eintrag von Nebelwasser und Spurenstoffen in ein Ökosystem wird als feuchte oder okkulte Deposition bezeichnet. Er beruht auf zwei physikalischen Prozessen: der gravitativ bedingten Sedimentation und dem Eintrag durch turbulenten Austausch (WRZESINSKY 2004). Die Fallgeschwindigkeit von Nebeltröpfchen hängt hauptsächlich vom Tropfenradius ab (LILJEQUIST 1974), die Depositionsrate von Nebel dagegen wird beeinflusst von Eigenschaften der atmosphärischen Grenzschicht wie Windgeschwindigkeit, Turbulenz, Luftfeuchte und Eigenschaften der Rezeptoroberfläche. Je größer die Oberfläche des Akzeptors ist und je höher die Windgeschwindigkeit ist, desto höher ist die Deposition.

Pflanzen kämmen Nebelwasser aus, führen es in Richtung Boden oder Stamm und erreichen so einen Wassergewinn ohne Regenniederschlag (Interzeptionsgewinn, Abbildung 8 in Kapitel 2.3). Bei dieser so genannten Tröpfchenimpaktion ist die Trägheit der Wassertröpfchen zu groß, so dass sie der Trajektorie der Umgebungsluft nicht folgen können und ihre Anfangsbewegung beibehalten (Abbildung 1). Sie strömen also nicht um Hindernisse wie zum Beispiel die Vegetation herum, sondern prallen dagegen bzw. impaktieren. Die Impaktions-Effektivität wird beschrieben als das Verhältnis der impaktierten Partikel zur Anzahl der Partikel in geometrischer Einfallsrichtung zum Hindernis (MÖLLER 2003).

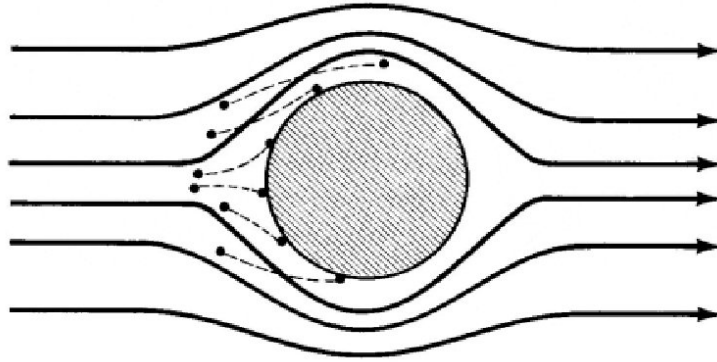


Abbildung 1: Schema zur Impaktion von Partikeln (Quelle: MÖLLER 2003)

Nebel als ein elementarer Teil des Wasserkreislaufes stellt zudem eine wichtige Wasserressource für Mensch und Vegetation in dar. Abhängig von der chemischen Zusammensetzung kann Nebel für die Landwirtschaft, den Hausgebrauch oder sogar als Trinkwasser benutzt werden (ECKHARDT und SCHEMENAUER 1998, SCHEMENAUER und CERECEDA 1994, SHANYENGANA et al. 2002). Selten basiert die Wasserversorgung ausschließlich auf Nebel. In Namibia fallen Zeiträume hoher Nebelwahrscheinlichkeit und starker Grundwasserversalzung zusammen, so dass dort salzhaltiges Grundwasser mit Nebelwasser verdünnt wird, um Trinkwasser zu gewinnen (SHANYENGANA et al. 2002). Nebel tritt dort regelmäßiger auf als Regen und ist daher eine zuverlässigere Wasserressource (SHANYENGANA et al. 2002, OLIVIER und DE RAUTENBACH 2002). Vor allem in Sommermonaten, wenn der Boden ausgetrocknet und Grundwasser schlecht erreichbar ist, kann Nebel die einzige Wasserquelle darstellen (DAWSON 1998). Anhand der vielfältigen praktischen Anwendungen wird deutlich, dass Nebelforschung nicht nur aus naturwissenschaftlichen Aspekten von Bedeutung ist, sondern auch Anwendung in der Entwicklungshilfe in ruralen Gegenden findet. Für den Gebrauch von Nebelwasser als alternative Trinkwasserressource ist neben der regelmäßigen Erreichbarkeit vor allem die menschenverträgliche chemische Zusammensetzung eine wichtige Voraussetzung.

Die chemische Zusammensetzung von Nebel wird vom Verlauf der Luftmasse und den meteorologischen Bedingungen beeinflusst (KLEMM et al. 1994). Im Rahmen dieser Arbeit soll sie für einen beispielhaften Standort im Süden Ecuadors erklärt und interpretiert werden.

1.2 DEFINITIONEN

1.2.1 PHYSIKALISCHE EIGENSCHAFTEN

Nebel ist definiert als ein bodennahes Aerosol, das aus Wassertröpfchen mit Durchmessern zwischen ca. 2 μm und 50 μm (WRZESINSKY 2004), darin gelösten und dispergierten Stoffen sowie Luft besteht. Die Unterscheidung von Nebel und Wolken wird aufgrund ihrer Lage zur Erdoberfläche getroffen. Nebel liegt auf dem Boden auf, während Wolken über ihm schweben (BUSCH und KUTTLER 1990). Nebel hat eine sich selbst erhaltende Wirkung, da die Nebeltröpfchen ein sehr hohes Reflexionsvermögen besitzen und bis zu 90 % der eintreffenden Sonnenstrahlung zurückwerfen (HÄCKEL 1999). Die Wassertröpfchen geben nachts viel Energie durch Ausstrahlung ab, so dass auf der Oberseite des Nebels die Temperatur besonders tief ist. Durch die Anwesenheit von Nebel werden vor allem während der kalten Jahreszeit die lufthygienischen Bedingungen beeinflusst (WINIGER et al. 1992). Außerdem wird durch Nebel die Sichtweite und die tägliche Sonnenscheindauer vermindert. Für die Bildung von Nebel sind eine Abkühlung der Luft bis unter den Taupunkt sowie das Vorhandensein von Kondensationskernen physikalische Voraussetzung. Diese Kondensationskerne haben einen durchschnittlichen Durchmesser von 10^{-4} bis 10^{-3} mm.

Aerosolpartikel können sowohl aus primären als auch aus sekundären Quellen stammen. Die wichtigsten Quellen für primäre Aerosole sind Bodenerosion, Vulkanausbrüche, Biomasseverbrennung und *sea spray*. Sie werden direkt in die Atmosphäre emittiert. Sekundäre Aerosole dagegen werden durch chemische Reaktionen gasförmiger Komponenten (*gas-to-particle-conversion*) gebildet und gelangen durch chemisch-physikalische Umwandlungsprozesse in die Atmosphäre (RADKE 2003). Sie sind immer vorhanden, jedoch ist ihre Konzentration und chemische Zusammensetzung sehr variabel. In nicht verunreinigter Luft sind etwa 200 Partikel pro cm^3 über Ozeanen und 600 Partikel pro cm^3 über Kontinenten enthalten (BUSCH und KUTTLER 1990).

Tröpfchenbildung und das Tröpfchenwachstum durch heterogene Nukleation finden schon bei einer Übersättigung der Luft von nur wenigen Prozent statt. Der wichtigste Tröpfchenbildungsmechanismus ist Kondensation an löslichen Partikeln. Der Sättigungsdampfdruck über einem Tropfen hängt ab von zwei Effekten: dem Krümmungseffekt (Kelvin-Effekt) und dem Lösungseffekt. Gelöstes Salz bewirkt eine Herabsetzung des Sättigungsdampfdruckes über der Wasseroberfläche, weshalb sich auch schon bei geringer Sättigung der Luft Tröpfchen bilden können. Der

Krümmungseffekt dagegen bewirkt eine Erhöhung des Sättigungsdampfdruckes. An der gekrümmten Oberfläche von kleinen Tröpfchen sind die Kräfte zwischen den Flüssigkeitsmolekülen geringer, so dass die Moleküle leichter in die Gasphase übergehen. Der Sättigungsdampfdruck an gekrümmten Oberflächen ist daher im Gegensatz zu ebenen Oberflächen oder großen Tropfen größer. Bei abnehmendem Krümmungsradius bzw. bei kleinen Tröpfchen überwiegt jedoch der Lösungseffekt und bei großen Tropfen dominiert der Krümmungseffekt. Die Köhler-Kurve (Abbildung 2) beschreibt das Wachstumsverhalten von Aerosolpartikeln durch Kondensation oder Evaporation von Wasserdampf und berücksichtigt dabei die beiden beschriebenen Effekte. Jeder Punkt der Köhler-Kurve stellt das Gleichgewichtssättigungsverhältnis von Wasser (relative Feuchte) dar, bei dem ein Tröpfchen mit gegebener Menge eines gelösten Stoffes und einem gegebenen Radius existiert. Der kritische Radius r_c bezeichnet das Maximum der jeweiligen Kurve. Ist der Tropfenradius $r < r_c$, dann ist der Tropfen stabil. Die Tröpfchengröße ändert sich durch Kondensation und Evaporation von Wasser, bis sie sich mit der Umgebung im Gleichgewicht befindet. Tröpfchen mit $r > r_c$ werden als instabil bezeichnet, da bei weiterem Wachstum ihr Gleichgewichts-Wasser-Dampfdruck niedriger ist als in der Umgebung und sie weiter wachsen. Dieser Prozess ist wichtig für die Entstehung von Wolken. Setzt jedoch Verdunstung ein, besitzen die Tröpfchen wieder einen höheren Dampfdruck als die Umgebung und sie beginnen zu schrumpfen. Dieser Prozess führt bei reinem Wasser zur Auflösung des Partikels. Sind Salze im Wasser gelöst, schrumpfen die Tröpfchen bis ihre Größe den Werten des aufsteigenden Astes der Köhler-Kurve für die aktuelle Luftfeuchte entspricht (RADKE 2003).

Die Auflösung von Nebel wird außerdem initiiert durch absteigende Luftbewegungen, Überströmen einer warmen Unterlage oder nach Erwärmung durch Sonneneinstrahlung. Luftmassenwechsel, Regen oder das Auskämmen von Nebel durch die Vegetation können ebenfalls zur Auflösung von Nebel führen.

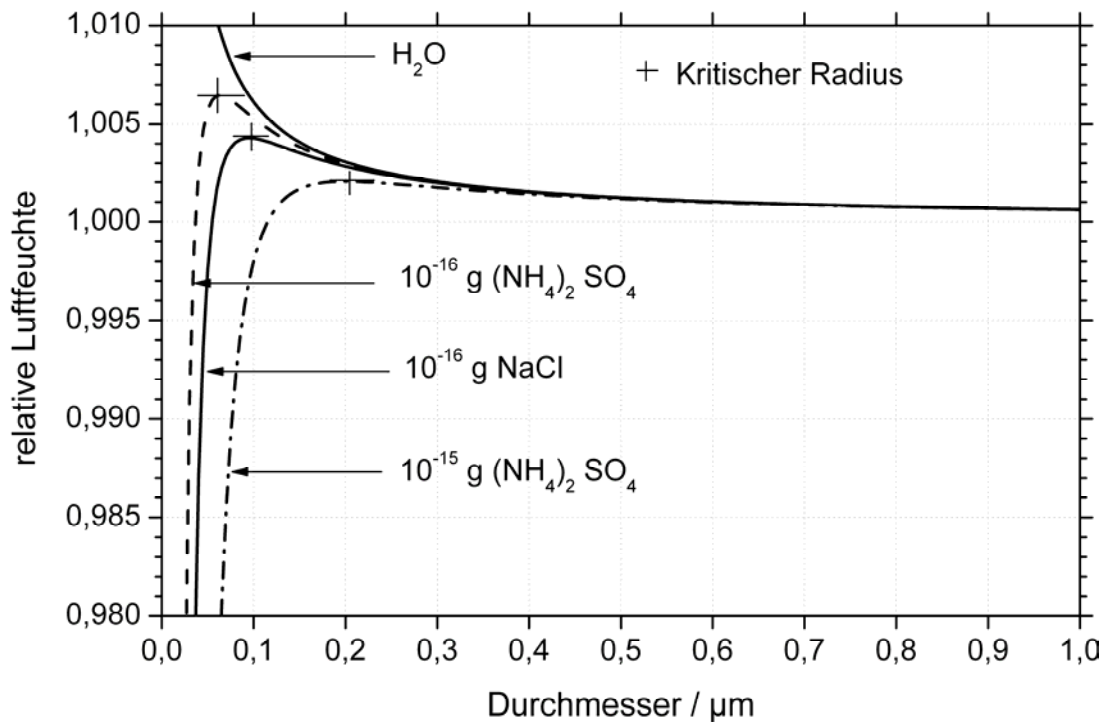


Abbildung 2: Köhler-Kurve für unterschiedliche Partikel und Mengen (Quelle: O. KLEMM)

1.2.2 SICHTWEITE

Gemäß einer Definition der World Meteorological Organization (WMO) spricht man von Nebel, wenn die Sichtweite wegen schwebender Wassertröpfchen und Eiskristalle weniger als 1000 m beträgt. Liegt die Sichtweite über 1000 m (mit einer Obergrenze von 10 km) spricht man von Dunst. Die Wassertröpfchen im Nebel bewirken eine Streuung des Lichtes und reduzieren so die Sichtweite. Die Sichtweite bezeichnet die Entfernung, bei der der visuelle Kontrast eines Objektes auf 5% des Ursprungswertes abgefallen ist (WRZESINSKY 2004).

Nach BACHMANN und BENDIX (1993) unterscheidet man je nach Normsichtweite:

| | |
|--------------|--------------------|
| 1000 – 500 m | leichter Nebel |
| 500 – 200 m | mäßiger Nebel |
| 200 – 100 m | dichter Nebel |
| < 100 m | sehr dichter Nebel |

1.2.3 FLÜSSIGWASSERGEHALT

Der Flüssigwassergehalt (*Liquid Water Content*, LWC) beschreibt die Konzentration von flüssigem Wasser in der Luft. Der LWC von Nebel liegt üblicherweise zwischen 0,02 und 0,5 g m⁻³, ist jedoch stark mit der Tröpfchengrößenverteilung verbunden. Der LWC nimmt mit zunehmender Höhe innerhalb der Wolke (OLIVIER und DE

RAUTENBACH 2002) zu. Da die Ionenkonzentration im Nebel mit steigendem LWC abnimmt (IGAWA et al. 1998), nimmt die Ionenkonzentration aufgrund des Verdünnungseffektes mit der Höhe ab (FISAK et al. 2002). Die Nebeldepositionsgeschwindigkeit und Fangeffizienz sind von Windgeschwindigkeit, LWC (IGAWA et al. 1998) sowie von der lokalen Nebelhäufigkeit abhängig (SCHEMENAUER und CERECEDA 1994).

1.2.4 NEBELKLASSIFIKATION

Nebel entsteht durch Abkühlung von Luft bis unter den Taupunkt, durch Wasserdampfung oder durch Mischung von feuchter Luft unterschiedlicher Temperaturen. Die wichtigsten Vorgänge für die Entstehung von Nebel sind adiabatische Abkühlung bei Hebungsprozessen, isobare Abkühlung der Luft und Mischung zweier Luftmassen.

Je nach Genese unterscheidet man verschiedene Arten von Nebel:

- Strahlungsnebel tritt auf, wenn sich die bodennahen Luftschichten durch nächtliche Wärmeausstrahlung in die Atmosphäre so stark abkühlen, dass Kondensation eintritt. Dies geschieht meist in klaren, wolkenlosen Nächten mit geringer atmosphärischer Gegenstrahlung.
- Advektionsnebel entsteht vor allem im Winter, wenn warme feuchte Luft eine kalte Oberfläche überströmt und sich bis unter den Taupunkt abkühlt. Für die Bildung von Advektionsnebel müssen größere horizontale Luftbewegungen vorhanden sein. Advektionsnebel wird weniger durch den Messort selbst als durch seine Rückwärtstrajektorie (KLEMM et al. 1994) geprägt.
- Wenn adiabatische Abkühlung aufgrund hangaufwärts strömender Luft stattfindet, bildet sich orographischer Nebel. Er kommt beispielsweise oft dort vor, wo Passate feuchtwarme Luft gegen Gebirgsmassen drücken.
- Beim Mischungsnebel vermischen sich zwei knapp untersättigte Luftmassen. So kann insgesamt eine relative Feuchte von 100 % erreicht werden und Wasserdampf kondensieren.
- Verdunstungsnebel entsteht bei leichten Luftbewegungen vom Land zum Wasser hin, wenn sehr kalte Luft über eine mindestens 10 Kelvin wärmere Wasseroberfläche streicht. Die unteren, durch Ausstrahlung abgekühlten Luftschichten können die von der Wasseroberfläche verdunstende Feuchtigkeit nicht aufnehmen, so dass über dem Wasser Kondensation eintritt. Diese Nebelart entsteht hauptsächlich im Herbst bei Kaltlufteinbrüchen über noch relativ warmen Gewässern.

Nach BACHMANN und BENDIX (1993) unterscheidet man:

| | | |
|----------------|------------------------|--|
| Nebelschwaden: | Mächtigkeit > 2 m | geringe Ausdehnung |
| Nebelbänke: | Mächtigkeit > 2 m | mehrere ha Ausdehnung |
| Nebelfeld: | Mächtigkeit 50 – 400 m | große Ausdehnung (> 10 km ²) |

1.3 ZIELSETZUNG

Ziel dieser Arbeit ist es, die chemische Zusammensetzung von Nebel- und Regenwasser sowie die Zusammenhänge zwischen der chemischen Zusammensetzung von Nebel und dem Herkunftsort des betrachteten Nebels zu untersuchen. Dazu wurden von November 2003 bis Februar 2004 am Standort „El Tiro“ im Süden Ecuadors Nebel- und Regenwasserproben gesammelt.

In dieser Arbeit wird die Frage behandelt, ob Nebel durch Herkunftsort und Wegstrecke in seiner chemischen Zusammensetzung beeinflusst wird. Ausgangspunkt dieser Arbeit ist die Hypothese, dass maritim geprägter Nebel, der vom Pazifik her an den Messstandort getragen wird, höhere Konzentrationen an den typischen Meerwasserionen Na⁺, Cl⁻ und Mg²⁺ aufweist. Dagegen soll anthropogen geprägter Nebel, der vom Kontinent advehiert wird, größere Mengen an Stickstoffverbindungen in Form von Ammonium (NH₄⁺) oder Nitrat (NO₃⁻) sowie Sulfat (SO₄²⁻) enthalten. Es werden mögliche Ursachen für die unterschiedliche ionische Zusammensetzung von Nebelwasser diskutiert. Weiterhin soll in die Diskussion mit einbezogen werden, ob mögliche Verdünnungseffekte die Ionenkonzentration beeinflussen. Der Einfluss des Meeres auf die Chemie von Nebelwasser ist bereits in einigen Studien untersucht worden (GUNDEL et al. 1994, BRIDGES et al. 2002). Frühere Untersuchungen zeigen, dass die Konzentrationen von Stickstoffverbindungen und SO₄²⁻ mit zunehmendem Abstand zur Küste steigen, die Konzentrationen von Na⁺, Cl⁻ und Mg²⁺ dagegen abnehmen (MUNGER et al. 1989). Weiterhin werden die Ergebnisse der chemischen Analytik von Nebel- und Regenwasser verglichen und interpretiert. Im Rahmen dieser Arbeit wurden zwei unterschiedliche passive Nebelsammler verwendet. Es werden die Effektivität der verschiedenen Fangmethoden und die Gründe für die unterschiedlichen Fangvolumina diskutiert.

1.4 ÜBERBLICK ZUR NEBELFORSCHUNG

Die Anfänge der Nebelforschung liegen im Jahre 1906, als MARLOTH am Tafelberg ein Reisigbündel auf einen Hellmann-Regensammler stellte und nach einem Nebelereignis die 16-fache Wassermenge vorfand. Seit dem Bekanntwerden der

Problematik um sauren Regen und sauren Nebel in den 80er Jahren (SCHULZE et al. 1989), wurden die Forschungen im Bereich Nebel intensiviert. Der Eintrag von anthropogenen Schadstoffen wie Sulfat, Nitrat und Ammonium durch Nebeldeposition wurde diskutiert.

Die methodischen Ansätze der Nebelforschung sind je nach Schwerpunkt unterschiedlich und reichen von der klassischen Betrachtung von Nebel als klimatologische Größe (CAMERON et al. 1997, HUTLEY et al. 1997, ZIMMERMANN und ZIMMERMANN 2002), Nebel als Transportmedium von Luftschadstoffen (KLEMM 1994) bis hin zur Modellierung von Nebelereignissen (ELIAS et al. 1995, KHVOROSTYANOV 1995, WALMSLEY et al. 1996, HALLBERG et al. 1997, IGAWA et al. 1998, SCHATZMANN 1999) und satellitenbasierter Fernerkundung (BENDIX und LAUER 1992, WINIGER et al. 1992, BENDIX 2002). Weitere Forschungsschwerpunkte, die auch in dieser Arbeit thematisiert werden, sind die chemische Zusammensetzung von Nebel (MINAMI und ISHIZAKA 1996, TENBERKEN und BÄCHMANN 1998, HOAG et al. 1999, HERCKES et al. 2002), der Einfluss des Meeres auf die Chemie von Nebel (HERCKES et al. 1998, MUNGER et al. 1989, GUNDEL et al. 1994, BRIDGES et al. 2002, WATANABE et al. 2001, COLLETT et al. 2002) sowie der Vergleich von Nebel und Regen (GORDON et al. 1994, SCHEMENAUER et al. 1995, HOLDER 2004). Bei der Ökosystemforschung nimmt Nebel eine zentrale Rolle als Teil des Stoffkreislaufs ein. In einem relativ neuen Forschungsansatz werden die ausgekämmten Wassermengen sowie die Ionendeposition in die Vegetation betrachtet (VERMEULEN et al. 1997, CLARK et al. 1998, DAWSON 1998, BURKARD et al. 2002, WRZESINSKY 2004)

Seit den 80er Jahren findet Nebelforschung auch Anwendung bei der Trinkwassergewinnung und ist somit auch von Nutzen für die praktische Entwicklungshilfe. An den Küsten Perus und Chiles (SCHEMENAUER et al. 1988, CERECEDA und SCHEMENAUER 1991, SCHEMENAUER und CERECEDA 1994, EDWARDS et al. 2001, LARRAIN et al. 2001), in ariden Gebieten Namibias (SHANYENGANA et al. 2002), auf Teneriffa (MARZOL JAÉN 2001), in Nepal (MAC QUARRIE et al. 2001) und in der Dominikanischen Republik (SCHEMENAUER et al. 2001) wird Nebel gesammelt, um bedürftige Regionen mit Wasser für Hausgebrauch und Landwirtschaft zu versorgen (ECKHARDT und SCHEMENAUER 1998, OLIVIER und DE RAUTENBACH 2002). Neuere Bemühungen beziehen sich auf die Einbeziehung der Bevölkerung, um auch nach Beendigung der laufenden Projekte die Situation betroffener Dörfer nachhaltig zu verbessern (EDWARDS et al. 2001).

2 UNTERSUCHUNGSGBIET

2.1 GEOGRAPHISCHE LAGE

Ecuador hat eine Größe von etwa 290.000 km² und befindet sich an der Nordwestküste Südamerikas, zwischen 1°30' nördlicher und 5° südlicher Breite sowie zwischen 75° und 81° westlicher Länge. Das Land grenzt im Norden an Kolumbien und im Süden und Osten an Peru. Ecuador ist die kleinste Andenrepublik und lässt sich in drei landschaftliche Großeinheiten aufteilen: in die Küstenregion (*la costa*), das Andenhochland (*la sierra*) und das Amazonastiefland (*el oriente*). Die in Nord-Süd-Richtung verlaufende Andenkordillere, ein alpides Faltengebirge, wird von zwei Gebirgszügen (*Cordillera Occidental* und *Cordillera Oriental*) gebildet, die durch die innerandine Depression voneinander getrennt sind. Die innerandinen Hochbecken erreichen eine Höhe von 2600 bis 2700 m üNN und werden von Querrücken (sog. „*nudos*“) unterbrochen, die die westliche und östliche Kordillere miteinander verbinden. Das nördliche Hochland ist jünger und geologisch aktiv mit Erdbeben, Erdstößen und Vulkanismus. Hier befinden sich der Chimborazo, der mit 6310 m üNN die höchste Erhebung Ecuadors darstellt, sowie der Cotopaxi, der mit 5897 m üNN der höchste aktive Vulkan der Erde ist. Der südliche Abschnitt der ecuadorianischen Anden ist älter, geologisch weniger aktiv und erreicht nicht die Höhen des nördlichen Teils.

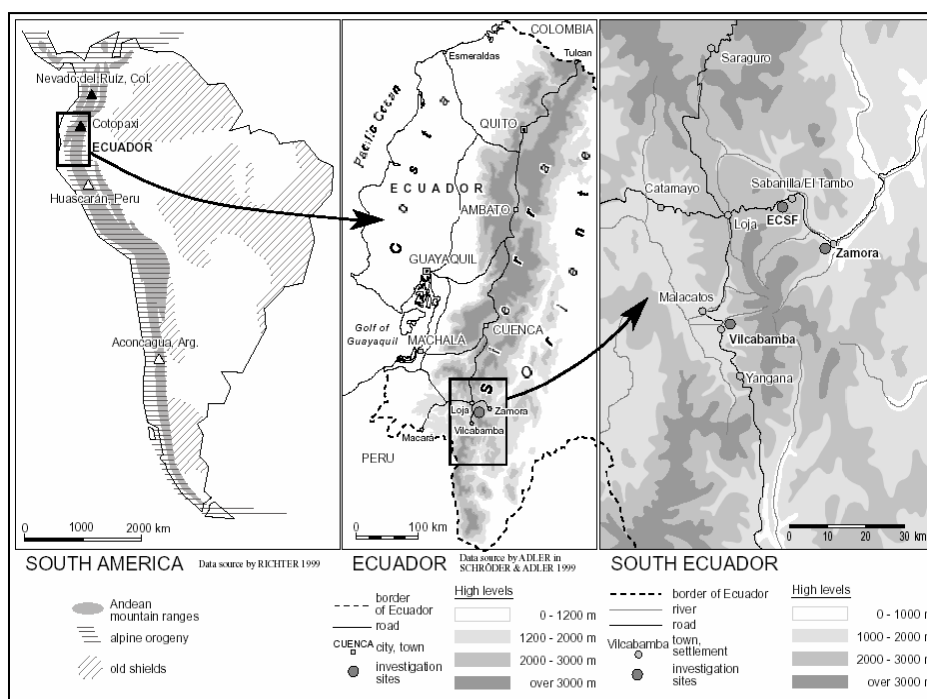


Abbildung 3: Lage des Untersuchungsgebiets (Quelle: HAGEDORN 2001)

Die Feldarbeit für diese Diplomarbeit wurde im Süden Ecuadors an der Ostabdachung der Cordillera Oriental durchgeführt. Das Untersuchungsgebiet (Abbildung 3) befindet sich auf dem Gelände der Estación Científica San Francisco (ECSF). Das Stationsgelände umfasst Höhen von 1800 m üNN bis 3150 m üNN und hat eine Flächengröße von 8 km². Die ECSF gehört zu der Provinz Zamora-Chinipe und befindet sich zwischen den Provinzhauptstädten Zamora und Loja. Der Ort der Probenahmen, „El Tiro“, befindet sich im Nationalpark Podocarpus. Der Nationalpark hat eine Flächengröße von 146.000 ha und ist das einzige Schutzgebiet Südecuadors. Er beinhaltet alle Vegetationsstufen vom tropischen Tieflandregenwald über Bergnebelwald bis hin zum tropisch-alpinen Weideland, dem Páramo. Der Messort „El Tiro“ befindet sich in einer Passlage auf 2825 m (3°59'45" S und 79°09'38" W) und ist somit der höchste Punkt der Verbindungsstraße zwischen den Provinzhauptstädten Zamora und Loja. Dieser Standort zeichnet sich durch seine exponierte Lage und seinen „Düseneffekt“ aus. Winde aus dem Amazonasgebiet drücken feuchte warme Luftmassen entlang des Tales nach oben, wo sich aufgrund der Staulage die meisten Wolken konzentrieren. Der flache Hang östlich des Nebelfängers und die hohen Windgeschwindigkeiten schaffen optimale Bedingungen zum Nebelfangen. Die niedrige, baumlose Páramo-Vegetation des Untersuchungsgebiets kämmt bodennah kaum Nebel aus, so dass die Sichtweite unter 5 m sinken kann.

Der Messstandort wurde nach verschiedenen Kriterien ausgewählt. Die Nebelwahrscheinlichkeit hatte hierbei die höchste Priorität, da in dem Messzeitraum von November 2003 bis Februar 2004 möglichst viele Proben gesammelt werden sollten. Ein weiteres Kriterium war die Erreichbarkeit, denn es sollte eine tägliche Probenahme unter zumutbaren Vorraussetzungen erfolgen. Eine tägliche Nebelwahrscheinlichkeit wäre auch an anderen Standorten im Podocarpus Nationalpark gegeben gewesen, aber es wäre aus logistischen Gründen nicht möglich, diese Standorte täglich zu erreichen. Ein weiterer Vorteil, den der Standort „El Tiro“ bietet, ist die bereits eingerichtete Klimastation, die dort schon seit einigen Jahren betrieben wird. Diese Klimastation wird vom Projekt PREDICT sowie von der Arbeitsgruppe um Prof. Michael Richter von der Friedrich-Alexander-Universität aus Erlangen betreut. Am Messort „El Tiro“ werden das ganze Jahr über die meteorologischen Standardparameter Lufttemperatur, Niederschlag, Luftfeuchte, Windgeschwindigkeit, Windrichtung und Globalstrahlung sowie die Bodentemperatur gemessen. Es befanden sich bereits vor den Messungen für diese Arbeit ein passiver Standardnebelfänger und ein Regensammler an der Klimastation „El Tiro“.

Die Forschungsstation Estación Científica San Francisco (ECSF) wird von der Fundación Científica San Francisco (FCSF) verwaltet. Neben der Förderung von wissenschaftlicher Arbeit zum Schutz des Bergregenwaldes hat die Fundación sich zur Aufgabe gemacht, unter Einbeziehung von Bevölkerung und Umweltgruppen nach alternativen Nutzungspotentialen zu suchen. Die von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderten Arbeitsgruppen behandeln Fragestellungen bezüglich der biologischen und geowissenschaftlichen Eigenschaften des tropischen Bergregenwaldes. Forschungsschwerpunkte sind hierbei die Diversität, die dynamischen Prozesse und die Entwicklung von Nutzungspotenzialen unter ökosystemaren Gesichtspunkten. Darauf aufbauend werden die Funktionsweise wichtiger Stoffflüsse und Regenerationspotentiale der Vegetation in Wechselwirkung mit der Tierwelt untersucht. Hier wird in einem multidisziplinären Ansatz aus Bio-, Geo-, Forst- und Agrarwissenschaftlern das Ökosystem tropischer Bergregenwälder untersucht.

Die im Rahmen dieser Arbeit behandelten Fragestellungen zur Herkunft der Luftmassen im Untersuchungsgebiet und zur chemischen Zusammensetzung von Nebel und Regen sind in das Forschungsprojekt zur Untersuchung der Stoffflüsse eingebettet.

2.2 KLIMA

Ecuador befindet sich am Äquator und im Bereich der inneren Tropen. Es treten relativ geringe Temperaturschwankungen im Jahresverlauf und große Temperaturschwankungen im Tagesverlauf auf, weswegen man von einem vorherrschenden Tageszeitenklima spricht. Nach BENDIX und LAUER (1992) ist das Witterungsgeschehen der Tropen grundlegend bestimmt von Umformungsprozessen eingestrahelter Energie in Form von latenter und fühlbarer Wärme. Verantwortlich für das tropische Klima ist die Innertropische Konvergenz (ITC), die jahreszeitlich mit dem Stand der Sonne bis zu $23,5^{\circ}\text{N}$ und $23,5^{\circ}\text{S}$ wandert. Als ITC bezeichnet man die Zone mit ausgeprägten konvektiven Luftbewegungen um den Äquator. Da die Luft über dem Kontinent stärker erwärmt werden kann als über dem Ozean, ist die Lage der ITC über den Kontinenten polwärts verlagert. Im Nordsommer wandert sie auf dem Kontinent weit nach Norden und im Südsommer nach Süden. In der ITC steigt Luft durch bodennahes Zusammenströmen der Nordostpassate der Nordhalbkugel und der Südostpassate der Südhalbkugel Luft auf und zieht dabei weitere Luft mit sich (Abbildung 4). Diese Zirkulation führt zur Entstehung der meridional verlaufenden Hadley-Zelle. Das Aufsteigen der durch

ihren langen Weg über dem Ozean mit Feuchtigkeit gesättigten Luft in der ITC bedingt, dass durch adiabatisches Abkühlen der Wasserdampf kondensiert und sich Wolken bilden.

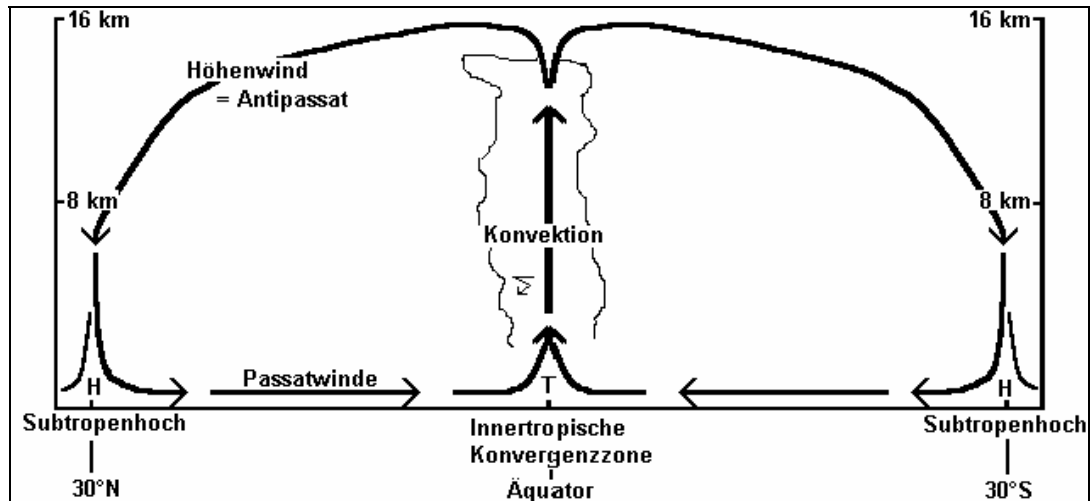


Abbildung 4: Schema zur Passatzirkulation und Entstehung der Hadley-Zelle

(Quelle: verändert nach FORKEL 2004)

An der Küste (*costa*) Ecuadors herrschen ganzjährig gleich bleibende, relativ hohe Temperaturen mit sehr unterschiedlichen Niederschlagsmengen vor. Im Amazonasgebiet (*oriente*) fallen relativ große Niederschlagsmengen mit einem Jahresdurchschnitt von etwa 2000 mm und es sind das ganze Jahr über gleich bleibend hohe Temperaturen vorherrschend.

Für das Andenhochland (*sierra*) sind mittlere Temperaturen von 12,5 °C mit hohen täglichen Temperaturschwankungen und mittlere Niederschläge typisch. An den Ost- und Westflanken der Andenabdachung kann es in höheren Lagen bis zu 5000 mm im Jahresdurchschnitt regnen. Die meridional verlaufenden Anden wirken als Klimascheide, so dass an den Osthängen völlig andere klimatische Verhältnisse angetroffen werden als an den Westhängen. Die Höhe und topographischen Bedingungen der Andenkordillere beeinflussen die Temperatur und Niederschlagsverteilung. Täler im Gebirge kanalisieren den Transportweg für Wasserdampf und sorgen durch das Berg-Talwind-Phänomen gleichzeitig für eine räumliche Differenzierung der Niederschlagsverhältnisse (BENDIX und LAUER 1992). Trotz des tropischen Tageszeitenklimas kann man in der östlichen Andenabdachung zwischen 1000 und 3500 m üNN eine spezielle Klimakonstellation mit Regenzeit von April bis Juli und eine Trockenzeit von September bis Januar feststellen (BENDIX und LAUER 1992).

Das Untersuchungsgebiet befindet sich an der Ostabdachung des Andenhochlandes (sierra) und steht unter dem Einfluss der SE-Passate. Obwohl das ganze Jahr hinweg relativ hohe Niederschläge mit Werten zwischen 2000 mm und 4000 mm auftreten, kann man trockenere und feuchtere Perioden unterscheiden. Die relative Trockenheit der Andenostabdachung in der Zeit von Oktober bis März während der ecuadorianischen Hauptregenzeit werden mit dem Auftreten von *Low-Level-Jets* begründet. Diese Winde sind nordhemisphärische NE-Passate, die aufgrund der Reibung am Andenostfuß und durch die Coriolis-Kraft in Äquatorbreite zu NW-Winden umgelenkt werden (Abbildung 14 in Kapitel 4.1). Die Niederschlagspitzen der östlichen Andenabdachung im Juni und Juli werden durch SE-Passate aus dem Amazonastiefland verursacht (südostpassatliche Steigungsregen) (BENDIX und LAUER 1992). Am Gebirgsfuß werden die relativ warmen feuchten Luftmassen gestaut und angehoben. Dabei kühlen sie sich adiabatisch ab, kondensieren und regnen sich aus. Das innerandine Hochland wirkt als Heizfläche, so dass der Wasserdampftransport durch das Berg-Talwind-Phänomen verstärkt wird (KISTEMANN und LAUER 1990).

Abbildung 5 zeigt die mittlere jährliche Temperatur- und Niederschlagsverteilung des Messortes „El Tiro“.

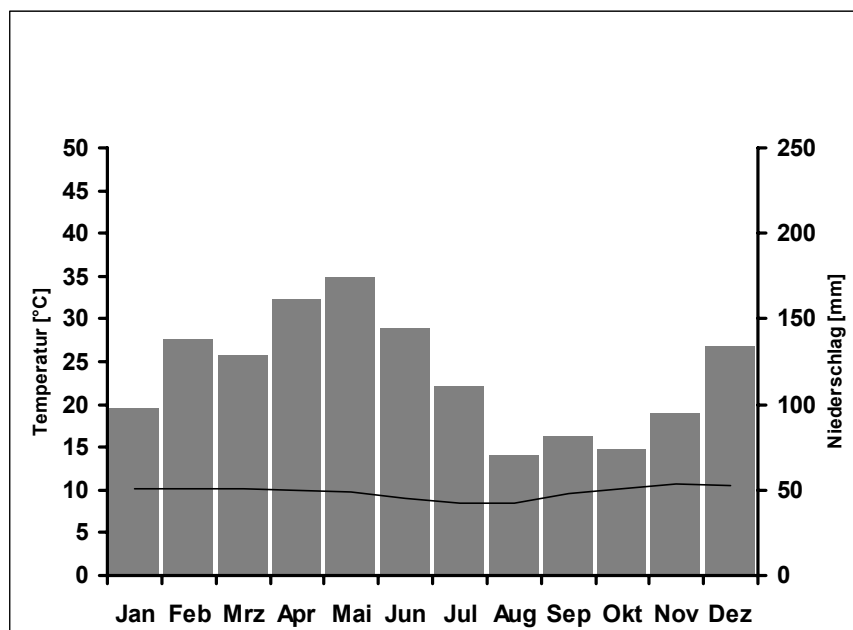


Abbildung 5: Klimadiagramm des Messortes "El Tiro" (Quelle: R. ROLLENBECK)

2.2.1 KLASSIFIKATION VON TYPISCHEN WINDSITUATIONEN

Während der Messperiode von November 2003 bis Februar 2004 wurden von der Arbeitsgruppe Richter aus Erlangen an der Klimastation „El Tiro“ die meteorologischen Standardparameter Lufttemperatur, relative Luftfeuchtigkeit, Niederschlag, Globalstrahlung, Windgeschwindigkeit und Windrichtung sowie auch die Bodentemperatur gemessen und für diese Arbeit freundlicherweise zur Verfügung gestellt. Die Daten wurden in einem Zyklus von 10 Minuten erhoben und anschließend stündlich gemittelt. Die Klassifikation von typischen Windsituationen an der Klimastation „El Tiro“ im Süden Ecuadors an der Ostabdachung der Andenkordillere erfolgt auf Grundlage dieser Daten. Im Anhang befindet sich eine Übersicht aller aufgezeichneten Daten. Für die Fragestellung dieser Arbeit sind die Parameter Windrichtung und Windgeschwindigkeit von besonderer Bedeutung. Die Klassifizierung von typischen Windsituationen fand daher nach diesen Parametern statt. Für die Einteilung wurden immer ganze Tage betrachtet. Jeder Tag des betrachteten Zeitraumes vom 11. November 2003 bis zum 15. Januar 2004 wurde so einer Klasse zugeordnet. Innerhalb jeder Klasse wurde für die Parameter Lufttemperatur, relative Luftfeuchte, Niederschlag, Globalstrahlung, Windgeschwindigkeit, Windrichtung und Bodentemperatur der Mittelwert gebildet. Die Mittelwerte für jede Windsituation sind in Tabelle 1 dargestellt.

Bei Windsituation I weht der Wind mit hohen Windgeschwindigkeiten mit im Mittel 7 m s^{-1} konstant aus östlicher bis südöstlicher Richtung. Es ist sehr neblig, was man an der hohen Luftfeuchtigkeit und der geringen Globalstrahlung erkennt. Die Luft- und Bodentemperaturen sind relativ niedrig. Es fällt kaum Niederschlag in Form von Regen.

Die Windsituation II ist geprägt von höheren Temperaturen, sehr geringen Windgeschwindigkeiten von im Mittel 2 m s^{-1} und ebenfalls geringen Regenniederschlägen. Die geringere relative Luftfeuchtigkeit und die höhere Globalstrahlung weisen darauf hin, dass während dieser Windsituation weniger Nebel als während Windsituation I herrscht.

Von den 74 Tagen des betrachteten Zeitraumes wurden 48 Tage der Windsituation I und 26 Tage der Windsituation II zugeordnet. Die Einteilung in die beiden Klassen war bis auf wenige Ausnahmen sehr eindeutig. Da bei der Klassifizierung der Windsituationen viel Wert auf die Konstanz der Windrichtung gelegt wurde, sind die Tage, an denen mehr als 1/4 der stündlichen Winddaten nicht aus südöstlicher Richtung kamen, der Windsituation II zugeordnet. Beispiele für Windsituation I und Windsituation II sind in Abbildung 6 dargestellt.

Tabelle 1: Mittelwerte der gemessenen Parameter von Windsituation I und Windsituation II

| Parameter | Windsituation I | Windsituation II |
|-------------------------------------|-----------------|------------------|
| Lufttemperatur (° C) | 9,8 | 11,3 |
| relative Luftfeuchtigkeit (%) | 92 | 85 |
| Niederschlag (mm) | 0,2 | 0,2 |
| Globalstrahlung (W/m ²) | 122,8 | 185,6 |
| Windgeschwindigkeit (m/s) | 7 | 2 |
| Windrichtung (Grad) | 123 | 196 |
| Bodentemperatur (°C) | 10,6 | 12,8 |

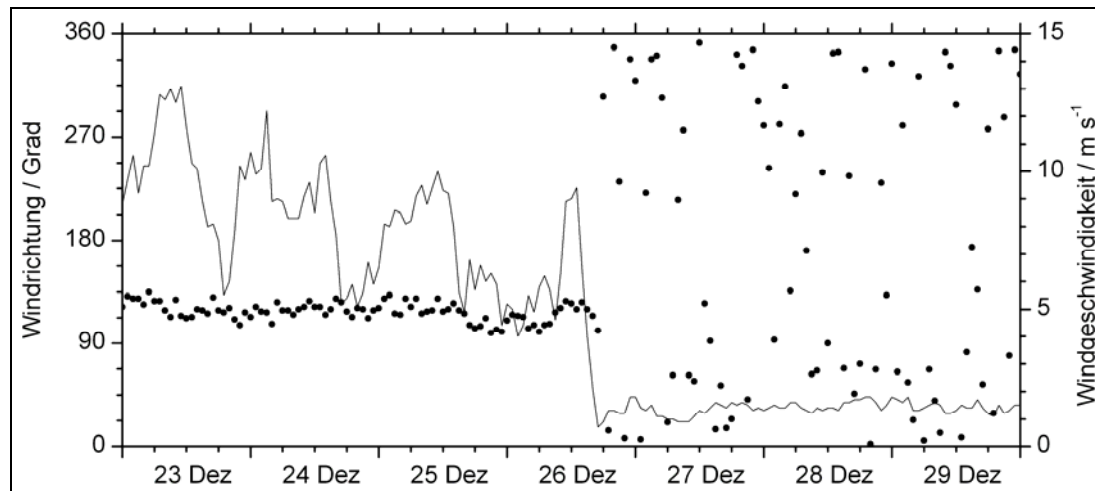


Abbildung 6: Beispiele für Windsituation I und Windsituation II, gemessen am Messort „El Tiro“. Vom 23. bis 26.12. herrschte Windsituation I und vom 27. bis 29.12. Windsituation II.

2.3 VEGETATION

In Ecuador nehmen tropische Bergregenwälder (Bosque Tropical de Montaña) 10 % der Landesfläche ein und beherbergen darauf 50 % der gesamten Flora Ecuadors (BALSLEV et al. 1998). Für die hohen Diversitätsraten werden, neben dem konstanten tropischen Wuchsklima, unterschiedliche Gründe verantwortlich gemacht. Wie bereits in der Einleitung erwähnt, ermöglichen die geringen Höhen der Andenpässe in Südecuador Migrationsbewegungen und somit genetischen Austausch für viele Tier- und Pflanzenarten zwischen dem Amazonasbecken und dem Küstentiefland (BECK und MÜLLER-HOHENSTEIN 2001, BUSSMANN 2001). Zudem variieren die klimatischen Verhältnisse je nach Niederschlagsverteilung, eintreffender Sonnenstrahlung und Windexposition kleinräumig, wodurch heterogene Habitate entstehen. Die natürlich auftretenden Erdbeben sind ebenfalls ein wichtiger Faktor für die Dynamik und Erhaltung der hohen Artenvielfalt in den Tropen. In überalternden Waldbeständen ist die Artenzahl wesentlich geringer als in

sich entwickelnden Beständen. Nach Erdbeben erfolgt Sukzession bis hin zur Klimaxgesellschaft (BUSSMANN 2001).

Ecuador liegt im neotropischen Florenreich (SCHMITHÜSEN 1968). In den südamerikanischen Anden unterscheidet man eine Höhenstufung der Vegetation, die von „Tierra Caliente“ (0 bis 1000 m) über „Tierra Templada“ (1000 bis 2000 m), „Tierra Fría“ (2000 bis 3500 m), bis zur „Tierra Helada“ (höher als 3500 m) reicht.

Im Küstentiefland treten vor allem die laubabwerfenden Wälder auf. Für das Amazonasbecken sind die immergrünen tropischen Regenwälder typisch. Die charakteristische Waldform des Andenhochlandes ist in Höhen zwischen 1800 und 3000 m der Bergnebelwald (BUSSMANN 2001). Nach oben schließt sich ab etwa 3000 m Höhe die Páramo-Vegetation an. Páramos sind vor allem im nördlichen und feuchteren Teil der Anden zwischen Venezuela und Ecuador verbreitet. Die Lebensbedingungen sind geprägt von starkem Bodenfließen, hohen Strahlungsintensitäten, geringerem Luftdruck sowie Trockenheit oder Nässe. Sie bestehen aus einer immergrünen Vegetationsformation aus geschlossenem Grasland. Typisch ist das Vorkommen von Epiphyten wie Bromelien und Farnen sowie Gräsern und bodenbedeckenden Polsterpflanzen (siehe Abbildung 7).



Abbildung 7: typische Páramo-Vegetationsform im Untersuchungsgebiet (Quelle: U. SOLTAU)

Epiphyten sitzen auf anderen Pflanzen auf und haben selber keinen Kontakt zum Boden. Sie sind eigenständige Pflanzen und halten sich lediglich mit ihren Wurzeln auf den Wirtspflanzen fest. Epiphytismus bildet ein eigenes Ökosystem innerhalb eines anderen. Die Epiphyten ernähren sich von Humusansammlungen in Astgabeln, von Regen- oder auch von Nebelwasser (Abbildung 8). Voraussetzung für ihr Auftreten sind große Niederschlagsmengen oder ein hoher Feuchtigkeitsgehalt der Luft. Bromelien formen mit ihren Blättern Trichter, mit denen sie Humusreste und bis zu zehn Liter Wasser speichern können. Die Lebensform der Epiphyten ist eine Anpassungsstrategie an den Lichtmangel auf tropischen Waldböden.



Abbildung 8: an der Vegetation impaktierte Nebeltröpfchen (Quelle: U. SOLTAU)

Der Messstandort „El Tiro“ befindet sich auf 2825 m üNN und kann der baumlosen Páramo-Vegetation zugeordnet werden. Im Untersuchungsgebiet kommen die für Páramos charakteristischen Bromelien, Farne, Orchideen, Gräser und Polsterpflanzen vor.

3 MATERIAL UND METHODEN

3.1 NEBELSAMMLER

Im Rahmen dieser Arbeit wurden zwei passive Nebelfängermodelle verwendet: ein zylindrischer Nebelfänger (Cylindrical Fog Collector, CFC) und ein Standardnebel-fänger (Standard Fog Collector, SFC).

Man unterscheidet grundsätzlich zwischen aktiven und passiven Nebelfängern. Aktivsammler saugen aktiv Luft an, so dass sie unabhängig von den natürlichen Luftbewegungen sind und somit auch an Orten mit geringen Windgeschwindigkeiten eingesetzt werden können. Sie benötigen in der Regel eine elektrische Stromversorgung. Passive Nebelsammler sind auf Luftbewegung angewiesen und können daher nur an Orten mit hohen Windgeschwindigkeiten sinnvoll eingesetzt werden. Ist die Trägheit der heran gewehten Nebeltropfen zu groß, um der Strömung des Windfeldes zu folgen, prallen die Tröpfchen gegen die Harfen bzw. das Fangnetz des Nebelsammlers (Abbildung 9).



Abbildung 9: impaktierte Nebeltröpfchen an den Harfen des passiven Nebelsammlers CFC
(Quelle: U. SOLTAU)

Ein Nachteil von passiven Nebelfängern ist, dass die Fangeffizienz stark von der herrschenden Windgeschwindigkeit und je nach Modell auch von der Exposition zur Hauptwindrichtung abhängt und somit stark schwankt. Ein Vorteil von passiven Nebelsammlern ist, dass von ihnen die Impaktion naturnaher wiedergespiegelt wird als von aktiven Nebelfängern.

Bei aktiven Sammlern kann im Gegensatz zu passiven Sammlern eine Bevorzugung von kleinen Tröpfchen erfolgen, da diese leichter angesogen werden als größere Tröpfchen. Eine Schwierigkeit von passiven Nebelfängern ist jedoch die quantitative Vergleichbarkeit des Fangvolumens, weil die Menge des mitgefangenen Regenniederschlags nicht genau berechnet werden kann (SCHEMENAUER und CERECEDA 1994) und das beprobte Volumen unbekannt ist.

3.1.1 ZYLINDRISCHER NEBELSAMMLER

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein passiver zylindrischer Nebelsammler der Firma Kroneis¹ verwendet. Es wurde mit einem passiven Sammler gearbeitet, weil eine Stromversorgung im Gelände nicht zur Verfügung stand. An dem gewählten Standort herrschten außerdem sehr hohe Windgeschwindigkeiten, so dass der Nebel durch die natürlichen Luftbewegungen herangeweht wurde. Der Nebelfänger ist aufgrund seiner zylindrischen Form omnidirektional und daher nicht von einer bestimmten Windrichtung abhängig. Er besteht aus einem Dach, Teflon-Harfen, Trichter, einer Auffangflasche und aus einem Schutzgehäuse (Abbildung 10).

Das Dach wurde mit Nylonschrauben fest an dem Gerüst mit den Harfen festgeschraubt, da es den hohen Windgeschwindigkeiten im Untersuchungsgebiet nicht standgehalten hätte. Der Fangzylinder besteht aus 460 Teflonfäden, die doppelreihig angeordnet sind, um den Wirkungsgrad zu erhöhen. Teflon ist als Material besonders geeignet, weil es witterungsfest ist und mit dem Probewasser nicht chemisch reagiert. Die projizierte Auffangfläche ist 0,09 m² groß und wurde berechnet durch die Multiplikation von Höhe und Durchmesser. Der Sammler hat eine Höhe von 0,45 m, einen Umfang von 0,65 m und einen Durchmesser von 0,21 m.

Die advektiv herantransportierten Nebeltropfen werden von den Teflonharfen ausgekämmt, koagulieren und laufen in den Ausfluss. Von dort gelangen sie über einen Zylinder, der sich unter einem Schutzgehäuse befindet, in eine 1-Liter-Auffangflasche aus Polyethylen. Die Probenflasche ist strahlungsgeschützt und leicht

¹ Kroneis GmbH, Iglaseegasse 30-32, 1990 Wien, Österreich

auswechselbar. Der Dachaufsatz soll eine Vermischung von Nebel und Regen verhindern. Bei hohen Windgeschwindigkeiten kann eine solche Vermischung jedoch nicht vollkommen ausgeschlossen werden.

Vor Erstgebrauch wurde der Nebelsammler zur Reinigung 48 Stunden in eine Mucosal-Lösung zur Reinigung von Laborgeräten eingelegt und anschließend mehrfach mit destilliertem Wasser abgespült. Bei praktischer Arbeit mit dem Sammler wurden Einmal-Gummihandschuhe getragen. Nach der Reinigung ist der Nebelfänger in einem lebensmittelechten Polyethylenbeutel verpackt und zum Transport in einer mit Alkohol ausgewischten Aluminium-Kiste verstaut worden.

Bereits nach wenigen Messungen im Gelände hat sich gezeigt, dass das Auffangvolumen der originalen Flasche zu gering war und ein Überlauf gebaut werden musste. Dazu wurde ein Loch in die Mitte der Auffangflasche gebohrt, ein Schlauch aus Tygon eingesteckt und in einen Behälter mit einem Volumen von 5 Litern geführt. So ist in der 1-Liter-Flasche ein Sedimentfang entstanden und das Nebelwasser konnte in den 5-Liter-Kanister fließen. Es wurden ausschließlich Materialien verwendet, die mit dem Nebelwasser nicht chemisch reagieren. Um Kontamination zu verhindern ist die Konstruktion gesteckt und nicht geklebt worden.



Abbildung 10: zylindrischer Nebelsammler (CFC) (Quelle: R ROLLENBECK)

3.1.2 STANDARDNEBELFÄNGER

Der passive Standardnebelfänger (Standard Fog Collector, SFC) ist ursprünglich von SCHEMENAUER und CERECEDA bei einem Projekt zur Trinkwassergewinnung in Chile entwickelt worden. Der Messstandort „El Tiro“ ist mit einem Nachbau ausgestattet (Abbildung 11), der aus einem 1 m² großen Polypropylen-Netz besteht. Das Netz ist in einem 2 m hohen und 1 m breiten Gestell angebracht und hat eine Maschenweite von 1×1,5 mm. Die vom Wind herangewehten Nebeltropfen werden von dem Netz aufgefangen, wo sie sich vereinigen bis sie der Schwerkraft folgend nach unten fließen. Über eine Auffangrinne wird das Nebelwasser in einen 25-Liter-Kanister geleitet und dort gesammelt. Der SFC ist so aufgestellt, dass die vorherrschenden Winde aus Osten bzw. Westen frontal auftreffen. Es wird angenommen, dass die Fangeffizienz des SFC bei wechselnder Windrichtung geringer ist. Wie auch bei dem anderen verwendeten passiven Nebelsammler ist es mit dem SFC schwierig, die Fangraten quantitativ zu vergleichen. Da der SFC kein Dach besitzt, kann die Vermischung von Nebel und Regen nicht ausgeschlossen werden. Besonders an hohen, exponierten Standorten wird viel Regen horizontal mit dem Wind an den Nebelfänger herangeweht. Die Zusammensetzung von solchen Mischproben kann von reinem Nebel bis zu reinem Regen variieren (SCHEMENAUER und CERECEDA 1994).



Abbildung 11: Standardnebelfänger (SFC) (Quelle: R. ROLLENBECK)

3.2 REGENSAMMLER

Der verwendete Niederschlagssammler RS200 (Abbildung 12) wurde von der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft entwickelt und von der Firma UMS² hergestellt. Der Regensammler besteht aus einem Trichter mit einem Durchmesser von 200 mm, einer Auffangfläche von 314 cm² und einem 5-Liter-Sammelbehälter. Ein leicht zu reinigendes Grobsieb schützt vor Verschmutzungen. Der Niederschlagssammler besteht vollständig aus Polyethylen.

Das Sammeln von Regenwasser ist abhängig von der Geländeform und vom Wettergeschehen und stellt daher besondere Anforderungen an den Messort. Der Standort „El Tiro“ zeichnet sich durch seine Passlage aus, was das Auffangen von Regenwasser und die anschließende Niederschlagsquantifizierung beeinflusst. Der Regen wurde bei den erreichten Windgeschwindigkeiten von bis zu 15 m s⁻¹ fast horizontal herangeweht und konnte daher nicht vollständig von dem verwendeten Niederschlagssammler aufgefangen werden. Die ermittelten Regenmengen spiegeln daher nicht den real eintreffenden Regeninput wider.

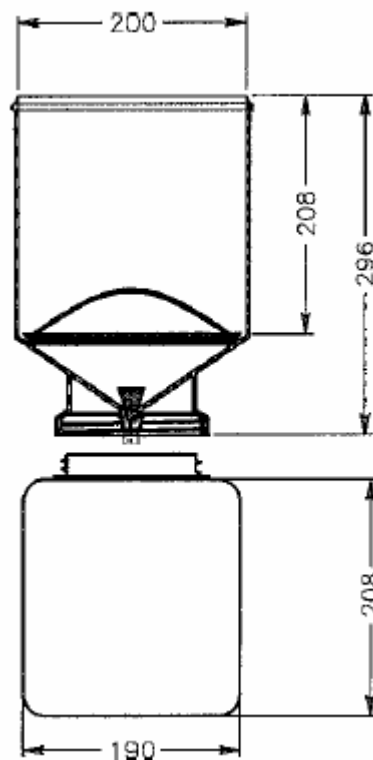


Abbildung 12: Niederschlagssammler RS200 (Quelle: UMS)

² UMS GmbH, Gmunder Str. 37, 81379 München

3.3 PROBENAHMEN

Die Probenahmen für Nebelwasser erfolgten bis auf wenige Ausnahmen täglich und für Regenwasser wöchentlich. Dabei wurde das gesammelte Nebel- bzw. Regenwasser aus dem Auffangkanister entnommen und in zwei mit destilliertem Wasser vorgereinigte 50-mL-Probeflaschen gefüllt. Anschließend wurde das Volumen des restlichen im Kanister verbliebenen Wassers gemessen und notiert. Im Labor der Estación Científica San Francisco wurden die Probeflaschen mit einem bereits vorgefertigten Aufkleber mit Datum und Uhrzeit beschriftet. Um die Umsetzung von Ammonium zu Nitrat durch mikrobielle Aktivität zu verhindern, wurden die Proben unmittelbar nach der Beschriftung tiefgefroren. Die Kühlkette wurde während der Rückreise aus Ecuador bis zur chemischen Analyse im Labor des Instituts für Landschaftsökologie in Münster aufrechterhalten. Zur Bestimmung von pH-Wert und elektrischer Leitfähigkeit wurde vor Ort ein Probenaliquot verwendet und nach den Messungen verworfen. In regelmäßigen Abständen wurden zur Überprüfung der chemischen Analysen Blindproben genommen. Dazu wurde der Nebelsammler mittels einer gereinigten handelsüblichen Sprühflasche mit Millipore-Wasser besprüht und das Wasser aufgefangen. Die Blindproben wurden genauso behandelt wie die Regen- und Nebelwasserproben.

3.4 HERKUNFTSBERECHNUNG DER GESAMMELTEN NEBELPROBEN

Luftmassen sind geprägt durch ihren geografischen Ursprung (KLEMM et al. 1994) und ihren Transportweg. Eine erste Unterteilung ist eine Klassifizierung in Luftmassen kontinentalen Charakters und maritimen Charakters. Trajektorien sind Luftmassen- und Partikelbewegungskurven (SCHÖNWIESE 1994), welche die Bahnen beschreiben, die ein betrachtetes Luftpaket in einem bestimmten Zeitraum durchzieht. Sie verbinden alle vom Luftpaket passierten Orte und liefern so Auskunft über die Herkunft von Luftmassen.

Zur Identifizierung der Herkunft und des Strömungsverlaufes der gesammelten Nebelproben wurden Rückwärtstrajektorien berechnet. Dabei wird der Transportweg eines einzelnen Luftpakets ausgehend vom Ankunftsort dargestellt.

Die Berechnung von Rückwärtstrajektorien ist ein häufig angewandtes Verfahren, um den Einfluss der Herkunft von betrachteten Luftmassen auf Schadstoffkonzentrationen (KLEMM et al. 1994) zu untersuchen. Auf der Grundlage von Trajektorien können auch Emissionsquellen identifiziert und die Verfrachtung von Luftschadstoffen analysiert werden. Die Klassifizierung in „Kontinent“- und „Pazifik“-Proben erfolgte nicht auf Grundlage der an der meteorologischen Station

aufgezeichneten Windrichtungen, weil die Topographie des Reliefs die aus Osten anströmenden Winde kanalisiert.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde zur Berechnung der Trajektorien das HYSPLIT-Model verwendet (DRAXLER und ROLPH 2003, ROLPH 2003). HYSPLIT (Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectories) ist aus einer Zusammenarbeit des NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) und Australia's Bureau of Meteorology entstanden und ist im Internet frei verfügbar. Es wurde für jede Nebelprobe eine dreidimensionale Rückwärtstrajektorie berechnet. Zur Berechnung der Trajektorien wurden die geografische Lage des Messorts, Datum und Uhrzeit der Probenahme eingegeben. Die während der Probenahme gemessene Ortszeit wurde zuvor in UTC umgerechnet. Die ermittelte Rückwärtstrajektorie stellt den Verlauf eines Luftpaketes in den letzten 120 Stunden vor Eintreffen am Messort dar. Der gewählten FNL-Variante liegt eine horizontale Auflösung von 191 km zugrunde. Trotz möglicher Ungenauigkeiten im Höhenmodell wurde als Höhenangabe für den Messort „El Tiro“ 1 m über Boden angegeben. Bei Berechnung der Trajektorien ausgehend von 2885 m über Meeresniveau wäre das bodennahe Windfeld nicht berücksichtigt worden und so nicht die realen Verhältnisse wiedergegeben worden. Der Höhenverlauf des Luftpaketes wird durch eine Farbabstufung verdeutlicht. Vom HYSPLIT-Programm werden außerdem auch Daten zur potenziellen Temperatur, Lufttemperatur, Niederschlagsmenge, Mischungsschicht und relativen Luftfeuchtigkeit ausgegeben. Die Visualisierung erfolgte mit dem Programm „Trajektkat“, das von T. Wrzesinsky freundlicherweise zur Verfügung gestellt wurde.

Die Rückwärtstrajektorien wurden berechnet, um eine Klassifizierung der untersuchten Nebelereignisse vornehmen zu können. Auf Basis der ermittelten Trajektorien wurden die Nebelproben in „Kontinent“-Proben und „Pazifik“-Proben klassifiziert.

3.5 CHEMISCHE ANALYTIK

Zur Untersuchung der chemischen Zusammensetzung wurden in der Zeit vom 03.11.2003 bis zum 10.02.2004 insgesamt 89 Wasserproben gesammelt.

Die elektrische Leitfähigkeit und der pH-Wert wurden im Labor der ECSF gemessen. Die Analysen der Proben auf NH_4^+ , K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , NO_3^- , PO_4^{3-} , SO_4^{2-} erfolgte im Labor des Instituts für Landschaftsökologie der Universität Münster³. Die Proben wurden vor der chemischen Analyse nicht gefiltert.

3.5.1 ELEKTRISCHE LEITFÄHIGKEIT

Die elektrische Leitfähigkeit wurde mit dem Gerät Conductivity Meter LF 315 von WTW gemessen. Vor jeder Messung wurde der Temperaturbereich neu eingestellt. Es wurde in Aliquots der Probe gemessen. Dabei wurden zuerst die Leitfähigkeit und anschließend der pH-Wert ermittelt, um eine Verfälschung des Leitfähigkeitswertes durch die pH-Elektrode zu vermeiden. Die elektrische Leitfähigkeit erlaubt Rückschlüsse auf den Gesamtelektrolytgehalt, der sich in der Lösung befindet. Durch die Bestimmung der elektrischen Leitfähigkeit während einer Messreihe lassen sich Schwankungen im Elektrolytgehalt bestimmen (Hütter 1994). Zur Qualitätskontrolle der Daten wurden die berechnete und die gemessene Leitfähigkeiten verglichen.

3.5.2 PH-WERT

Die Messungen des pH-Wertes fanden im Labor der Estación Científica San Francisco statt und wurden mit dem pH-Meter pH 323 von WTW durchgeführt. Die Temperaturkorrektur erfolgte während der Messung durch ein integriertes Thermometer. In unregelmäßigen Abständen wurde die Elektrode neu kalibriert. Es wurde eine konventionelle Zweipunktkalibrierung mit den Eichlösungen pH 4 und pH 7 durchgeführt. Artefakte durch Diffusionspotentiale an der Referenzelektrode in ionenarmem Wasser traten nicht auf. Dies wurde durch Messung des pH-Wertes in $10^{-4} \text{ mol l}^{-1} \text{ HNO}_3$ überprüft (Messwert: pH 3,97). Es wurde in Aliquots der jeweiligen Proben gemessen um eine Veränderung der Zusammensetzung des Nebelwassers durch die pH-Elektrode (insbesondere K^+ - und Cl^- -Konzentrationen) zu verhindern. Das Aliquot wurde anschließend verworfen.

³ Institut für Landschaftsökologie, Robert-Koch-Str. 26, 48149 Münster

3.5.3 IONENKONZENTRATIONEN

Tabelle 2: verwendete Verfahren zur Quantifizierung der chemischen Parameter und deren geschätzte Bestimmungsgrenzen [mg L⁻¹]

| Parameter | Verfahren/Messgerät | Bestimmungsgrenze [mg/L ⁻¹] |
|---|--------------------------------------|--|
| elektrische Leitfähigkeit | Leitfähigkeitselektrode / WTW LF 315 | |
| pH-Wert | pH-Elektrode / WTW pH 323 | |
| Natrium (Na ⁺) | Flammenphotometer / Jenway / Pep 7 | 0,20 |
| Magnesium (Mg ²⁺) | AAS / Perking Elmer / Optima 3000 | 0,05 |
| Kalium (K ⁺) | Flammenphotometer / Jenway / Pep 7 | 0,20 |
| Calcium (Ca ²⁺) | AAS / Perking Elmer / Optima 3000 | 0,60 |
| Ammonium (NH ₄ ⁺) | Aquatec / Analyser 5400 | 0,04 |
| Chlorid (Cl ⁻) | IC / Dionex / DX 100 | 0,03 |
| Nitrat (NH ₃ ⁻) | Aquatec / Analyser 5400 | 0,05 |
| Nitrat (NH ₃ ⁻) | IC / Dionex / DX 100 | 0,05 |
| Sulfat (SO ₄ ²⁻) | IC / Dionex / DX 100 | 0,05 |
| Phosphat (PO ₄ ³⁻) | IC / Dionex / DX 100 | 0,10 |

3.5.4 QUALITÄTSKONTROLLE

Zur Qualitätskontrolle der Messergebnisse wurden Plausibilitätsprüfungen durchgeführt. Diese sind unerlässlich im Hinblick auf die anschließende Interpretation der Daten. Durch die rechnerische Summenbildung der Kationen- und Anionenäquivalentsummen erstellt man eine Ionenbilanz. Gemäß der Elektronenneutralitätsbedingung für wässrige Lösungen $c(\text{eq}^+) = c(\text{eq}^-)$, muss die Summe der Anionen der Summe der Kationen entsprechen. Für jede Wasserprobe wurde eine Ionenbilanz erstellt, indem die Summen der enthaltenen Anionen und Kationen gegenüber gestellt wurden. Für die Aufstellung der Ionenbilanz werden die gemessenen Hauptionen NH₄⁺, K⁺, Na⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, Cl⁻, NO₃⁻, PO₄³⁻ und SO₄²⁻ berücksichtigt.

Eine weitere Qualitätskontrolle der Messergebnisse erfolgte mittels Vergleich von berechneten und gemessenen Leitfähigkeiten. Für jede Probe wurde aus der spezifischen Leitfähigkeit der einzelnen Ionen die theoretische Leitfähigkeit berechnet.

Die berechnete Leitfähigkeit errechnet sich nach

$$X_{\text{ber}} = \sum_{\text{Ionen}} X_{\text{spez}} \cdot C_{\text{eq}}$$

mit X_{ber} berechnete (theoretische) Leitfähigkeit [$\mu\text{S cm}^{-1}$]
 X_{spez} Spezifische Leitfähigkeit [$\mu\text{S cm}^{-1}$]
 C_{eq} Äquivalentkonzentration [$\mu\text{S cm}^{-1}$]

Die berechnete Leitfähigkeit ist die Summe der Produkte aus Äquivalentkonzentration c_{eq} und der spezifischen Leitfähigkeit x_{spez} (Tabelle 3) der einzelnen Ionen.

Tabelle 3: spezifische Leitfähigkeiten der gemessenen Ionen in $\mu\text{S cm}^{-1} \mu\text{eq}^{-1} \text{L}$ (D'ANS UND LAX 1992)

| Ion | H ⁺ | NH ₄ ⁺ | K ⁺ | Na ⁺ | Ca ²⁺ | Mg ²⁺ | Cl ⁻ | NO ₃ ⁻ | PO ₄ ³⁻ | SO ₄ ²⁻ |
|----------|----------------|------------------------------|----------------|-----------------|------------------|------------------|-----------------|------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| spez. LF | 0,34965 | 0,0735 | 0,07348 | 0,05008 | 0,05947 | 0,053 | 0,07631 | 0,07142 | 0,069 | 0,08 |

Während der Messperiode von November 2003 bis Februar 2004 wurden in unregelmäßigen Abständen insgesamt 6 Blindproben genommen. Die Blindproben wurden genauso behandelt wie die Nebel- und Regenproben. Die chemische Zusammensetzung der Blindproben liefert Hinweise darauf, ob Verschmutzungen der Proben aus dem System selber stammen oder Inhaltsstoffe des gefangenen Nebels bzw. Regens sind. Weiterhin wurden 11 Nebel-Doppelproben und 2 Regen-Doppelproben genommen. Sie dienen zur direkten Überprüfung der chemischen Analytik. Sollten die Messergebnisse von regulärer Probe und Doppelprobe wesentlich voneinander abweichen, liegen Fehler in der Messtechnik vor.

Treten systematische Fehler bei den Ergebnissen der chemischen Analytik auf, ist ein Rückschluss auf das Fehlen eines bei der chemischen Analytik vernachlässigten Ions oder das Auftreten eines systematischen Messfehlers möglich.

4 ERGEBNISSE

4.1 TRAJEKTORIEN

Zur Identifizierung der Herkunft der Nebelproben wurden für jede Nebelprobe Rückwärtstrajektorien berechnet. Dazu wurde das HYSPLIT-Modell verwendet (DRAXLER und ROLPH 2003, ROLPH 2003). So konnte für jede Nebelprobe der Verlauf der Luftmasse während der letzten 120 Stunden vor Eintreffen am Messstandort visualisiert werden (Abbildung 13).

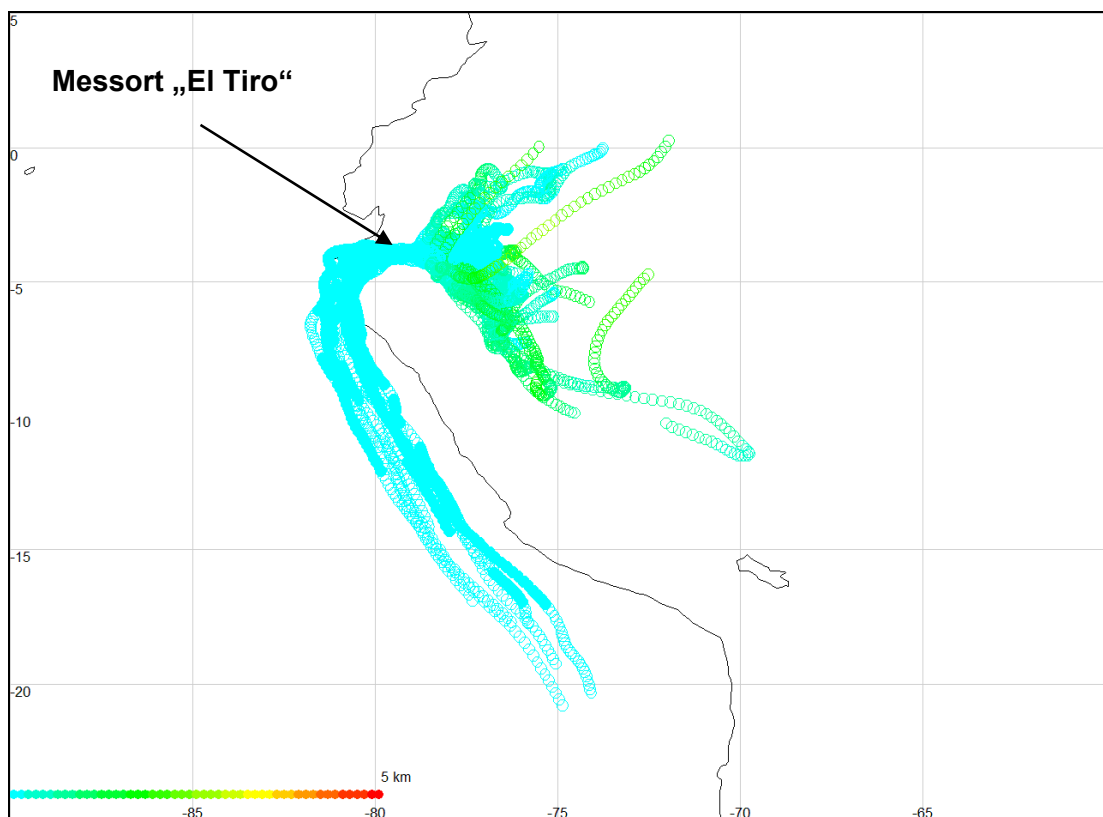


Abbildung 13: 120-Stunden-Rückwärtstrajektorien berechnet mit dem HYSPLIT-Modell für alle 59 Nebelproben

Auf Grundlage der Luftmassenbewegungskurve wurde eine Klassifizierung der Nebelproben in „Pazifik-“ und „Kontinent“-Proben vorgenommen. Von den 59 betrachteten Nebelproben wurden 10 Nebelproben als „Pazifik“-Proben und 49 als „Kontinent“-Proben identifiziert. Als „Pazifik“-Proben wurden die Proben bezeichnet, deren berechnete Trajektorien während der letzten 120 Stunden vor Ankunft am Nebelsammler aus westlicher Richtung kamen und dabei den Pazifik überströmten. Als „Kontinent“-Proben wurden alle die Proben identifiziert, deren Rückwärts-

trajektorien aus östlicher Richtung an den Messort herangeweht wurden. Die Luftmassen der „Kontinent“-Proben wurden aus dem Amazonasgebiet herantransportiert. Die Abbildung 13 zeigt, dass die vorgenommene Einteilung eindeutig ist und keinen Ermessensspielraum zuließ. Eine Zusammenstellung aller berechneten Rückwärtstrajektorien befindet sich im Anhang.

Der Nebel im Untersuchungsgebiet wurde in dem betrachteten Zeitraum von November 2003 bis Februar 2004 vorherrschend aus dem Amazonasgebiet advehiert. Diese Verteilung bestätigt die Aussage von BENDIX und LAUER (1992), die ebenfalls das Amazonasgebiet und den Pazifik als Wasserdampfquellen für Ecuador angeben. Die von der meteorologischen Station „El Tiro“ aufgezeichneten Winddaten belegen ebenfalls eine vorherrschende Windrichtung aus östlicher bis südöstlicher Richtung (siehe Anhang).

Nach BENDIX und LAUER (1992) bestimmen während der südsommerlichen Regenzeit von Dezember bis März die NE-Passate der Nordhalbkugel das Windfeld der Grundsicht über dem Amazonasgebiet. Der Trajektorienverlauf der „Kontinent“-Proben zeigt deutlich eine Beeinflussung durch die NE-Passate.

Der Nebel der „Pazifik“-Proben dagegen wird während der letzten 120 Stunden vor Ankunft am Nebelsammler ursprünglich aus südlicher Richtung herantransportiert. Erst wenige Kilometer vor Eintreffen am Untersuchungsgebiet verändert sich der Verlauf der Trajektorie in eine westliche Anströmungsrichtung. Die Trajektorie der „Pazifik“-Proben wird daher sehr wahrscheinlich beeinflusst vom Strömungsverlauf der SE-Passate. Die Änderung der südlichen in eine westliche Anströmrichtung erfolgt vermutlich aufgrund von lokalen Windverhältnissen oder durch Einbruch in die NE-Passate. Die Untersuchungen von BENDIX und LAUER (1992) zur Zirkulation über dem südamerikanischen Kontinent (Abbildung 14) zeigen denselben Verlauf.

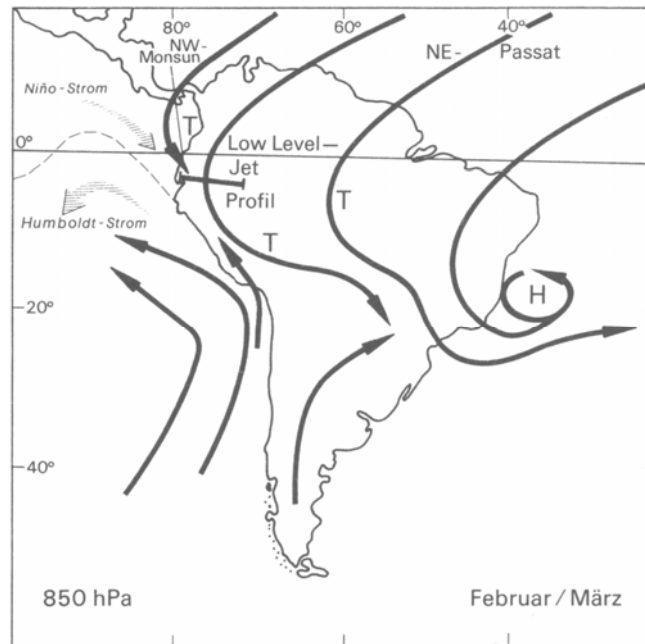


Abbildung 14: Zirkulation über Südamerika für die Monate Februar bis März
(Quelle: BENDIX und LAUER 1992)

In Abbildung 15 ist die Lage der ITC für den mittleren Monat Januar dargestellt. Die ITC verläuft im Januar über Ecuador, was bedeutet, dass hier die NE- und SE-Passate aufeinander treffen. Die ITC zeigt einen sehr ähnlichen wie die berechneten Rückwärtstrajektorien für die „Kontinent“-Proben. Auch die Darstellung des Verlaufs der ITC bestätigt die Vermutung, dass der „Kontinent“-Nebel mit den NE-Passaten transportiert wurde und die „Pazifik“-Proben vom SE-Passat beeinflusst wurden.

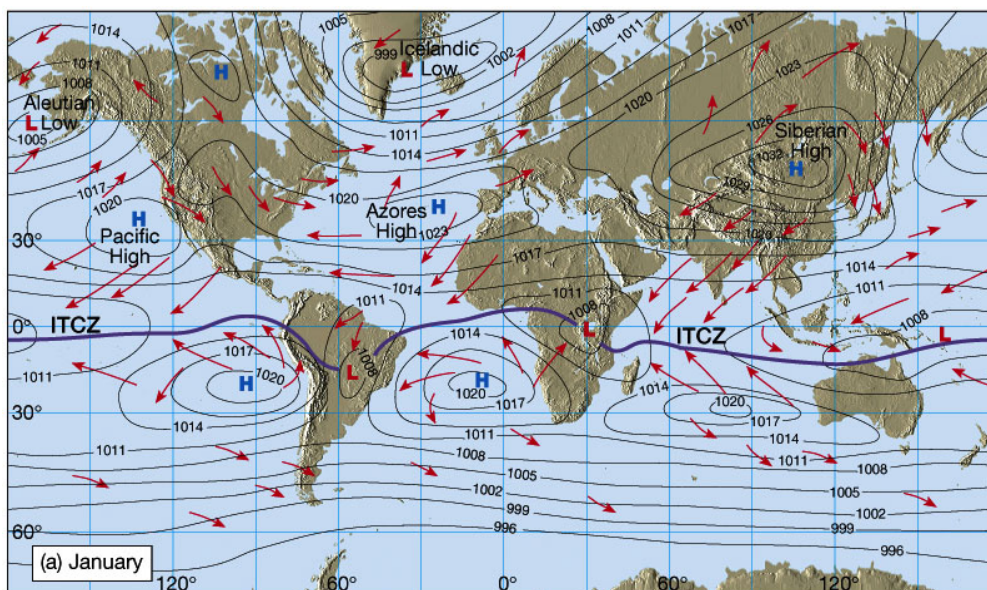


Abbildung 15: Verlauf der Innertropischen Konvergenzzone im Januar (Quelle: EASTERN ILLINOIS UNIVERSITY)

4.2 CHEMISCHE ZUSAMMENSETZUNG DER NEBELPROBEN

4.2.1 ALLGEMEINES

Zur Untersuchung der chemischen Zusammensetzung von Nebelwasser wurden in der Zeit vom 3.11.2003 bis zum 10.2.2004 Proben genommen. Alle 59 gesammelten Nebelproben wurden im Labor des Instituts für Landschaftsökologie auf NH_4^+ , K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , NO_3^- , PO_4^{3-} und SO_4^{2-} analysiert. Eine Zusammenstellung aller Ergebnisse der chemischen Analyse ist im Anhang aufgelistet.

Tabelle 4: Art der im Messzeitraum genommenen Wasserproben

| | Nebelwasser | Regenwasser | Blindproben |
|--------------|-------------|-------------|-------------|
| Proben | 59 | 11 | 6 |
| Doppelproben | 11 | 2 | |

Für die weitere Auswertung der Nebelproben wurden eine „Kontinent“-Probe (vom 26.01.2004) und zwei „Pazifik“-Proben (vom 02.12.2003 und 15.01.2004) ausgeschlossen. Diese Proben wurden nach kurzen Trockenperioden genommen und weisen sehr hohe Ionenkonzentrationen auf. Es wird angenommen, dass diese Konzentrationen durch trockene Deposition verursacht wurden und es sich dabei nicht ausschließlich um eigentliche Nebelproben handelt.

Für die weitere Untersuchung der Wasserproben bleiben die Doppel- und Blindproben zunächst unberücksichtigt.

4.2.2 PH-WERT UND ELEKTRISCHE LEITFÄHIGKEIT

Der pH-Wert und die elektrische Leitfähigkeit sind bei allen 59 Nebelproben bestimmt worden. In Tabelle 5 und Tabelle 6 sind die statistischen Parameter des pH-Wertes und der elektrischen Leitfähigkeit angegeben.

Für die „Kontinent“-Proben schwanken die pH-Werte zwischen 3,91 und 5,61. Der Mittelwert ist 4,42 und der Median liegt bei 4,55. Die Werte der elektrischen Leitfähigkeit liegen zwischen $3 \mu\text{S cm}^{-1}$ und $95 \mu\text{S cm}^{-1}$. Der Mittelwert beträgt hier $32 \mu\text{S cm}^{-1}$ und der Median $25 \mu\text{S cm}^{-1}$.

Bei den „Pazifik“-Proben schwankt der pH-Wert zwischen 4,32 und 5,32. Das arithmetische Mittel beträgt 4,78 und der Median 4,93. Die elektrische Leitfähigkeit liegt zwischen $5 \mu\text{S cm}^{-1}$ und $38 \mu\text{S cm}^{-1}$. Der Mittelwert ist $17 \mu\text{S cm}^{-1}$ und der Median $14 \mu\text{S cm}^{-1}$.

4.2.3 KONZENTRATIONEN DER WICHTIGSTEN IONEN

In Tabelle 5 und Tabelle 6 sind die statistischen Kenngrößen der untersuchten Ionen NH_4^+ , K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , NO_3^- , PO_4^{3-} und SO_4^{2-} zusammengefasst dargestellt. Eine Auflistung aller gemessenen Ionenkonzentrationen befindet sich im Anhang.

Um die verschiedenen Ionen miteinander vergleichen zu können, wurde aus der gemessenen Massenkonzentration [mg L^{-1}] die Äquivalentkonzentration [$\mu\text{eq L}^{-1}$] berechnet. Diese errechnet sich aus dem Betrag der Ladungszahl (z), der Molaren Masse (M) und der gemessenen Konzentration (c) nach folgender Formel:

$$C_{\text{eq}} = c \cdot \frac{|z|}{M}$$

Die Äquivalentkonzentration ist die Stoffmenge bezogen auf Äquivalente, d.h. die der Anzahl der Mole von reagierenden Teilchen pro Liter Lösung und ist ebenfalls wichtig für die Berechnung der theoretischen Leitfähigkeit (siehe Kapitel 4.2.2).

Tabelle 5: Statistische Kenngrößen der chemischen Zusammensetzung der "Kontinent"-Proben. Angegebene Parameter: pH-Wert (pH), elektrische Leitfähigkeit (LF) [$\mu\text{S cm}^{-1}$], berechnete Leitfähigkeit (ber. LF) [$\mu\text{S cm}^{-1}$], Äquivalentkonzentrationen der Ionen [$\mu\text{eq L}^{-1}$]: Wasserstoff (H^+), Ammonium (NH_4^+), Kalium (K^+), Natrium (Na^+), Calcium (Ca^{2+}), Magnesium (Mg^{2+}), Chlorid (Cl^-), Nitrat (NO_3^-) und Sulfat (SO_4^{2-})

| n=48 | Median | Mittelwert | σ | Min | Max |
|--------------------|--------|------------|----------|------|------|
| pH | 4,55 | 4,42 | 0,41 | 3,91 | 5,61 |
| LF | 25 | 32 | 26 | 3 | 95 |
| ber. LF | 20 | 28 | 25 | 2 | 92 |
| H^+ | 28,5 | 37,8 | 29,2 | 2,5 | 123 |
| NH_4^+ | 28,1 | 64,2 | 82,4 | 0,0 | 305 |
| K^+ | 6,9 | 12,5 | 14,2 | 0,0 | 50,7 |
| Na^+ | 8,6 | 19,8 | 25,7 | 0,0 | 129 |
| Ca^{2+} | 8,0 | 13,6 | 13,9 | 2,0 | 57,4 |
| Mg^{2+} | 2,3 | 6,0 | 8,9 | 0,0 | 43,9 |
| Cl^- | 6,3 | 9,2 | 9,0 | 0,9 | 36,1 |
| NO_3^- | 21,0 | 40,1 | 50,2 | 1,4 | 215 |
| PO_4^{3-} | 0,0 | 1,9 | 2,9 | 0,0 | 11,2 |
| SO_4^{2-} | 28,8 | 42,6 | 42,0 | 1,2 | 142 |

Tabelle 6: Statistische Kenngrößen der chemischen Zusammensetzung der "Pazifik"-Proben. Angegebene Parameter: pH-Wert (pH), elektrische Leitfähigkeit (LF) [$\mu\text{S cm}^{-1}$], berechnete Leitfähigkeit (ber. LF) [$\mu\text{S cm}^{-1}$], Äquivalentkonzentrationen der Ionen [$\mu\text{eq L}^{-1}$]: Wasserstoff (H^+), Ammonium (NH_4^+), Kalium (K^+), Natrium (Na^+), Calcium (Ca^{2+}), Magnesium (Mg^{2+}), Chlorid (Cl^-), Nitrat (NO_3^-) und Sulfat (SO_4^{2-})

| n=8 | Median | Mittelwert | σ | Min | Max |
|--------------------|--------|------------|----------|------|------|
| pH | 4,93 | 4,78 | 0,34 | 4,32 | 5,32 |
| LF | 14 | 17 | 12 | 5 | 38 |
| ber. LF | 10 | 14 | 11 | 4 | 34 |
| H^+ | 13,2 | 16,7 | 14,3 | 4,8 | 47,9 |
| NH_4^+ | 32,2 | 33,5 | 32,0 | 0,0 | 101 |
| K^+ | 4,6 | 8,4 | 9,7 | 0,0 | 27,6 |
| Na^+ | 4,3 | 10,8 | 13,4 | 4,3 | 43,0 |
| Ca^{2+} | 8,5 | 8,7 | 2,9 | 5,0 | 12,0 |
| Mg^{2+} | 1,7 | 3,5 | 3,9 | 0,8 | 12,5 |
| Cl^- | 5,2 | 5,3 | 3,8 | 0,0 | 13,3 |
| NO_3^- | 11,5 | 19,8 | 21,2 | 1,2 | 55,6 |
| PO_4^{3-} | 0,0 | 0,5 | 1,5 | 0,0 | 4,1 |
| SO_4^{2-} | 29,6 | 30,1 | 23,3 | 2,0 | 60,4 |

Die gemessenen Ionenkonzentrationen wurden mit dem KOLMOGOROV-SMIRNOV-Test auf Normalverteilung getestet (Kapitel 4.2.5). Der Test ergab auf einem Signifikanzniveau von 95 % eine Ablehnung der Hypothese, dass die Datensätze normalverteilt sind. Da die betrachteten Ionenkonzentrationen nicht normalverteilt sind, werden für die weitere Betrachtung der Daten die Medianwerte verwendet.

Bei den „Kontinent“-Proben sind H^+ mit $28,5 \mu\text{eq L}^{-1}$ und NH_4^+ mit $28,1 \mu\text{eq L}^{-1}$ die dominierenden Kationen. Ca^{2+} ist mit $8,0 \mu\text{eq L}^{-1}$, Na^+ mit $8,6 \mu\text{eq L}^{-1}$ und K^+ mit $6,9 \mu\text{eq L}^{-1}$ repräsentiert. Bei den Anionen der „Kontinent“-Proben ist SO_4^{2-} das wichtigste Ion mit $28,8 \mu\text{eq L}^{-1}$. Der Median der NO_3^- -Konzentration $21,0 \mu\text{eq L}^{-1}$ und der Cl^- -Konzentration ist $6,3 \mu\text{eq L}^{-1}$.

Bei den „Pazifik“-Proben ist NH_4^+ mit $32,2 \mu\text{eq L}^{-1}$ das wichtigste Kation. H^+ -Ionen sind $13,2 \mu\text{eq L}^{-1}$ enthalten. Na^+ ist mit $4,3 \mu\text{eq L}^{-1}$, K^+ mit $4,6 \mu\text{eq L}^{-1}$ und Ca^{2+} mit $8,5 \mu\text{eq L}^{-1}$ vertreten. Es kommen als Medianwert nur $1,7 \mu\text{eq L}^{-1}$ Mg^{2+} vor. Bei den Anionen dominiert SO_4^{2-} mit $29,6 \mu\text{eq L}^{-1}$. NO_3^- ist mit $11,5 \mu\text{eq L}^{-1}$ und Cl^- mit $5,2 \mu\text{eq L}^{-1}$ vertreten. Die mediane Zusammensetzung der „Kontinent“- und „Pazifik“-Proben ist in den Abbildungen 16 und 17 dargestellt. Die Ionenbilanz der medianen Zusammensetzung ist für beide Klassen schlecht ausgeglichen. Die „Kontinent“-Proben enthalten $26,4 \mu\text{eq L}^{-1}$ mehr Kationen als Anionen und die „Pazifik“-Proben $18,2 \mu\text{eq L}^{-1}$.

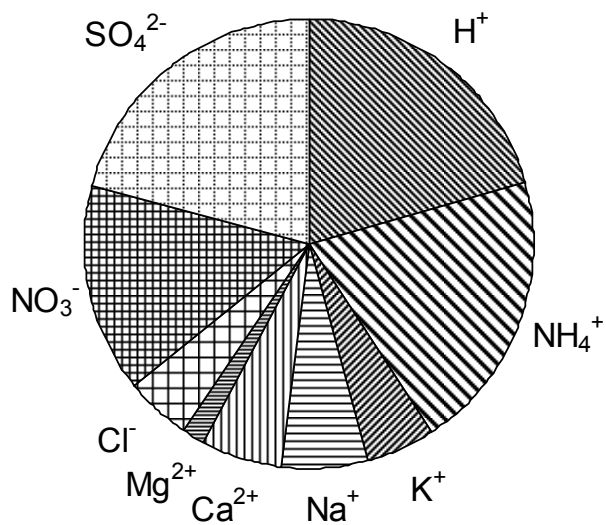


Abbildung 16: mediane Ionenzusammensetzung der „Continent“-Proben (insgesamt 139 $\mu\text{eq L}^{-1}$), gesammelt vom 3.11.2003 bis 10.2.2004, 48 Proben

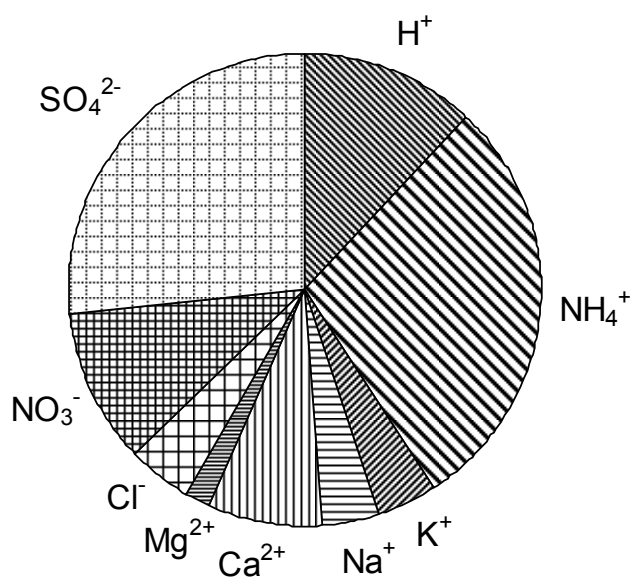


Abbildung 17: mediane Ionenzusammensetzung der „Pazifik“-Proben (insgesamt 111 $\mu\text{eq L}^{-1}$), gesammelt vom 3.11.2003 bis 10.2.2004, 8 Proben

4.2.3.1 VERGLEICH VON UNTERSCHIEDLICHEN NITRAT-MESSMETHODEN

Im Labor des Instituts für Landschaftsökologie sind zwei unterschiedliche Methoden zur Messung von Nitrat angewendet worden.

Zum einen ist mit einem Aquatec-Typ gemessen worden, das mittels Fließinjektionsanalyse arbeitet (FIA). Dabei wird die Probe automatisch in ein Fließsystem dosiert, in dem die zu bestimmenden Ionen während des Durchfließens mit der Reagenzlösung reagieren. In einem Durchflussdetektor wird das Reaktionsprodukt gemessen (HÜTTER 1994).

Eine weitere Messung der Nitratwerte erfolgte mit einem Ionenchromatograph. Bei dieser Methode wird die Probelösung mit Druck über eine Chromatographiesäule geleitet. So können je nach Austauscher Anionen, Kationen oder Ionenpaare reversibel adsorbiert werden. Die Ionen werden über ihre Leitfähigkeit oder Lichtabsorption im sichtbaren oder ultravioletten Bereich nachgewiesen. Die Ergebnisse werden anhand der Fläche der ausgegebenen Peaks ermittelt.

Ein Vergleich der beiden Messverfahren zeigt, dass die mit der Fließinjektionsanalyse gemessenen Nitratwerte regelmäßig höher sind als die des Ionenchromatographen. Sowohl die Ergebnisse der FIA als auch die des IC sind nicht normalverteilt, so dass keine Regressionsgerade berechnet werden kann. Die Linie in Abbildung 18 stellt das 1:1-Verhältnis dar. Da die Ergebnisse der FIA als systematisch höher anzusehen sind, können spontane Messfehler ausgeschlossen werden. Vermutlich liegen die Abweichungen der Nitratkonzentrationen an gerätespezifischen Messungenauigkeiten oder unterschiedlichen Empfindlichkeiten. Die Messungen mit dem IC fanden einige Wochen später statt als die Messungen mit Aquatec. Nach jedem Messverfahren wurden die Proben wieder eingefroren, so dass mikrobielle Aktivität weitestgehend ausgeschlossen wurde. Mikrobieller Aktivität würde Ammonium zu Nitrat umwandeln, so dass bei den Messungen mit dem IC höhere Werte hätten auftreten müssen.

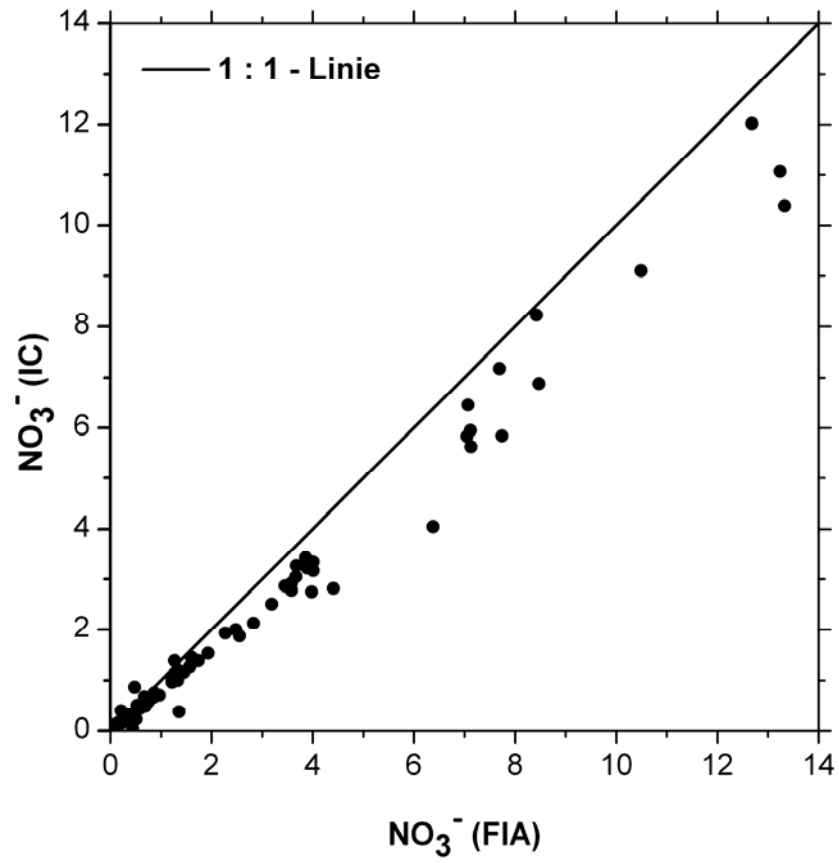


Abbildung 18: Vergleich der Nitrat-Messmethoden FIA und IC

4.2.4 QUALITÄTSPRÜFUNG FÜR NEBELPROBEN

Eine Plausibilitätskontrolle der Messergebnisse der chemischen Analytik erfolgte mittels Vergleich von berechneter und gemessener Leitfähigkeit und durch Überprüfung der Ionenbilanz. Es wurde für jede Probe aus der spezifischen Leitfähigkeit der Ionen die theoretische Leitfähigkeit berechnet. Der Vergleich der gemessenen mit der berechneten Leitfähigkeit zeigt, dass die gemessene Leitfähigkeit bis auf wenige Ausnahmen höhere Werte aufweist (Abbildungen 19 und 20). Die Linie zeigt das 1:1-Verhältnis an.

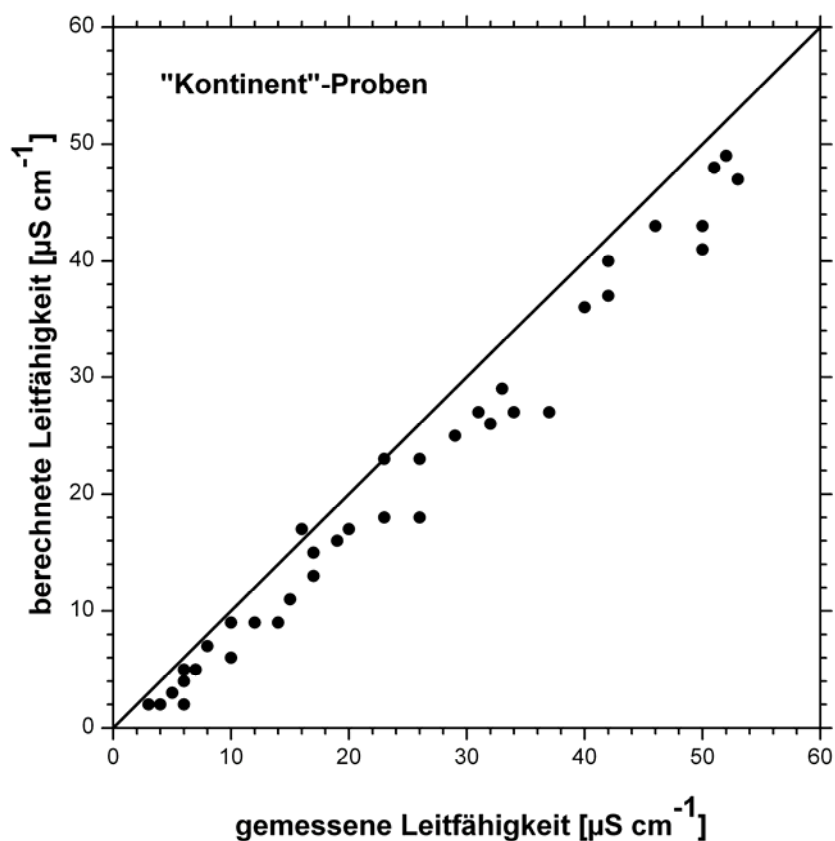


Abbildung 19: Vergleich der gemessenen und berechneten Leitfähigkeit der 48 „Kontinent“-Proben [µS cm⁻¹]

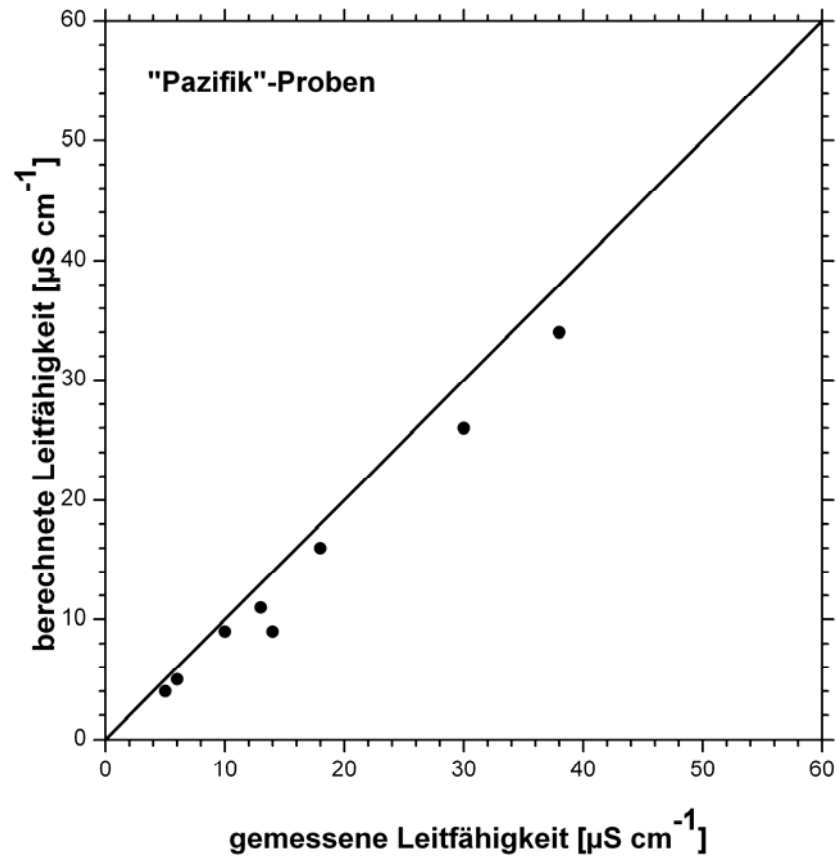


Abbildung 20: Vergleich der gemessenen und berechneten Leitfähigkeit der 8 "Pazifik"-Proben [$\mu\text{S cm}^{-1}$]

Bei der Berechnung der elektrischen Leitfähigkeit wurden nur die gemessenen Ionen NH_4^+ , K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , NO_3^- , PO_4^{3-} und SO_4^{2-} berücksichtigt. Die systematisch geringeren Werte weisen darauf hin, dass im untersuchten Nebelwasser Ionen enthalten sind, die bei der chemischen Analyse im Labor des Instituts für Landschaftsökologie nicht mitbestimmt wurden. Die Ionenbilanz ist sowohl für die „Kontinent“- als auch für die „Pazifik“-Proben nicht ausgeglichen. In den „Kontinent“-Proben sind 59 % der enthaltenen Ionen Kationen und 41 % sind Anionen. In den „Pazifik“-Proben haben die Kationen einen Anteil von 58 % und die Anionen einen Anteil von 42 %. Die schlecht ausgeglichene Ionenbilanz bestätigt die Vermutung, dass bei der chemischen Analyse ein oder mehrere Ionen nicht erfasst wurden.

Zur Überprüfung der Messergebnisse wurden außerdem Blindproben genommen. Die Konzentrationen der Blindproben waren nicht für alle Ionen bestimmbar, da die Konzentrationen unter der Bestimmungsgrenze lagen.

Tabelle 7: Statistische Kenngrößen der chemischen Zusammensetzung der Blindproben. Angegebene Parameter: pH-Wert (pH), elektrische Leitfähigkeit (LF) [$\mu\text{S cm}^{-1}$], berechnete Leitfähigkeit (ber. LF) [$\mu\text{S cm}^{-1}$], Äquivalentkonzentrationen der Ionen [$\mu\text{eq. L}^{-1}$]: Wasserstoff (H^+), Ammonium (NH_4^+), Kalium (K^+), Natrium (Na^+), Calcium (Ca^{2+}), Magnesium (Mg^{2+}), Chlorid (Cl^-), Nitrat (NO_3^-) und Sulfat (SO_4^{2-})

| n=6 | Median | Mittelwert | σ | Min | Max |
|--------------------|---------------|-------------------|----------------------------|------------|------------|
| pH | 4,88 | 4,92 | 0,19 | 4,73 | 5,23 |
| LF | 11 | 10 | 5 | 4 | 16 |
| ber. LF | 9 | 9 | 5 | 3 | 16 |
| H^+ | 13,1 | 11,9 | 4,6 | 5,8 | 18,5 |
| NH_4^+ | 7,5 | 8,0 | 8,1 | 0,0 | 19,8 |
| K^+ | 4,6 | 4,6 | 3,6 | 0,0 | 9,2 |
| Na^+ | 4,3 | 6,5 | 7,6 | 0,0 | 21,5 |
| Ca^{2+} | 9,0 | 9,7 | 6,6 | 3,0 | 22,0 |
| Mg^{2+} | 2,4 | 2,5 | 1,9 | 0,4 | 5,5 |
| Cl^- | 2,9 | 3,3 | 2,1 | 1,1 | 7,2 |
| NO_3^- | 8,4 | 11,1 | 9,7 | 1,5 | 25,3 |
| PO_4^{3-} | 2,7 | 2,2 | 1,8 | 0,0 | 4,1 |
| SO_4^{2-} | 13,7 | 18,2 | 15,7 | 3,5 | 44,0 |

4.2.5 STATISTISCHE AUSWERTUNG DER MESSERGEBNISSE

Der Vergleich der chemischen Untersuchung von den „Kontinent“- und „Pazifik“-Proben basiert auf einer statistischen Auswertung. Die Messergebnisse der chemischen Analyse sind mit zwei unterschiedlichen statistischen Verfahren ausgewertet worden.

4.2.5.1 AUSREIßERTEST NACH GRUBBS

Die Nebelproben wurden wie in Kapitel 4.1 erläutert auf der Grundlage der berechneten Trajektorien in „Pazifik“-Proben und „Kontinent“-Proben klassifiziert. Bei der statistischen Auswertung mit dem Ausreißertest nach GRUBBS wird davon ausgegangen, dass alle gemessenen hohen Ionenkonzentrationen auf trockene Deposition zurückzuführen sind und nicht aus dem eigentlichen Nebelwasser stammen. Damit handelt es sich bei diesen Werten um „Ausreißer“ nach oben, die nicht zum betrachteten Datensatz gehören und daher von der Untersuchung ausgeschlossen werden. Beim GRUBBS-Test wird für jeden Datensatz eine Prüfgröße errechnet, die den Abstand des verdächtigen Wertes zum Mittelwert bezeichnet. Die Prüfgröße gibt an, wie weit der zu testende Wert x vom Mittelwert entfernt ist. Anhand einer Tabelle vergleicht man, welcher Wert für das gewählte

Signifikanzniveau und den vorliegenden Stichprobenumfang als Ausreißer zu betrachten ist.

Es wurden so alle die Proben komplett ausgeschlossen, deren gemessene Konzentrationen für mindestens ein Ion mit einem Signifikanzniveau von 95% einen Ausreißer darstellen. Nach dem Ausreißertest verblieben 6 „Pazifik“-Proben und 19 „Kontinent“-Proben. Im Anschluss an den Ausreißertest wurden alle Daten mit dem KOLMOGOROV-SMIRNOV-Test auf Normalverteilung getestet. Alle Proben sind bei einem 5%-Niveau nach ZÖFEL (1992) normalverteilt. Ein t-Test zum Vergleich der beiden Klassen kam zu dem Ergebnis, dass sich der pH-Wert und die H⁺-Konzentration der „Kontinent“- und Pazifik“-Proben statistisch signifikant voneinander unterscheiden. Bei der elektrischen Leitfähigkeit und den Konzentrationen der restlichen bestimmten Ionen konnten keine signifikanten Unterschiede zwischen den beiden Klassen festgestellt werden.

Da bei dieser beschriebenen statistischen Auswertung der Datensatz von 10 auf 6 bei den „Pazifik“-Proben und von 49 auf 19 bei den „Kontinent“-Proben reduziert wurde, ist dieses Verfahren kritisch zu betrachten. Deshalb wurde nach einem nichtparametrisch Verfahren gesucht, um den Vergleich der beiden Datensätze durchzuführen. Dies wird im Folgenden beschrieben.

4.2.5.2 BOOTSTRAP-RESAMPLING-METHODE

Das Ergebnis des Ausreißertestes nach GRUBBS ist als kritisch zu bewerten. Daher wurden die Daten beider Klassen zusätzlich mit einem anderen statistischen Verfahren ausgewertet.

Nach dem Vergleich der Analyseergebnisse mit den im Gelände angefertigten Wetteraufzeichnungen wurden wie oben beschrieben eine „Kontinent“-Probe (vom 26.01.2004) und zwei „Pazifik“-Proben (vom 02.12.2003 und 15.01.2004) von der weiteren Untersuchung ausgeschlossen. Die bei der chemischen Analyse ermittelten Werte für pH-Wert, elektrische Leitfähigkeit und Ionenkonzentrationen der 48 „Kontinent“-Proben und 8 „Pazifik“-Proben wurden mit der Bootstrap-Resampling-Methode ausgewertet. Die Bootstrap-Resampling-Methode ist ein nichtparametrisches statistisches Testverfahren, bei dem aus einer gegebenen Datenmenge Werte wiederholt zufällig ausgewählt werden. Sie wird verwendet zur Schätzung von Verteilungen und daraus abgeleiteter Parameter. Mit der daraus resultierenden Wahrscheinlichkeitsverteilung kann die Überdeckungswahrscheinlichkeit der Konfidenzintervalle überprüft werden. Es wurden zufällig acht Werte aus der Stichprobe ausgewählt, von denen dann der Median ermittelt wurde. Dieser

Vorgang des Resamplings wurde 10000 Mal wiederholt. Mit dem so berechneten Datensatz von 10000 Medianen ist der KOLMOGOROV-SMIRNOV-Test durchgeführt worden. Der Test ergab auf einem Signifikanzniveau von 95 % eine Ablehnung der Normalverteilung.

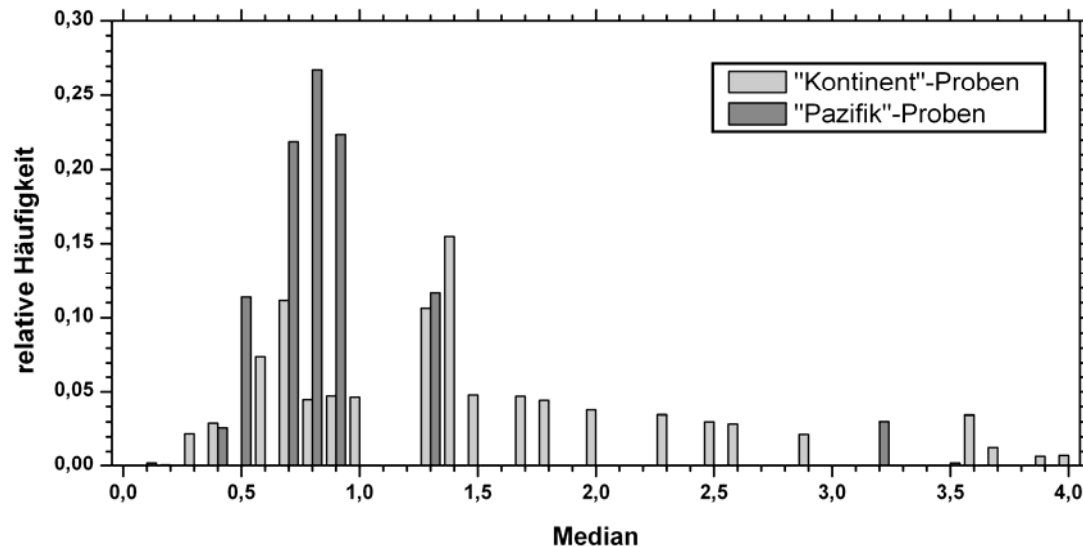


Abbildung 21: Beispiel für die Verteilung des Datensatzes von 10000 Medianen für Nitrat beim Bootstrap-Resampling

Die Verteilung der beim Bootstrap-Resampling ermittelten Mediane der Nitrat-Konzentration für die „Kontinent“-Proben ist zweigipfelig (Abbildung 21). Es gibt ein Maximum bei Klasse 1,4 und ein zweites Maximum bei Klasse 0,7. Die Mediane der „Pazifik“-Proben sind hauptsächlich auf die Klassen 0,4 bis 1,3 verteilt, aber es kommen noch Werte für die Klassen 3,2 und 3,5 vor. Diese Anordnung zeigt bereits auf den ersten Blick, dass die Mediane nicht normalverteilt sind.

Ein t-Test zum Vergleich der beiden Klassen konnte demzufolge nicht angewendet werden. Der Vergleich der beiden Klassen erfolgt daher nicht auf Grundlage der Mittelwerte sondern der Medianwerte der chemischen Analyse. Die Unterschiede in der chemischen Zusammensetzung zwischen den „Kontinent“- und „Pazifik“-Proben sind nach Durchführung des Bootstrap-Resamplings statistisch nicht signifikant.

4.2.6 VERGLEICH EINZELNER IONEN VON „KONTINENT“- UND „PAZIFIK“-PROBEN

Bei den „Kontinent“-Proben ist Sulfat (SO_4^{2-}) mit 21 % Anteil an der Gesamtäquivalentkonzentration das dominierende Ion. Ammonium (NH_4^+) und die Wasserstoffionen (H^+) sind mit jeweils 20 % Anteil an der Gesamtäquivalentkonzentration vertreten. Nitrat (NO_3^-) hat einen Anteil von 15 %. Bei den „Pazifik“-Proben sind NH_4^+ mit 28 % und SO_4^{2-} mit 27 % Anteil an der Gesamtäquivalentkonzentration die wichtigsten Ionen. H^+ ist mit 12 % und NO_3^- mit 10 % vertreten (Tabelle 8). Die Gesamtäquivalentkonzentration für die „Kontinent“-Proben ist $139 \mu\text{eq L}^{-1}$ und für die „Pazifik“-Proben $111 \mu\text{eq L}^{-1}$. Damit enthalten die „Kontinent“-Proben insgesamt $28 \mu\text{eq L}^{-1}$ mehr Ionen als die „Pazifik“-Proben.

Tabelle 8: Anteile [%] an der Gesamtäquivalentkonzentration der medianen Zusammensetzung für "Kontinent"- und "Pazifik"-Proben

| Ion | "Kontinent"-Proben | "Pazifik"-Proben |
|--------------------|--------------------|------------------|
| H^+ | 20% | 12% |
| NH_4^+ | 20% | 28% |
| K^+ | 5% | 4% |
| Na^+ | 6% | 4% |
| Ca^{2+} | 6% | 8% |
| Mg^{2+} | 2% | 2% |
| Cl^- | 5% | 5% |
| NO_3^- | 15% | 10% |
| PO_4^{3-} | 0% | 0% |
| SO_4^{2-} | 21% | 27% |

Die Medianwerte geben die Unterschiede in der Ionenkonzentration zwischen den beiden Klassen nicht eindeutig wieder. Da der Stichprobenumfang bei den „Pazifik“-Proben mit 8 Proben relativ klein ist, ist die Interpretation der Ergebnisse auf Basis der Mediane als kritisch zu betrachten. Der Mittelwert darf jedoch bei der Interpretation der Daten nicht verwendet werden, da die Konzentrationen nicht normalverteilt sind.

Die größten Unterschiede zwischen den „Kontinent“- und „Pazifik“-Proben (Abbildung 22) in der chemischen Zusammensetzung bestehen hinsichtlich der H^+ - und NO_3^- -Konzentration. In den „Kontinent“-Proben sind maximal $123 \mu\text{eq L}^{-1}$ H^+ -Ionen enthalten, während in den „Pazifik“-Proben höchstens $47,9 \mu\text{eq L}^{-1}$ H^+ -Ionen

vorkommen. Der Medianwert der H^+ -Konzentration liegt bei $28,5 \mu\text{eq L}^{-1}$ für die „Kontinent“-Proben und damit mehr als doppelt so hoch wie der Medianwert der „Pazifik“-Proben mit $13,2 \mu\text{eq L}^{-1}$. Die Maximalwerte von NO_3^- sind $215 \mu\text{eq L}^{-1}$ für die „Kontinent“-Proben und $55,6 \mu\text{eq L}^{-1}$ für die „Pazifik“-Proben. Die Konzentrationen von K^+ , Na^+ , Mg^{2+} und Cl^- ist bei den „Kontinent“-Proben ebenfalls höher, die Unterschiede zwischen beiden Klassen sind hierbei jedoch geringer. Auffällig ist, dass die mediane NH_4^+ -Konzentration der „Pazifik“-Proben mit $32,2 \mu\text{eq L}^{-1}$ höher ist als die der „Kontinent“-Proben mit $28,1 \mu\text{eq L}^{-1}$. Die Ca^{2+} -Konzentration ist bei den „Pazifik“-Proben ebenfalls leicht erhöht gegenüber den „Kontinent“-Proben.

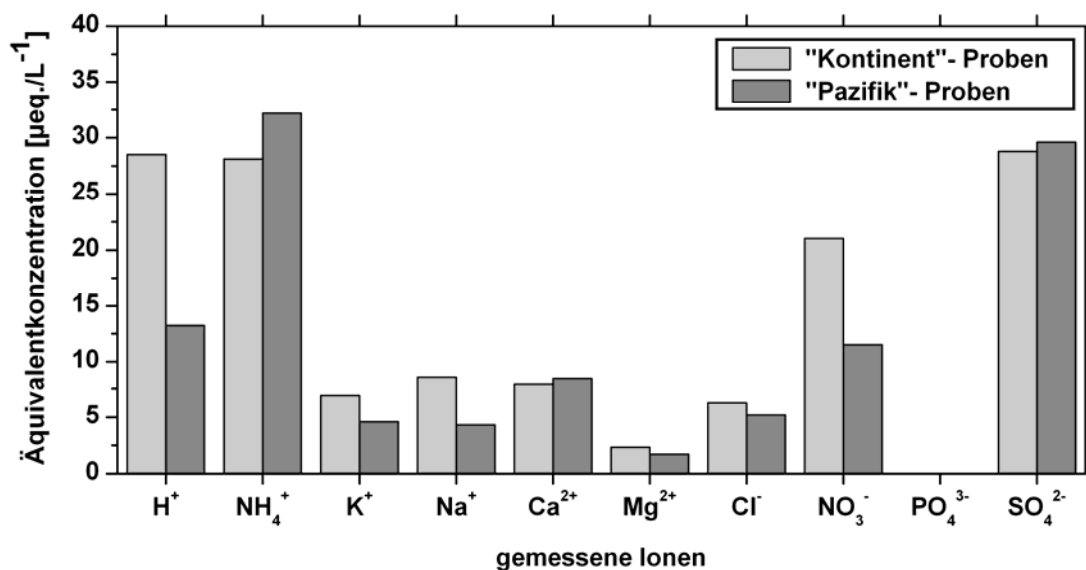


Abbildung 22: Vergleich der medianen Zusammensetzung von "Kontinent"- und "Pazifik"-Proben für die betrachteten Ionen H^+ , NH_4^+ , K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , NO_3^- , PO_4^{3-} , SO_4^{2-} [$\mu\text{eq L}^{-1}$]

Die „Pazifik“-Proben sind einheitlicher in ihrer chemischen Zusammensetzung als die „Kontinent“-Proben. Die Minima und Maxima für den pH-Wert, die elektrische Leitfähigkeit und für alle gemessenen Ionen liegen enger beieinander. Die größeren Schwankungen der kontinental geprägten Nebelproben könnten darin begründet sein, dass die Menge und Zusammensetzung der anthropogenen Emissionen sehr variabel ist und leicht beeinflusst wird. Der maritime Einfluss dagegen kann als konstant angesehen werden. Mögliche Gründe für die Unterschiede in der chemischen Zusammensetzung werden in Kapitel 5 diskutiert.

4.3 CHEMISCHE ZUSAMMENSETZUNG DER REGENPROBEN

4.3.1 ALLGEMEINES

Im Messzeitraum vom 3.11.2003 bis 10.02.2004 wurden zur chemischen Analyse insgesamt 11 Regenproben gesammelt. Die Proben wurden im Labor des Instituts für Landschaftsökologie auf NH_4^+ , K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , NO_3^- , PO_4^{3-} und SO_4^{2-} analysiert. Eine Zusammenstellung aller Ergebnisse der chemischen Analyse ist im Anhang aufgelistet. Alle Proben wurden mit dem KOLMOGOROV-SMIRNOV-TEST getestet. Die Verteilung der pH-Werte, der elektrischen Leitfähigkeit, der H^+ -Ionen, K^+ , Ca^{2+} , PO_4^{3-} und SO_4^{2-} ist auf einem Signifikanzniveau von 95% nach ZÖFEL (1992) normalverteilt. NH_4^+ , Na^+ , Mg^{2+} , Cl^- und NO_3^- weisen keine Normalverteilung auf. Da nicht alle Ergebnisse normalverteilt sind, findet die Analyse der Regenproben auf der Grundlage der Mediane statt.

4.3.2 PH-WERT UND ELEKTRISCHE LEITFÄHIGKEIT

Der pH-Wert und die elektrische Leitfähigkeit wurden bei allen 11 Regenproben ermittelt. In Tabelle 9 sind die statistischen Parameter des pH-Wertes und der elektrischen Leitfähigkeit angegeben.

Die gemessenen pH-Werte liegen zwischen 4,54 und 5,61. Das arithmetische Mittel beträgt 5,11 und der Median der pH-Werte ist 5,26.

Der niedrigste gemessene Wert der elektrischen Leitfähigkeit ist $3 \mu\text{S cm}^{-1}$ und der Höchstwert beträgt $11 \mu\text{S cm}^{-1}$. Der Mittelwert und Median sind $6 \mu\text{S cm}^{-1}$.

4.3.3 KONZENTRATIONEN DER WICHTIGSTEN IONEN

Die gemessenen Ionenkonzentrationen der Regenproben sind in Tabelle 9 zusammenfassend dargestellt. Bei der chemischen Zusammensetzung der Regenproben sind SO_4^{2-} mit $8,1 \mu\text{eq L}^{-1}$ und H^+ mit $5,5 \mu\text{eq L}^{-1}$ die dominierenden Ionen. Es sind kaum Stickstoffverbindungen enthalten. NO_3^- ist nur mit $0,6 \mu\text{eq L}^{-1}$ und NH_4^+ gar nicht (für den Median) vertreten.

Tabelle 9: statistische Kenngrößen der chemischen Zusammensetzung der Regen-Proben. Angegebene Parameter: pH-Wert (pH), elektrische Leitfähigkeit (LF) [$\mu\text{S cm}^{-1}$], berechnete Leitfähigkeit (ber. LF) [$\mu\text{S cm}^{-1}$], Äquivalentkonzentrationen der Ionen [$\mu\text{eq L}^{-1}$]: Wasserstoff (H^+), Ammonium (NH_4^+), Kalium (K^+), Natrium (Na^+), Calcium (Ca^{2+}), Magnesium (Mg^{2+}), Chlorid (Cl^-), Nitrat (NO_3^-) und Sulfat (SO_4^{2-})

| n=11 | Median | Mittelwert | σ | Min | Max |
|--------------------|--------|------------|----------|------|------|
| pH | 5,26 | 5,11 | 0,31 | 4,54 | 5,61 |
| LF | 6 | 6 | 3 | 3 | 11 |
| ber. LF | 4 | 5 | 3 | 2 | 13 |
| H^+ | 5,5 | 7,7 | 7,5 | 2,5 | 28,8 |
| NH_4^+ | 0,0 | 3,6 | 11,5 | 0,0 | 38,3 |
| K^+ | 2,3 | 7,1 | 9,5 | 0,0 | 30,0 |
| Na^+ | 4,3 | 7,4 | 4,3 | 4,3 | 17,2 |
| Ca^{2+} | 5,0 | 6,8 | 2,9 | 3,5 | 11,5 |
| Mg^{2+} | 1,3 | 2,5 | 2,5 | 0,5 | 8,6 |
| Cl^- | 4,9 | 4,9 | 1,9 | 1,7 | 7,3 |
| NO_3^- | 0,6 | 1,8 | 2,4 | 0,4 | 8,4 |
| PO_4^{3-} | 2,4 | 4,4 | 7,5 | 0,0 | 25,9 |
| SO_4^{2-} | 8,1 | 7,4 | 4,9 | 1,5 | 14,8 |

Die Ionenbilanz ist für die Regenproben nicht vollständig ausgeglichen (Abbildung 23). Es sind median $2,4 \mu\text{eq L}^{-1}$ mehr Kationen vorhanden als Anionen. Die Gesamtäquivalentkonzentration beträgt $34,4 \mu\text{eq L}^{-1}$.

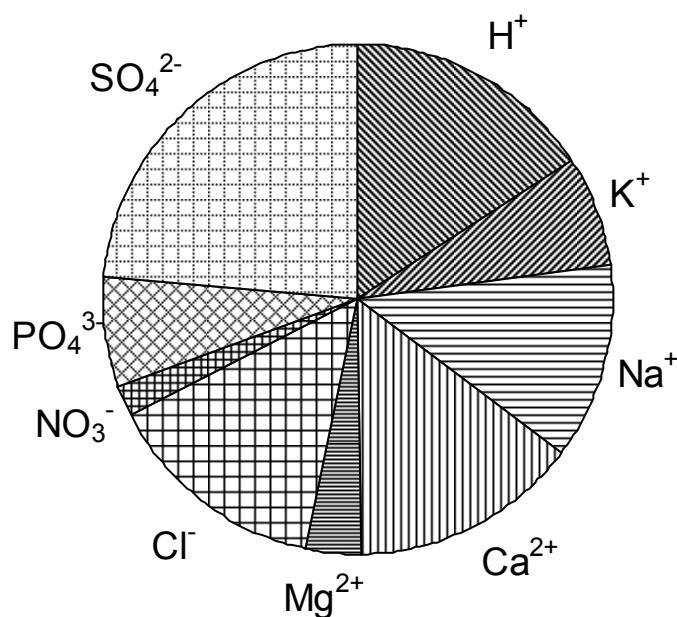


Abbildung 23: mediane Ionenzusammensetzung der Regenwasserproben (insgesamt $34,4 \mu\text{eq L}^{-1}$), gesammelt vom 3.11.2003 bis 10.2.2004, 11 Proben

Tabelle 10: Anteile an der Gesamtäquivalentkonzentration der medianen Zusammensetzung der Regenproben

| Ion | H ⁺ | NH ₄ ⁺ | K ⁺ | Na ⁺ | Ca ²⁺ | Mg ²⁺ | Cl ⁻ | NO ₃ ⁻ | SO ₄ ²⁻ | PO ₄ ³⁻ |
|--------|----------------|------------------------------|----------------|-----------------|------------------|------------------|-----------------|------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| Anteil | 16% | 0% | 7% | 13% | 14% | 4% | 14% | 2% | 23% | 7% |

4.3.4 QUALITÄTSPRÜFUNG FÜR REGENPROBEN

Zur Überprüfung der Messergebnisse wurde für jede Regenprobe durch Summierung der Anionen- und Kationenäquivalentsummen eine Ionenbilanz aufgestellt. In Abbildung 23 ist die mediane Ionenzusammensetzung der Regenproben dargestellt. Die Ionenbilanz ist nicht vollständig ausgeglichen. Die Kationen haben einen Anteil von 54 % und die Anionen einen Anteil von 46 % an der Äquivalentkonzentration. Es wurde aus der spezifischen Leitfähigkeit der Ionen die theoretische Leitfähigkeit berechnet (Abbildung 24). Die Linie zeigt das 1:1-Verhältnis an. Der Vergleich von berechneter und gemessener Leitfähigkeit bestätigt, dass bei der chemischen Analytik wahrscheinlich alle im Regenwasser vorhandenen Ionen bestimmt wurden. Für 3 von insgesamt 11 Regenproben sind die Werte identisch, für 2 Proben ist die berechnete Leitfähigkeit höher und für 6 Proben ist die gemessene Leitfähigkeit höher als die berechnete Leitfähigkeit. Die geringe Differenz der enthaltenen Anionen und Kationen von nur 2,4 µeq L⁻¹ zeigt, dass die geforderte Elektronenneutralität für wässrige Lösungen in den Regenproben auf Basis der gemessenen Ionen nahezu erfüllt ist.

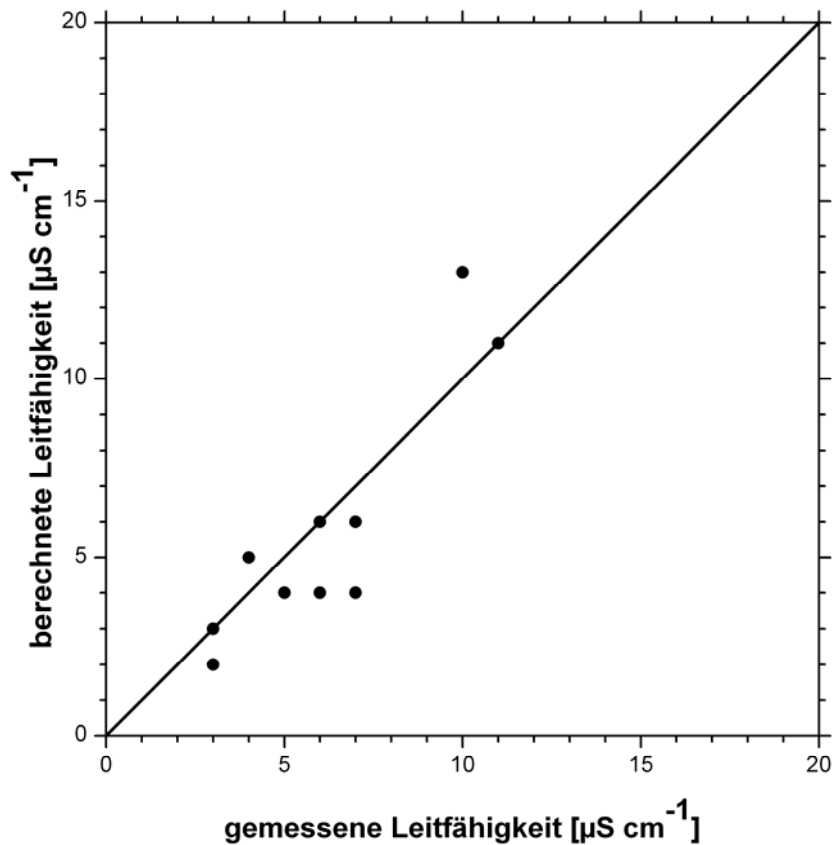


Abbildung 24: Vergleich der gemessenen und berechneten Leitfähigkeit der 11 Regenproben [$\mu\text{S cm}^{-1}$]

4.4 VERGLEICH DER CHEMISCHEN ZUSAMMENSETZUNG DER NEBEL- UND REGENPROBEN

Wie bereits in anderen Studien belegt, unterscheidet sich die chemische Zusammensetzung von Nebel und Regen in wesentlichen Punkten (SCHEMENAUER et al. 1995, BRIDGES et al. 2002). In den gesammelten Nebelwasserproben sind NH_4^+ , NO_3^- , und SO_4^{2-} die dominierenden Ionen. Die anderen gemessenen Ionen (K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- und PO_4^{3-}) sind nur in relativ geringen Konzentrationen enthalten. Im Regenwasser dagegen kommt kaum NH_4^+ vor und auch NO_3^- ist nur in geringen Konzentrationen vorhanden. SO_4^{2-} gehört auch im Regenwasser zu den dominierenden Ionen. Der Vergleich von gemessener und berechneter Leitfähigkeit und die Bilanzierung der enthaltenen Anionen und Kationen lässt die Vermutung zu, dass im Nebelwasser Ionen enthalten sind, die bei der chemischen Analytik nicht identifiziert wurden. Da die Ionenbilanz bis auf $2,4 \mu\text{eq L}^{-1}$ ausgeglichen ist und auch die berechnete Leitfähigkeit nahezu der gemessenen entspricht, scheinen dagegen im Regenwasser alle Ionen bestimmt worden zu sein, die die Ionenbilanz wesentlich beeinflussen.

Die Unterschiede der im Nebel- und Regenwasser enthaltenen Äquivalentkonzentrationen sind sehr deutlich. Die Gesamtäquivalentkonzentration der „Kontinent“-Proben ist $139 \mu\text{eq L}^{-1}$, die der „Pazifik“-Proben ist $111 \mu\text{eq L}^{-1}$ und die der Regenproben ist $34,4 \mu\text{eq L}^{-1}$. Diese Unterschiede kommen vor allem durch die wesentlich geringeren Konzentrationen der Ionen H^+ , NH_4^+ , NO_3^- und SO_4^{2-} im Regenwasser zustande. PO_4^{3-} ist das einzige Ion, das im Regen höher konzentriert vorkommt als im Nebel. Mögliche Ursachen für die höheren Ionenkonzentrationen des Nebels werden in Kapitel 5.5 diskutiert.

Die Probenahmen für Regenwasser fanden nicht wie beim Nebelwasser täglich sondern nur einmal wöchentlich statt. Da es sich um Mischproben von einer Woche handelt, können für Regen keine täglichen Konzentrationsschwankungen untersucht werden.

4.5 VERGLEICH VON ZWEI PASSIVEN NEBELSAMMLERN

In dem Zeitraum vom 11.11.2003 bis 07.01.2004 wurden die gefangenen Nebelwassermengen von zwei passiven Nebelsammlern mit einem Messzylinder gemessen. Die Volumenmessungen der gefangenen Nebelmengen fanden bis auf wenige Ausnahmen täglich und unmittelbar nacheinander statt. Bei den verwendeten Geräten handelt es sich um den oben beschriebenen zylindrischen Nebelfänger (CFC) und den Standardnebelfänger (SFC). Der CFC hat eine spezifische Auffangfläche von $0,10 \text{ m}^2$. Die Auffangfläche wurde berechnet als das Produkt aus Durchmesser und Höhe. Eine zu diskutierende Unsicherheit besteht allerdings darin, dass der Nebelsammler eigentlich zweimal auskämmt. In die Berechnung müsste also ein weiterer Faktor berücksichtigt werden. Der Faktor müsste zwischen 1 und 2 liegen, da beim Durchströmen von Nebel durch den hinteren Harfenkranz zusätzlich Nebel gesammelt wird. Diese Fangmenge ist jedoch geringer als die durch das erste Auskämmt erzielte Menge, so dass der Faktor nicht größer als 2 sein kann. Zur genauen Bestimmung dieses Faktors müssten der Flüssigwassergehalt des Nebels, die Tröpfchengrößenverteilung, die Dicke sowie die Anordnung der Fangharfen und die Windgeschwindigkeit beachtet werden. Die Berechnung der Auffangfläche als das Produkt aus Höhe und Umfang würde nicht die realen Verhältnisse wiedergeben, da durch die runde Form des Nebelfängers nur die der Windrichtung zugeneigte Harfenfläche den Nebel auskämmt. Es wurde daher die projizierte Auffangfläche berechnet. Die Harfen des CFC sind doppelreihig angeordnet. Die Auffangfläche ist zylindrisch, so dass der Sammler unabhängig von der Windrichtung ist. Der SFC hat eine quadratische

Auffangfläche von 1 m². Die Fangeffizienz dieses Nebelsammlers ist stark von der Windrichtung abhängig. Da der Wind im Untersuchungsgebiet hauptsächlich aus östlicher Richtung angeweht wird (siehe Kapitel 2.2.1), wurde er gegen die Hauptwindrichtung aufgestellt.

Um die beiden Nebelsammler miteinander vergleichen zu können, wurde die gesammelte Nebelmenge von mL in die auf die Sammelfläche bezogene Einheit mm umgerechnet. In den Zeiten vom 18. bis 20.12.2003, 23. bis 24.12.2003 und 2. bis 4.1.2004 war die deponierte Nebelmenge so hoch, dass die Aufnahmekapazität der jeweiligen Kanister erreicht wurde. Die Daten dieser Tage wurden bei der Auswertung daher nicht beachtet. Wie in Abbildung 25 zu sehen ist, entsprechen sich die beiden Nebelsammler im Verlauf.

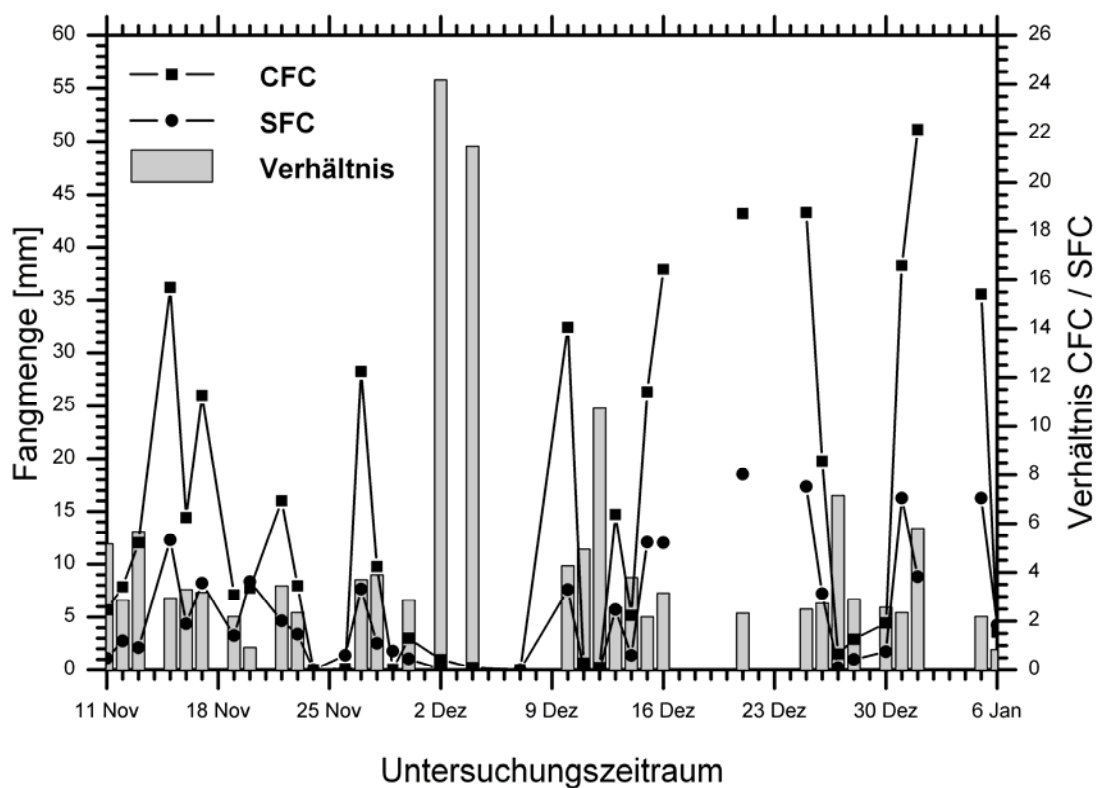


Abbildung 25: Vergleich der Fangmengen [mm] der Nebelfänger CFC und SFC während des Zeitraumes vom 11.11.2003 bis zum 6.1.2004

Der CFC fängt bis auf sehr wenige Ausnahmen relativ mehr als der SFC. Die Unterschiede in den Fangmengen sind umso größer, je kleiner die gesammelten Nebelmengen sind. Der CFC scheint insbesondere bei geringen Nebelmengen effizienter zu sammeln. Es ist möglich, dass kleine Nebelmengen beim SFC sofort wieder verdunsten und nicht bis in die Rinne des Sammlers oder in den Kanister laufen. Der SFC hat eine Höhe von 1 m, der CFC dagegen nur von 0,45 m, so dass die Tröpfchen beim SFC einen längeren Weg zurücklegen müssen bis sie

aufgefangen werden. Ein weiterer Grund könnte die Struktur der Auffangflächen sein. Der CFC besteht aus doppelreihig angeordneten Harfen, die weniger Widerstand bieten und an denen die Tröpfchen leichter ablaufen können. Die Querräden des Netzes vom SFC sorgen dafür, dass die Tropfen verlangsamt in den Fangbehälter geleitet werden. Bei großen Nebelmengen relativieren sich diese Nachteile und die Unterschiede in den Fangmengen werden kleiner.

In Abbildung 26 sind die vor Ort gemessenen absoluten Fangmengen [mL] der beiden Nebelsammler aufgetragen. Im Durchschnitt fängt der SFC 4,2-mal mehr Nebelwasser als der CFC.

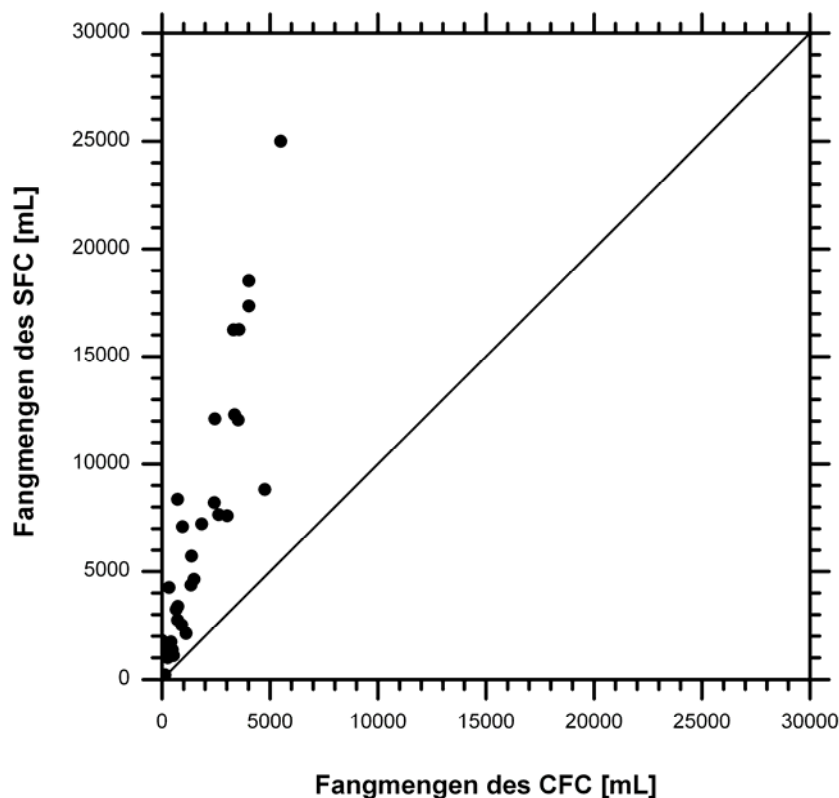


Abbildung 26: in der Zeit vom 11.11.2003 bis zum 6.01.2004 gefangene Nebelmengen [mL] der Nebelsammlern SFC und CFC, Fangmengen gegeneinander aufgetragen

Wie in Kapitel 2.2.1 beschrieben, wurden typische Windsituationen am Messort charakterisiert. Von den 74 betrachteten Tagen wurden 48 Tage der Windsituation I und 26 Tage der Windsituation 3 zugeordnet. Somit sind an der Klimastation „El Tiro“ hohe Windgeschwindigkeiten von im Mittel 7 m/s vorherrschend. Bei großen Nebelmengen, die im Untersuchungsgebiet mit hohen Windgeschwindigkeiten korreliert sind, verschiebt sich wie oben festgestellt das Verhältnis der Nebelfänger in Richtung SFC. Auch wenn beim direkten Vergleich der Fangmengen in mm der CFC dominiert, bietet der SFC wichtige Vorteile für die praktische Verwendung. Der SFC ist leicht selbst zu bauen und ist somit viel preiswerter als der CFC.

In dem betrachteten Zeitraum wurden insgesamt 95,6 L Nebelwasser mit dem CFC und 402,5 L mit dem SFC gesammelt. Die Brutto-Fangmengen sind beim SFC somit wesentlich höher als beim CFC. An Standorten mit einer hohen Nebelhäufigkeit und hohen Windgeschwindigkeiten ist der SFC besser geeignet große Nebelmengen zu sammeln.

Auch für die Anwendung bei den beschriebenen Entwicklungshilfeprojekten zur Trinkwassergewinnung ist der SFC wesentlich besser geeignet. Diese Projekte haben häufig nur ein geringes Budget zur Verfügung, so dass angefertigte Nebelfänger wie der CFC nicht finanzierbar sind. Solche Nebelsammelprojekte werden in der Regel an küstennahen oder exponierten Orten durchgeführt, so dass hohe Windgeschwindigkeiten dort sehr wahrscheinlich sind.

Die Effizienzen von unterschiedlichen Nebelsammlern werden in der Literatur viel diskutiert (HERING et al. 1987, SCHEMENAUER und CERECEDA 1994, CHERNIKOV und KHAIKINE 1998, CRUZAT 1998). Welcher Sammler am besten geeignet ist, hängt von den räumlichen Voraussetzungen und von der Zielsetzung ab. Will man den Eintrag von Nebel in die Vegetation simulieren, ist der Einsatz eines zylindrischen Nebelfängers besser geeignet. Die zylindrische Form ist gut mit Koniferenkronen korreliert und spiegelt somit die Impaktion naturnah wider. Die potentiellen Fangraten in unbewachsenen, wüstenähnlichen Berggegenden können anhand des SFC besser untersucht werden (SCHEMENAUER und CERECEDA 1994).

5 DISKUSSION

5.1 QUELLEN DER PROBENINHALTSSTOFFE

Nach MÖLLER (2003) wird zwischen natürlichen und anthropogenen Emissionsquellen unterschieden. Als natürliche Quellen werden biogene Quellen (Mikroorganismen im Boden, Organismen der Hydrosphäre, Vegetation und Tiere), geophysikalische Quellen (Bodenstaub und Seesalz) und geochemische Quellen (Vulkanismus, Biomasseverbrennung und Gewitter) genannt. Die wichtigsten anthropogenen Quellen sind nach MÖLLER (2003) ebenfalls die biogenen Quellen (Landwirtschaft), chemische Quellen (Verbrennung, Hochtemperaturprozesse und sonstige chemische Prozesse) sowie die physikalischen Quellen (Staubaufwirbelungen und Verflüchtigung). LESACK und MELACK (1991) unterscheiden nur drei potenzielle Quellen für die Stoffkonzentrationen im Niederschlagswasser (Langstreckentransport von Saharastäuben werden von den Betrachtungen ausgeschlossen): der Ozean (Seesalz), Verbrennung von Biomasse (Brandrodungsfeldbau) sowie der Eintrag von biogenen Partikeln und Gasen aus terrestrischen Ökosystemen durch konvektive Mischungsprozesse in der unteren Troposphäre. Beobachtungen im Gelände während der Messperiode von November 2003 bis Februar 2004 (Südsommer) liefern mögliche Erklärungen für das Anionen-Defizit in den untersuchten Nebelproben. Es traten wiederholt Brände mit starker Rauchentwicklung in der Nähe des Messortes auf. Besonders während der ecuadorianischen Trockenzeit findet vermehrt Brandrodung statt, um Regenwald in landwirtschaftlich oder baulich nutzbares Land umzuwandeln. Der Nutzungswandel von Wald in Weideland sowie andere Landnutzungsänderungen und die damit verbundene saisonale Biomasseverbrennung haben zu einer erhöhten Ionenzufuhr besonders in den Tropen geführt (CRUTZEN und ANDREAE 1990, GALLOWAY et al. 1994, KELLER et al. 1991). Biomasseverbrennungen finden häufig saisonal während der Trockenzeit oder auch während trockener Perioden statt. Besonders während der Trockenzeit können sich „verstärkt lokale Emissionen (Bodenstäube, Abfackeln von Gas, Mineralisation etc.) in der regionalen Dimension ausbreiten und auf der Akzeptoroberfläche ablagern, bevor sie ausgegnet bzw. abgewaschen werden“ (LANFER 2003). Während der Regenzeiten dagegen regnen sich lokale Emissionen schnell aus und es findet nur noch eingeschränkter Langstreckentransport statt (LANFER 2003).

In den Abgasen der Biomasseverbrennung sind unterschiedliche Konzentrationen organischer Verbindungen auf Basis von Kohlenstoff, Wasserstoff und Sauerstoff enthalten. Den mengenmäßig größten Anteil am organischen Gesamtgehalt haben die flüchtigen organischen Verbindungen (VOC) wie Propan und Methan. Es kommen jedoch auch flüssige oder feste organische Substanzen vor, die an Asche oder Rußteilchen adsorbiert sein können. Die bei Biomasseverbrennung entstehenden organischen Stoffe sind Produkte einer unvollständigen Verbrennung der polymeren Brennstoffbestandteile Cellulose, Polyosen und Lignin (LAUNHARDT 2002).

Neben organischen Verbindungen entstehen bei der Verbrennung von Biomasse auch anorganische Verbindungen. Bei Verbrennungsvorgängen entstehen Stickoxide (NO_x) als Verbindung zwischen dem Luftstickstoff und dem Sauerstoff. Die Bildung von Stickoxiden ist abhängig von der Verbrennungstemperatur. Durch Hitzeeinwirkung aus Luftstickstoff entstandenes NO_x wird thermisches NO_x genannt, während das aus den N-Verbindungen des Brennstoffes entstandene NO_x als Brennstoff- NO_x bezeichnet wird. Weitere anthropogene Quellen für Stickstoff sind N-Düngermittel und Sprengstoff. Ammonium wird natürlicherweise im Boden durch die Mineralisation von organisch gebundenem Stickstoff gebildet. Es entsteht bei dem Prozess der Ammonifizierung, dem aeroben mikrobiellen Abbau von organischen Stickstoffverbindungen. Ammonium ist im Grundwasser allerdings kaum anzutreffen, da es von Mikroorganismen zu Nitrat oxidiert wird (HÜTTER 1994). Bei der Nitrifikation wird von nitrifizierenden Bakterien wie *Nitrosomonas* Ammoniak zu Nitrit und von *Nitrobacter* Nitrit zu Nitrat oxidiert. Die Nitrifikation ist die Hauptquelle für den natürlichen Nitratgehalt des Bodens. Stickstoff- und Schwefelemissionen sind vor allem in Städten auf anthropogene Aktivitäten zurückzuführen und stammen von Gebäudeheizung, Gewerbe, Industrie und Kraftfahrzeugen. Die wichtigste natürliche Quelle für Schwefeloxide ist das Meer, aber auch die Verbrennung fossiler Brennstoffe, Bodestäube, vulkanische Gase und Abrasion sind bedeutende Emittenten. Durch die Aktivität der schwefeloxidierender Bakterien wie *Thiobacillus* wird aus elementarem Schwefel, Wasser und Sauerstoff ebenfalls Sulfat gebildet (NULTSCH 1996). Für die Seesalze Kalium, Natrium und Chlorid ist der 100 bis 150 km entfernte Pazifik eine sehr wichtige Quelle. Die Hauptquellen für Kalium sind nach LANFER 2003 der Brandrohdungsfeldbau, Bodestäube und biogenetische Einträge. Für Phosphor ist ebenfalls die Biomasseverbrennung die wichtigste Quelle (LANFER 2003). Die Fluoridemissionen stammen hauptsächlich aus Industrie und Hausbrand. Die untersuchten Elemente besitzen mehrere Quellgebiete, es können hier nur Hinweise auf mögliche, für diese Arbeit relevante

Quellen gegeben werden. Nähere Angaben sind in Literatur zur Elementzusammensetzung der atmosphärischen Deposition zu finden.

5.2 HERKUNFTSBESTIMMUNG

Im Rahmen dieser Arbeit wurde die Herkunft der gesammelten Nebelproben anhand von Rückwärtstrajektorien berechnet und auf dieser Grundlage in „Kontinent“- und „Pazifik“-Proben eingeteilt. In beiden Klassen sind die Stickstoffverbindungen (Ammonium und Nitrat), Sulfat und Wasserstoffionen die dominanten Ionen. Diese Ionen bzw. deren Vorläufersubstanzen (NO_x , NH_3 , SO_2 etc.) werden anthropogen emittiert oder stammen aus natürlichen Quellen. Anthropogen emittiert weisen sie auf den Einfluss von Industrie, Abgasen aus dem Straßenverkehr oder sonstige Verbrennungsprozesse hin.

Die geringen Unterschiede in der chemischen Zusammensetzung zwischen den „Kontinent“-Proben und den „Pazifik“-Proben sind wie oben beschrieben nicht statistisch signifikant. Bei genauer Betrachtung der Einzelwerte sind jedoch Unterschiede zwischen den „Kontinent“- und „Pazifik“-Proben erkennbar. Wie in Kapitel 4.2.6 erläutert, enthalten die „Kontinent“-Proben median höhere Konzentrationen an H^+ , K^+ , Na^+ , Mg^{2+} , Cl^- und NO_3^- . Dabei sind die Unterschiede bei H^+ und NO_3^- am größten. Die Äquivalentkonzentrationen von Sulfat und Ammonium sind jedoch bei den „Pazifik“-Proben median höher als bei den „Kontinent“-Proben. Da für Sulfat das Meer die wichtigste natürliche Emissionsquelle darstellt, könnten diese erhöhten Werte auf maritimen Einfluss hindeuten.

Für die Ionen Na^+ , Mg^{2+} , Cl^- , die ebenfalls vom Meer als natürliche Quelle emittiert werden, sind die medianen Äquivalentkonzentrationen etwa gleich hoch. Der kontinentale bzw. maritime Charakter der Nebelproben ist daher nicht eindeutig festzustellen.

Es gibt verschiedene Ursachen dafür, dass sich die Proben der beiden Klassen nicht wie vermutet signifikant unterscheiden. Zum einen könnten die „Pazifik“-Proben während des Überströmens der größeren küstennahen Städte wie Piura (Peru), Guayaquil (Ecuador) und Talara (Ecuador) Partikel aufgenommen haben. An der Pazifikküste, etwa 100 bis 150 km entfernt vom Untersuchungsgebiet, sind Industriestandorte (Chemie, Kunststoffe, Erdgas, Erdöl) (WESTERMANN SCHULBUCH-VERLAG 2002) ansässig, die eine Verschmutzung der Proben bewirkt haben könnten. Die Provinzhauptstadt Loja befindet sich nur 10 km westlich vom Messort entfernt, so dass ein anthropogener Einfluss auf den als „Pazifik“-Nebel identi-

fizierten Nebel sehr wahrscheinlich ist. In diesem Fall wären die eigentlich marinen Luftmassen sekundär kontaminiert worden.

Das verwendete HYSPLIT-Trajektorienmodell kann bei einer horizontalen Auflösung von 191 km die Höhen der Anden und die Entfernung zum Pazifik nur annähernd wiedergeben. Es ist daher möglich, dass die laut Trajektorie nahe der Pazifikküste verlaufenden „Pazifik“-Proben zeitweise auch den Kontinent überströmen, dies allerdings aufgrund der ungenauen Auflösung nicht deutlich wird.

Es besteht zudem die Möglichkeit, dass es sich bei den „Pazifik“-Proben nicht um marinen, sondern ebenfalls um kontinental geprägten Nebel handelt. Dieser Nebel wäre dann nur temporär, dem Verlauf der Trajektorie folgend, über den Pazifik advehiert worden. Die 120-Stunden Rückwärtstrajektorien liefern darüber keine Auskunft. Um zu überprüfen, ob die Luftmassen über den Kontinent geströmt sind, müssten Trajektorien berechnet werden, die weiter als 120 Stunden zurück reichen. Dabei verliert das Model jedoch an Genauigkeit.

Der im Rahmen dieser Arbeit gewählte Messort „El Tiro“ ist nicht optimal geeignet, um die Unterschiede zwischen „Kontinent“- und „Pazifik“-Proben zu messen. Es müsste ein anderer Standort gewählt werden, um den Einfluss der Advektionsrichtung auf die chemische Zusammensetzung von Nebel zu untersuchen. Für Messungen dieser Art wäre ein Standort in unmittelbarer Nähe zum Pazifik ideal, der sowohl maritim als auch kontinental geprägt ist, wo sich jedoch keine größeren Städte in der Anströmrichtung der vom Meer beeinflussten Trajektorie befinden.

5.3 QUALITÄT DER MESSERGEBNISSE

Als Plausibilitätskontrolle der Messergebnisse ist für alle Nebel- und Regenproben eine Ionenbilanz der enthaltenen Anionen- und Kationenäquivalenzkonzentrationen erstellt und die elektrische Leitfähigkeit berechnet worden. Die unausgeglichene Ionenbilanz und die Werte der berechneten Leitfähigkeit besonders für Nebelwasser könnten darin begründet sein, dass die gemessenen Ionenkonzentrationen teilweise sehr nah an der Bestimmungsgrenze liegen. Beide Qualitätsprüfungen weisen jedoch auf die Anwesenheit von mindestens einem bei der chemischen Analytik nicht bestimmten Ions hin. Da für die Aufstellung der Ionenbilanz nur die gemessenen Hauptionen (NH_4^+ , K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , NO_3^- , PO_4^{3-} und SO_4^{2-}) berücksichtigt werden, ist die Ionenbilanz von Wasseranalysen häufig nicht ausgeglichen. Wie bereits in anderen Studien belegt (GORDON et al. 1994), weisen höher konzentrierte Proben (Nebel) häufig schlechtere Ionenbilanzen auf als Proben mit geringen Ionenkonzentrationen (Regen).

Der Überschuss an Kationen kann auch darin begründet sein, dass im Rahmen dieser Arbeit kein Hydrogenkarbonat (HCO_3^-) bestimmt wurde. SCHEMENAUER und CERECEDA (1992) fanden heraus, dass HCO_3^- besonders in tropischem Nebel ein wichtiges Anion ist. Das Gleichgewicht der anorganischen Kohlenstoffkomponenten im Nebel- bzw. Regenwasser ist vom pH-Wert abhängig. Bei einem pH-Wert von $< 4,3$ ist im Wasser lediglich gelöstes CO_2 mit wenig HCO_3^- vorhanden, während bei pH-Werten $> 4,3$ der Anteil von HCO_3^- ansteigt. Das Maximum liegt bei pH 8,2. Verbinden sich CO_2 und H_2O , entsteht H_2CO_3 (Kohlensäure).

Die Messungen mit dem Ionenchromatograph im Labor des Instituts für Landschaftsökologie zeigen bei einem großen Teil der Proben deutliche Peaks für Acetat und Fluorid (Abbildung 27, Peak 1 entspricht Acetat und Peak 2 Fluorid). Zum Zeitpunkt der Laboranalysen standen jedoch keine Standards zur Verfügung, so dass die enthaltenen Mengen nicht quantifiziert werden konnten. Nach HÜTTER (1994) entstehen Anionen-Defizite bei Regen- und Nebelwasser häufig auch dadurch, dass organische Säuren wie Huminsäure, Ameisensäure und Essigsäure messtechnisch nicht erfasst werden. Bei genauerer Analyse wären diesbezüglich exaktere Aussagen möglich. Hinweise auf die Anwesenheit von organischen Säuren ergeben sich aus erhöhten Werten der UV-Absorption, aus dem DOC-Gehalt (gelöster organisch gebundener Kohlenstoff) und aus Analysen mittels Ionenchromatographie.

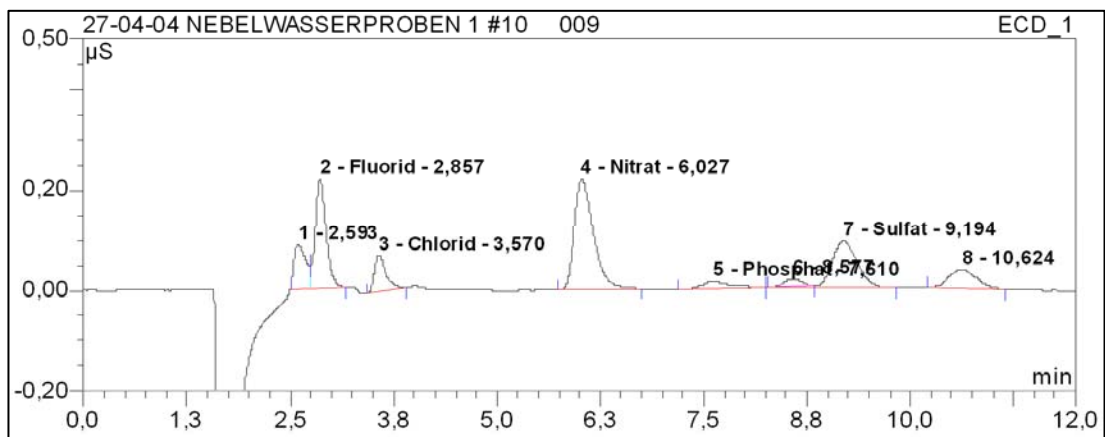


Abbildung 27: Beispiel für Peaks der Messungen mit dem Ionenchromatographen (für Probe 19)

5.4 ZUSAMMENHANG ZWISCHEN WINDSITUATION UND ART DER PROBE

Zur weiteren Charakterisierung der Nebelproben wurde der Zusammenhang zwischen der Art der Probe und der Windsituation untersucht. Da die meteorologischen Daten für die Zeit vom 3.11.2003 bis zum 15.1.2004 zur Verfügung standen, kann lediglich dieser Zeitraum betrachtet werden. In dieser Zeit wurden insgesamt 46 Nebelproben gefangen. Davon wurden 35 Proben während der Windsituation I und 11 Proben während der Windsituation II gesammelt. Während der streng definierten Windsituation I wurden bis auf 3 Ausnahmen ausschließlich „Kontinent“-Proben identifiziert. Die während der Windsituation II gesammelten Nebelproben zeigen die gleiche vermutete Tendenz, jedoch ist diese nicht ganz so eindeutig. Von den 11 Proben der Windsituation II wurden 6 Proben den „Pazifik“-Proben und 5 „Kontinent“-Proben zugeordnet. Dieses Verhältnis spiegelt das Ergebnis der Rückwärtstrajektorien wider, denn Windsituation I ist geprägt durch östliche Wind und Windsituation II durch westliche Winde. Auffällig ist allerdings, dass die von den Nebelsammlern gefangenen Wassermengen je nach vorherrschender Windrichtung sehr unterschiedlich sind. Für die Windsituation I ist der Mittelwert der gefangenen Nebelmengen 2867,4 mL, wobei hier zu beachten ist, dass an 8 Tagen das Auffangvolumen überschritten war und daher nur das maximale Fangvolumen von 5500 mL angenommen wurde. Eigentlich müssten die Werte noch höher liegen. Für die Windsituation II ist der Mittelwert der gefangenen Nebelmengen 322,3 mL. Damit wird die auf Grundlage der meteorologischen Daten geäußerte Hypothese bestätigt, dass es bei herrschender Windsituation I wesentlich nebeliger ist als bei Windsituation II. Für den Vergleich der Windgeschwindigkeiten wurden die an der meteorologischen Station „El Tiro“ aufgezeichneten Stundenwerte für die kompletten Tage der Probenahmen addiert. Der Mittelwert der Windgeschwindigkeiten von Windsituation I ist 7 m/s und von Windsituation II ist 2 m/s. Die großen Nebelmengen während der Windsituation I werden auf die hohen Windgeschwindigkeiten zurückgeführt. Die Luftmassen werden außerdem aus dem Amazonasgebiet ins Untersuchungsgebiet advehiert, so dass sie relativ warm und feuchtigkeitsgesättigt sind. Die Luftmassen werden an der Ostabdachung der Anden zum Aufstieg gezwungen, wodurch sie adiabatisch abkühlen und sich Nebel bildet. Die im Vergleich dazu geringeren Nebelmengen bei Windsituation II werden vor allem darauf zurückgeführt, dass die aus westlicher Richtung vom Pazifik herangewehten Luftmassen wesentlich kälter sind. Die Wasseraufnahmekapazität der kälteren Luft ist geringer, so dass die spezifische Feuchte niedriger ist und bei Kondensation weniger Nebel entsteht.

Es besteht damit ein sehr enger Zusammenhang zwischen der herrschenden Windsituation und dem Charakter der Nebelprobe. Die „Kontinent“-Proben werden der Windsituation I und die „Pazifik“-Proben der Windsituation II zugeordnet. Dieser Zusammenhang könnte noch deutlicher belegt werden, wenn die meteorologischen Daten bis zum Ende des Untersuchungszeitraumes vorlägen. Alle Nebelproben, die nach dem 15.01.2004 gesammelt wurden, wurden nämlich als „Kontinent“-Proben klassifiziert. Dies ist zum Zeitpunkt dieser Arbeit jedoch nicht der Fall. Durch die hohen Nebelmengen bei Windsituation I findet eine Verdünnung der Ionenkonzentration statt. Bei den „Kontinent“-Proben ist daher ein Verdünnungseffekt sehr wahrscheinlich. Um die Unterschiede der Ionenkonzentrationen von den „Kontinent“- und „Pazifik“-Proben besser miteinander vergleichen zu können, wäre die Bestimmung des Flüssigwassergehaltes sehr sinnvoll.

5.5 VERGLEICH VON NEBEL- UND REGENWASSER

Die Probenahmen von Regenwasser erfolgten einmal wöchentlich, während die Probenahmen von Nebel bis auf wenige Ausnahmen täglich stattfanden. Bei den Regenproben ist daher ein leichter Vermischungseffekt wahrscheinlich und es können auch keine täglichen Konzentrationsänderungen verglichen werden.

Die Nebelwasserproben weisen eine heterogenere chemische Zusammensetzung auf als die Regenwasserproben. Die Minima und Maxima der Ionenkonzentrationen, des pH-Wertes und der elektrischen Leitfähigkeit liegen weiter auseinander. Die spezifische chemische Zusammensetzung wird maßgeblich beeinflusst durch die unterschiedliche Belastung der Luftmassen bezüglich ihrer Schadstoffbelastung, durch Unterschiede in der großräumigen Transportcharakteristik sowie durch Unterschiede im wolkendynamischen und mikrophysikalischen Verhalten der Luftpakete (MÖLLER 2003).

Die hohen Stickstoffkonzentrationen im Nebel werden auf anthropogene Emissionen wie Biomasseverbrennung, Industrie und Kraftfahrzeugverkehr zurückgeführt. Nebel ist ein bodennahes Aerosol und repräsentiert die bodennahen Luftschichten. Nebel wird nicht wie Regen aus der Höhe deponiert, sondern entsteht in den unteren Schichten der Troposphäre und ist eng verbunden mit advektiven Transportprozessen (BRIDGES et al. 2002). Regen repräsentiert höhere Luftschichten, in denen natürlicherweise weniger anthropogene Verschmutzungen auftreten (BRIDGES et al. 2002). Regen ist daher weniger kontaminiert, was man an den gemessenen pH-Werten von 5,26 als Medianwert sehen kann. Ein Regentropfen, der aufgrund der Gravitation zur Erdoberfläche fällt, entfernt während des Fallens

durch Sorption und Anlagerung gasförmige Spurenstoffe und Aerosolpartikel aus der Luft. Diesen Prozess nennt man *sub-cloud-scavening*, da er das Entfernen von Gasen und Partikeln unterhalb der Wolkengrenze bezeichnet. Der Prozess des *in-cloud-scavening* dagegen beschreibt den Vorgang der Aufnahme von Gasen und Partikeln während der Tropfenbildung (heterogene Nukleation) und durch Sorption aus der Gasphase innerhalb der Wolkenschicht (MÖLLER 2003). Ein 50 mg schwerer und aus 50 m Höhe fallender Regentropfen kann 16,3 l Luft auswaschen (HÜTTER 1994) und „reinigt“ die Luft auf diese Weise. Da die Luft in der Höhe weniger kontaminiert ist als die bodennahen Luftschichten, kommen diese Unterschiede in der chemischen Zusammensetzung zwischen Nebel- und Regenwasser zustande.

Die genaue Höhe der Wolkenuntergrenze konnte im Gelände nicht bestimmt werden. Der Messort lag jedoch sehr häufig komplett in den Wolken. Niedrige Wolken sowie die Wolkenbasis weisen höhere Ionenkonzentrationen auf, da mehr anthropogene Luftschadstoffe enthalten sind (IGAWA et al. 2002). Ein weiterer Grund für die niedrigeren pH-Werte im Nebel ist auch die geringere Größe der Nebeltröpfchen. Viele kleine Nebeltröpfchen filtern Partikel effizienter aus als wenige große Regentropfen. Die kleinen Nebeltröpfchen besitzen zudem ein größeres Oberfläche-zu-Volumen-Verhältnis, so dass im Nebel relativ gesehen mehr Stoffe gelöst sein können (SCHATZMANN 1999).

Die Ergebnisse dieser Arbeit bezüglich der Konzentrationsunterschiede zwischen Nebel und Regen entsprechen den Beobachtungen anderer Untersuchungen, in denen Nebel als Eintragungspfad saurer Deposition bezeichnet wird (SCHEMENAUER et al. 1995, BEAUCHAMP et al. 1998, INGLIS et al. 1998, BRIDGES 2002).

5.5.1 BEURTEILUNG DER WASSERQUALITÄT

Nebel wird an vielen Standorten als ergänzende Wasserressource für die Landwirtschaft, für den Hausgebrauch und sogar als Trinkwasser gesammelt. Die Ergebnisse der chemischen Analyse des Nebelwassers wurden mit der in Deutschland rechtskräftigen Trinkwasserverordnung (BUNDESMINISTERIUM FÜR VERBRAUCHERSCHUTZ, ERNÄHRUNG UND LANDWIRTSCHAFT 2001) verglichen. Durch die Trinkwasserverordnung soll die menschliche Gesundheit vor Schaden durch verunreinigtes Trinkwasser geschützt werden. In der Tabelle 11 sind die Kenngrößen und Grenzwerte zur Beurteilung der Beschaffenheit von Trinkwasser für die im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Parameter zusammengefasst dargestellt.

Tabelle 11: Kenngrößen und Grenzwerte zur Beurteilung der Beschaffenheit des Trinkwassers (Quelle: verändert nach Trinkwasserverordnung des BUNDESMINISTERIUMS FÜR VERBRAUCHERSCHUTZ, ERNÄHRUNG UND LANDWIRTSCHAFT)

| Parameter | Grenzwert |
|------------------|----------------------------|
| pH-Wert | > 6,5 und < 9,5 |
| Leitfähigkeit | 2000 $\mu\text{S cm}^{-1}$ |
| Ammonium | 0,5 mg/L |
| Calcium | 400 mg/L |
| Chlorid | 250 mg/L |
| Kalium | 12 mg/L |
| Magnesium | 50 mg/L |
| Nitrat | 50 mg/L |
| Natrium | 150 mg/L |
| Phosphor | 6,7 mg/L |
| Sulfat | 240 mg/L |

Das im Rahmen dieser Arbeit gesammelte Nebelwasser erfüllt nicht bei allen Parametern die Grenzwerte der Trinkwasserverordnung des Bundesministeriums für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft. Alle gemessenen pH-Werte liegen unter 6,5 und sind somit zu sauer, um als Trinkwasser verwendet zu werden. Die Ammonium-Konzentration ist ebenfalls zu hoch. Der Median für Ammonium ist 0,55 mg/L bei den „Kontinent“-Proben und 0,65 mg/L bei den „Pazifik“-Proben (unbereinigter Datensatz). Die Konzentrationen der anderen gemessenen Ionen sowie die elektrische Leitfähigkeit erfüllen die Grenzwerte der Trinkwasserverordnung. Bei der vorliegenden chemischen Zusammensetzung müsste abgewogen werden, ob der Schaden, der durch Wassermangel entsteht größer ist als die Wirkung, die durch gesundheitsgefährdende Ionenkonzentrationen auftreten könnte. Der pH-Wert könnte durch die Zugabe von entsprechend leicht basischer Lösungen neutralisiert werden. Verunreinigtes Nebelwasser könnten mit Hilfe von Keramikfiltern gesäubert und dadurch zu Trinkwasser aufbereitet werden.

6 AUSBLICK

Zur Realisierung dieser Arbeit standen nur wenige Messgeräte zur Verfügung. Zur exakteren luftchemischen Untersuchung und zur Überprüfung der Aussagen dieser Arbeit sind weitergehende Messungen erforderlich. Der Einfluss des Flüssigwassergehaltes auf die Konzentrationsunterschiede zwischen „Kontinent“- und „Pazifik“-Proben wurde zwar diskutiert, konnte aber nicht untersucht werden. Informationen über den Flüssigwassergehalt (LWC), zur Tröpfchengrößenverteilung, über die Dauer und die jahreszeitliche Verteilung der Nebelereignisse sowie zur Höhe der Wolkenuntergrenze sind notwendig, um wissenschaftlich gesicherte Ergebnisse zu erhalten. Die Messgeräte standen bei der Realisierung dieser Arbeit nicht zur Verfügung. Die Ergebnisse dieser Arbeit geben lediglich Hinweise und sollen Zusammenhänge darstellen.

Eine weitergehende chemische Analyse würde Informationen liefern, ob und welche organische Säuren im Nebel- bzw. Regenwasser enthalten sind. Isotopenanalysen könnten genaue Hinweise auf die Herkunft der Probeninhaltsstoffe geben. Solche Isotopenanalysen werden bereits von der AG Fabian der Technischen Universität München geplant und sollen auf dem Stationsgelände der Estación Científica San Francisco durchgeführt werden. Informationen über die im Untersuchungsgebiet herrschenden Stoffflüsse würden mikrometeorologische Messungen mit der Eddy-Kovarianz-Methode liefern.

Die Messungen fanden während der ecuadorianischen Trockenzeit statt. In diesem Zeitraum wird vermehrt Biomasse verbrannt, so dass während dieser Zeit die Ionenkonzentrationen höher sind als während der Regenzeit. Um diese These zu belegen und die saisonalen Unterschiede festzustellen, wären Probenahmen während der Regenzeit interessant.

7 LITERATUR

- BALSLEV, H., VALENCIA, R., PAZ Y MIÑO, G., CHRISTENSEN, H. und NIELSEN, I. (1998): Species count of vascular plants in one hectare of humid lowland forest in Amazonian Ecuador. In: DALLMEIER, F. und COMISEKY, J. A. (eds.): Forest biodiversity in North, Central, and South America, and the Carribbean. Paris.
- BACHMANN, M. und BENDIX, J. (1993): Nebel im Alpenraum - eine Untersuchung mit Hilfe digitaler Wettersatellitendaten. *Bonner Geographische Abhandlungen* **86**, Bonn.
- BARTHLOTT, W., LAUER, W. und PLACKE, A. (1996): Global distribution of species diversity in vascular plants: towards a world map of phytodiversity. *Erdkunde* **50**, 317-327.
- BEAUCHAMP, S., TORDON, R. und PINETTE, A. (1998): Chemistry and deposition of Acidifying substances by marine advection fog in Atlantic Canada. *First International Conference on Fog and Fog Collection, Vancouver (Canada)*: 19. – 24. Juli 1998, 171-174.
- BECK, E. und MÜLLER-HOHENSTEIN, K. (2001): Analysis of undisturbed and disturbed tropical montain forest ecosystems in Southern Ecuador. *Die Erde* **132**, 1-8.
- BENDIX, J. und LAUER, W. (1992): Die Niederschlagszeiten in Ecuador und ihre klimadynamische Interpretation. *Erdkunde* **46**, 118-133.
- BENDIX J. (2002): A satellite-based climatology of fog and low-level stratus in Germany and adjacent areas. *Atmospheric Research* **64**, 3-18.
- BRIDGES, K. S., JICKELLS, T. D., DAVIES, T. D., ZEMAN, Z. und HUNOVA, I. (2002): Aerosol, precipitation and cloud water chemistry observations on the Czech Krusne Hory plateau adjacent to a heavily industrialised valley. *Atmospheric Environment* **36**, 353-360.
- BUNDESMINISTERIUM FÜR VERBRAUCHERSCHUTZ, ERNÄHRUNG UND LANDWIRTSCHAFT (2001): Verordnung über die Qualität von Wasser für den menschlichen Gebrauch. <http://bundesrecht.juris.de> (abgerufen am 1.7.2004).
- BURKARD, R., EUGSTER, W., WRZESINSKY, T. und KLEMM, O. (2002): Vertical divergence of fogwater fluxes above a spruce forest. *Atmospheric Research* **64**, 133-145.
- BUSCH, P. und KUTTLER, W. (1990): Grundriss Allgemeine Geographie, Klimatologie. Ferdinand Schöningh Paderborn, München, Wien, Zürich, 2. Auflage, 96 S.
- BUSSMANN, R. W. (2001): The montane forest of Reserva Biológica San Francisco (Zamora-Chinchipe, Ecuador). *Die Erde* **132**, 9-25.

- CAMERON, C. S., MURRAY, D. L., FAHEY, B. D., JACKSON, R. M., KELLIHER, F. M. und FISHER, G. W. (1997): Fog deposition in tall tussock grassland, South Island, New Zealand. *Journal of Hydrology* **193**, 363-376.
- CERECEDA, P. und SCHEMENAUER R. S. (1991): The Occurrence of Fog in Chile. *Journal of Applied Meteorology* **30**, 1097-1105.
- CHERNIKOV, A. A. und KHAIKINE, M. N: (1998): Enhancement of fog-water collector efficiency. *First International Conference on Fog and Fog Collection*, Vancouver (Canada): 19. – 24. Juli, 141-143.
- CLARK, K. L., NADKARNI, N. M.; SCHÄFER, D. und GHOLZ, H. L. (1998): Atmospheric deposition and net retention of ions by canopy in a tropical montane forest, Monteverde, Costa Rica. *Journal of Tropical Ecology* **14**, 27-45.
- COLLETT, L. C. JR., BATOR, A., SHERMAN, D. E., MOORE, K. F., HOAG, K. J., DEMOZ, B. B., RAO, X. und REILLY J. E. (2002): The chemical composition of fogs and intercepted clouds in the United States. *Atmospheric Research* **64**, 29-40.
- CRUZAT, A. (1998): Design, Construction and operation system of a fog water collector. *First International Conference on Fog and Fog Collection*, Vancouver (Canada): 19. – 24. Juli, 137-140.
- D' ANS, J. und LAX, E. (1992): Taschenbuch für Chemiker und Physiker. Berlin, Springer, 768 S.
- DAWSON, T. E. (1998): Fog in the California redwood forest: ecosystem inputs and use by plants. *Oecologia* **117**, 476-485.
- DRAXLER, R.R. und ROLPH, G.D. (2003): HYSPLIT (HYbrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) Model access via NOAA ARL READY Website (<http://www.arl.noaa.gov/ready/hysplit4.html>). NOAA Air Resources Laboratory, Silver Spring, MD.
- ECKARDT, F. D. und SCHEMENAUER, R. S. (1998): Fog water chemistry in the Namib Desert, Namibia. *Atmospheric Environment* **32**, 2595-2599.
- EDWARDS, M., CERECEDA, P. und SCHEMENAUER, R. (2001): Community involvement in the fog-water collection system for Chungungo, Chile. *Second International Conference on Fog and Fog Collection*, St. John's (Canada): 15. – 20. Juli 2001, 277-279.
- EASTERN ILLINOIS UNIVERSITY: <http://www.eiu.edu> (abgerufen am 15.07.2004)
- ELIAS, V., TESAR, M. und BUCHTELE, J. (1995): Occult precipitation: sampling, chemical analysis und process modelling in the Samava Mts. (Czech Republic) and in the Taunus Mts. (Germany). *Journal of Hydrology* **166**, 409-420.

- FISAK, J., TESAR, M., REZACOVA, D., ELIAS, V., WEIGNEROVA, V. und FOTTOVA, D. (2002): Pollutant concentrations in fog and low cloud water at selected sites of the Czech Republic. *Atmospheric Research* **64**, 75-87.
- FITTKAU, E. J. (1989): Zur Ökologie tropischer Regenwälder. *Gesellschaft für ökologische Forschungen*. Amazonien: Ein Lebensraum wird zerstört. München, Raben Verlag.
- FORKEL, M. (2004): Internet: <http://www.m-forkel.de> (abgerufen am 14.6.2004)
- FREY, W. und LÖSCH, R. (2004): Lehrbuch der Geobotanik. Spektrum Akademischer Verlag, 528 S.
- GORDON, C. A., HERRERA, R. und HUTCHINSON, T. C. (1994): Studies of fog events at two cloud forests near Caracas, Venezuela – II. Chemistry of fog. *Atmospheric Environment* **28**, 323-337.
- GRÖSCHEL, M. (2001): Hölzgewächse im abiotischen Gradienten. *Diplomarbeit*. Institut für Botanik, Universität Hohenheim.
- GUNDEL, L. A.; BENNER, W. H. und HANSEN, A. D. A. (1994): Chemical composition of fog water and interstitial aerosol in Berkeley, California. *Atmospheric Environment* **28**, 2715-2725.
- HÄCKEL, H. (1999). Meteorologie. Stuttgart, 4.Auflage.
- HAGEDORN, A. (2001): Extent and significance of soil erosion in southern Ecuador. *Die Erde* **132**, 75-92.
- HALLBERG, A., WOBROCK, W., FLOSSMANN, A. I., BOWER, K. N., NOONE, K. J., WIEDENSOHLER, A., HANSSON, H.-C., WENDISCH, M., BERNER, A., KRUISZ, C., LAJ, P., FACCHINI, M. C., FUZZI, S. und ARENDS, B. G. (1997): Microphysics of clouds: model vs. measurements. *Atmospheric Environment* **31**, 2453-2462.
- HAMILTON, L., JUVIK, J. und SCATENA, F. (1995): The Puerto Rico tropical cloud forest symposium: Introduction and workshop synthesis. *Ecological Studies* **110**, 1-19.
- HERCKES, P., WORTHAM, H., MILLET, M. und MIRABEL, P. (1998): Comparison of fogwater composition collected at 3 different sites. *First International Conference on Fog and Fog Collection*, Vancouver (Canada): 19. – 24. Juli, 13-16.
- HERCKES, P., WORTHAM, H., MIRABEL, P. und MILLET, M. (2002): Evolution of the fogwater composition in Strasbourg (France) from 1990 to 1999. *Atmospheric Research* **64**, 53-62.
- HERING, S. V., BLUMENTHAL, D. L., BREWER, R. L., GERTLER, A., HOFFMANN, M., KADLECEK, J. A. und PETTUS, K. (1987): Field intercomparison of five types of fogwater collectors. *Environmental Science and Technology* **21**, 654-663.

- HOAG, K. J., JEFFREY, L. J. JR. und PANDIS, S. N. (1999): The influence of drop size-dependent fog chemistry on aerosol processing by San Joaquin Valley fogs. *Atmospheric Environment* **33**, 4817-4832.
- HOLDER, C. D. (2004): Rainfall interception and fog precipitation in a tropical montane cloud forest of Guatemala. *Forest Ecology and Management* **190**, 373-384.
- HUTLEY, L. B., DOLEY, D., YATES, D. J. und BOONSANER, A. (1997): Water balance of an Australian Subtropical Rainforest at altitude: the ecological and physiological significance of intercepted cloud and fog. *Australian Journal of Botany* **45**, 311-329.
- HÜTTER, L. A. (1994). Wasser und Wasseruntersuchung: Methodik, Theorie und Praxis chemischer, chemisch- physikalischer, biologischer und bakteriologischer Untersuchungsverfahren. Laborbücher Chemie. Salle und Sauerländer, 6. Auflage, 515 S.
- IGAWA, M., TSUTSUMI, T. M. und HIROSHI, O. (1998): Fogwater chemistry at a mountainside forest and the estimation of the air pollutant deposition via fog droplets based on the atmospheric quality at the mountain base. *Environmental Science & Technology* **32**, 1566-1572.
- IGAWA, M., MATSUMURA, K. und OKOCHI, H. (2002): High frequency and large deposition of acid fog on high elevation forest. *Environmental Science & Technology* **36**, 1-6.
- INGLIS, D., GALLAGHER, M W. und CHOULARTON, T. W. (1998): Base cation and acidic deposition by fog, rain and aerosol at a UK coastal site. *First International Conference on Fog and Fog Collection*, Vancouver (Canada): 19. – 24. Juli, 161-162.
- KELLER, M., JACOB, D. J., WOFYSY, S. C. und HARRIS, R. C. (1991): Effects of tropical deforestation on global and regional atmospheric chemistry. *Climate Change* **19**, 139-158.
- KHVOROSTYANOV, V. I. (1995): Mesoscale processes of cloud formation, cloud-radiation interaction, and their modelling with explicit cloud microphysics. *Atmospheric Research* **39**, 1-67.
- KISTEMANN, T. und LAUER, W. (1990): Lokale Windsysteme in der Charazani-Talung (Bolivien). *Erdkunde* **44**, 46-59.
- KLEMM, O., BACHMEIER, A. S., TALBOT, R. W. und KLEMM, K. I. (1994): Fog Chemistry at the New England Coast: Influence of Air Mass History. *Atmospheric Environment* **28**, 1181-1188.

- LARRAIN H., VELÁSQUEZ, F., PINTO, R., LÁZARO, P., CERECEDA, P., OSSES, P. und SCHEMENAUER, R. S. (2001): Two years of fog measurements at the site "Falda Verde", north of Chañaral (Chile). *Second International Conference on Fog and Fog Collection*, St. John's (Canada): 15. – 20. Juli 2001, 223-226.
- LANFER, N. (2003): Landschaftsökologische Untersuchungen zur Standortbewertung und Nachhaltigkeit von Agroökosystemen im Tieflandsregenwald Ecuadors. *EcoRegio* Bd. 9, Shaker Verlag, Aachen.
- LAUNHARDT, T. (2002): Umweltrelevante Einflüsse bei der thermischen Nutzung fester Biomasse in Kleinanlagen. *Dissertation*. Wissenschaftszentrum für Ernährung, Landnutzung und Umwelt, Technische Universität München.
- LESACK, L. F. und MELACK, J. M. (1991): The deposition, composition, and potential sources of major ionic solutes in rain of the central Amazon Basin. *Water Resources Research* **27**, 2953-2977.
- LILJEQUIST, G. (1974): Allgemeine Meteorologie. Vieweg, Braunschweig.
- MAC QUARRIE, K. I. A., SHRESTHA, Y., OSSES, P., SCHEMENAUER, R. S., VITEZ, F., KOWALUCHUK, K. und TAYLOR, R. (2001): Results from a high elevation fog water supply project in Nepal. *Second International Conference on Fog and Fog Collection*, St. John's (Canada): 15. – 20. Juli 2001, 227-229.
- MARLOTH, R. (1906): Über die Menge, die Sträucher und Bäume aus treibendem Nebel und Wolken aufnehmen. *Meteorologische Zeitschrift*, Dezember, S. 547-553.
- MARZOL JAÉN, M. V. (2001): Drinking water for rural zones. *Second International Conference on Fog and Fog Collection*, St. John's (Canada): 15. – 20. Juli 2001, 247-250.
- MINAMI, Y. UND ISHIZAKA, Y. (1996): Evaluation of chemical composition in fog water near the summit of a high mountain in Japan. *Atmospheric Environment* **30**, 3363-3376.
- MÖLLER, D. (2003): Luft. Verlag DeGruyter, Berlin.
- MUNGER, J. W.; COLLETT, J., JR.; DAUBE, B., JR. und HOFFMANN M. R. (1989): Chemical composition of coastal stratus clouds: Dependence on droplet size and distance from the coast. *Atmospheric Environment* **23**, 2305-2320.
- NULTSCH, W. (1996): Allgemeine Botanik. Georg Thieme Verlag, Stuttgart New York.
- OLIVIER, J. und DE RAUTENBACH, C. J. (2002): The implementation of fog water collection systems in South Africa. *Atmospheric Research* **64**, 227-238.

- RADKE, M. (2003): Aerosolgebundene Emission organischer Umweltchemikalien aus druckbelüfteten Abwasserbehandlungsbecken. Dissertation, Fakultät für Biologie, Chemie und Geowissenschaften der Universität Bayreuth, 126 S.
- ROLPH, G.D. (2003): Real-time Environmental Applications and Display sYstem (READY) Website (<http://www.arl.noaa.gov/ready/hysplit4.html>). NOAA Air Resources Laboratory, Silver Spring, MD.
- SCHATZMANN, M. (1999): Wind tunnel modelling of fog droplet deposition on cylindrical obstacles. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* **83**, 371-380.
- SCHEMENAUER, R. S., FUENZALIDA, H. und CERECEDA, P. (1988): A neglected water resource: The Camanchaca of South America. *Bulletin American Meteorological Society* **69**, 138-147.
- SCHEMENAUER, R. S. und CERECEDA, P. (1994): A proposed standard fog collector for use in high elevation regions. *Journal of Applied Meteorology* **33**, 1313-1322.
- SCHEMENAUER, R. S., BANIC, C. M. und URQUIZO, N. (1995): High Elevation Fog and Precipitation Chemistry in Southern Quebec, Canada. *Atmospheric Environment* **29**, 2235-2252.
- SCHEMENAUER, R. S., OSSES, P., LARA, F., ZYWINA, C. und CERECEDA, P. (2001): Fog collection in the Dominican Republic. *Second International Conference on Fog and Fog Collection*, St. John's (Canada): 15. – 20. Juli 2001, 235-238.
- SHANYENGANA, E. S., HENSCHER, J. R., SEELY, M. K. und SANDERSON, R. D. (2002): Exploring fog as a supplementary water source in Namibia. *Atmospheric Research* **64**, 251-259.
- SCHULZE, E.-D., LANGE, O. L. und OREN, R. (1989): Forest decline and air pollution. *Ecological Studies* **77**, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 475 S.
- TENBERKEN, B. und BÄCHMANN, K. (1998): Sampling and analysis of single cloud and fog drops. *Atmospheric Environment* **32**, 1757-1763.
- UMS (2000): Datenblatt zu Niederschlagssammler RS200. <http://www.ums-muc.de> (abgerufen am 23.06.2004).
- VERMEULEN, A. T., WYERS, G. P., RÖMER, F. G., VAN LEEUWEN, N. F. M., DRAAIJERS, G. P. J. und ERISMAN, J. W. (1997): Fog deposition on a coniferous forest in the Netherlands. *Atmospheric Environment* **31** 375-386.
- WALMSLEY J. L., SCHEMENAUER, R. S. und BRIDGMAN, H. A. (1996): A method for estimating the hydrologic input from fog in mountainous terrain. *Journal of Applied Meteorology*, **35**, 2237-2249.

-
- WATANABE, K., ISHIZAKA, Y. und TAKENAKA, C. (2001): Chemical characteristics of cloud water over the Japan Sea and the Northwestern Pacific Ocean near the central part of Japan: airborne measurements. *Atmospheric Environment* **35**, 645-655.
- WESTERMANN SCHULBUCHVERLAG (2002): Diercke Weltatlas, 5. Auflage, Braunschweig.
- WINIGER, M., BACHMANN, M. und BENDIX, J. (1992): Nebel, Lufthaushalt und Lufthygiene im Alpenraum. *Erdkunde* **46**, 188-202
- WRZESINSKY, T. (2004): Direkte Messung und Bewertung des nebelgebundenen Eintrags von Wasser und Spurenstoffen in ein montanes Waldökosystem. *Dissertation*. Bayreuther Institut für terrestrische Ökosystemforschung, Universität Bayreuth.
- ZIMMERMANN, L. und ZIMMERMANN, F. (2002): Fog deposition to Norway Spruce stands at high-elevation sites in the Eastern Erzgebirge (Germany). *Journal of Hydrology* **256**, 166-175.

8 DANK

An erster Stelle möchte ich mich herzlich bei meinen Gutachtern Prof. Dr. Otto Klemm und Dr. Thomas Wrzesinsky für die intensive Betreuung und die fachlichen Anregungen bedanken.

Mein Dank gilt auch Prof. Dr. Peter Fabian und Prof. Dr. Jörg Bendix, die mir die Durchführung dieser Arbeit in Ecuador ermöglicht haben. Dabei ist auch besonders Dr. Rütger Rollenbeck zu erwähnen, der mir während der Geländearbeit jederzeit weiterhalf.

Der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) danke ich für die finanzielle Unterstützung bei der Unterbringung auf der ECSF.

Weiterhin möchte ich mich bei den technischen Angestellten aus dem Labor des Instituts für Landschaftsökologie für die Durchführung der chemischen Analyse bedanken.

Ich danke auch Dr. Andreas Held für seine Hilfsbereitschaft.

Ein ganz besonders herzlicher Dank geht an meine Mutter und an meinen Vater, die mich beide das ganze Studium hindurch nach ihren Möglichkeiten unterstützt haben und auf deren Hilfe ich immer zählen konnte.

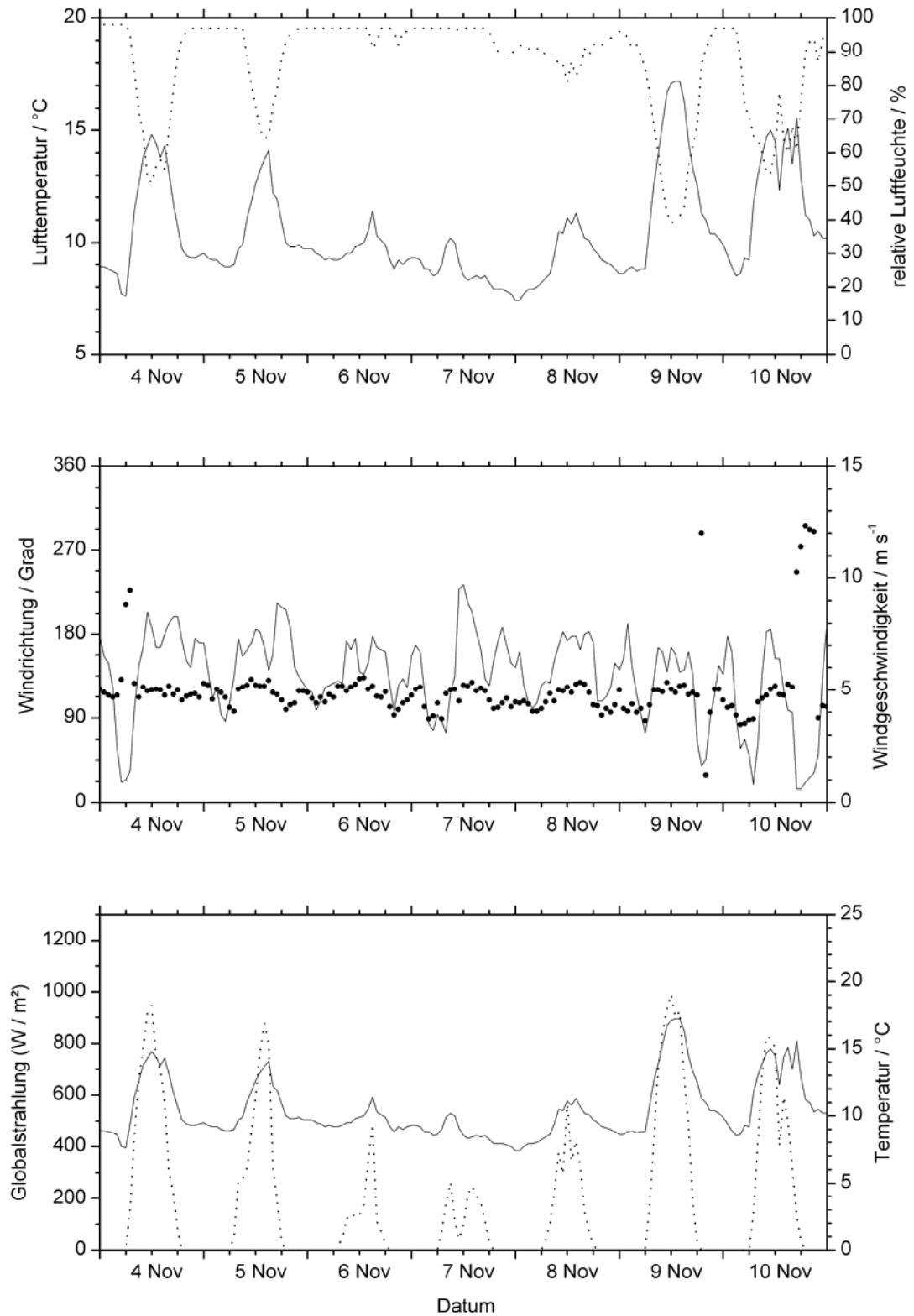
Meiner Schwester Silke und meinem Freund Thorsten danke ich dafür, dass sie mir während der Diplomarbeit mit viel Geduld bei Seite gestanden haben.

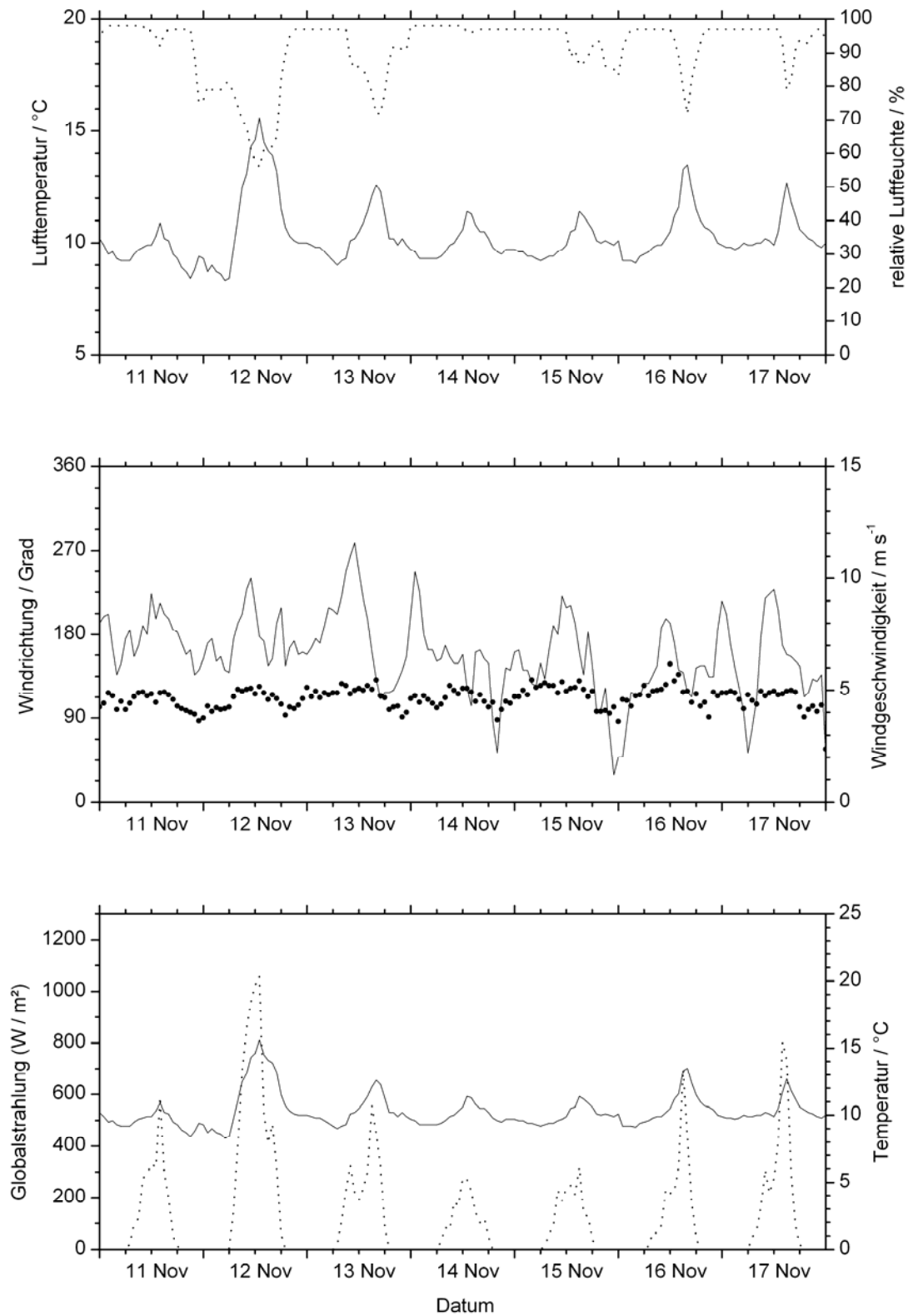
Ich danke allen weiteren Personen, die mir mit Kritik, Korrektur lesen oder einfach nur mit einem offenen Ohr bei der Durchführung dieser Arbeit geholfen haben.

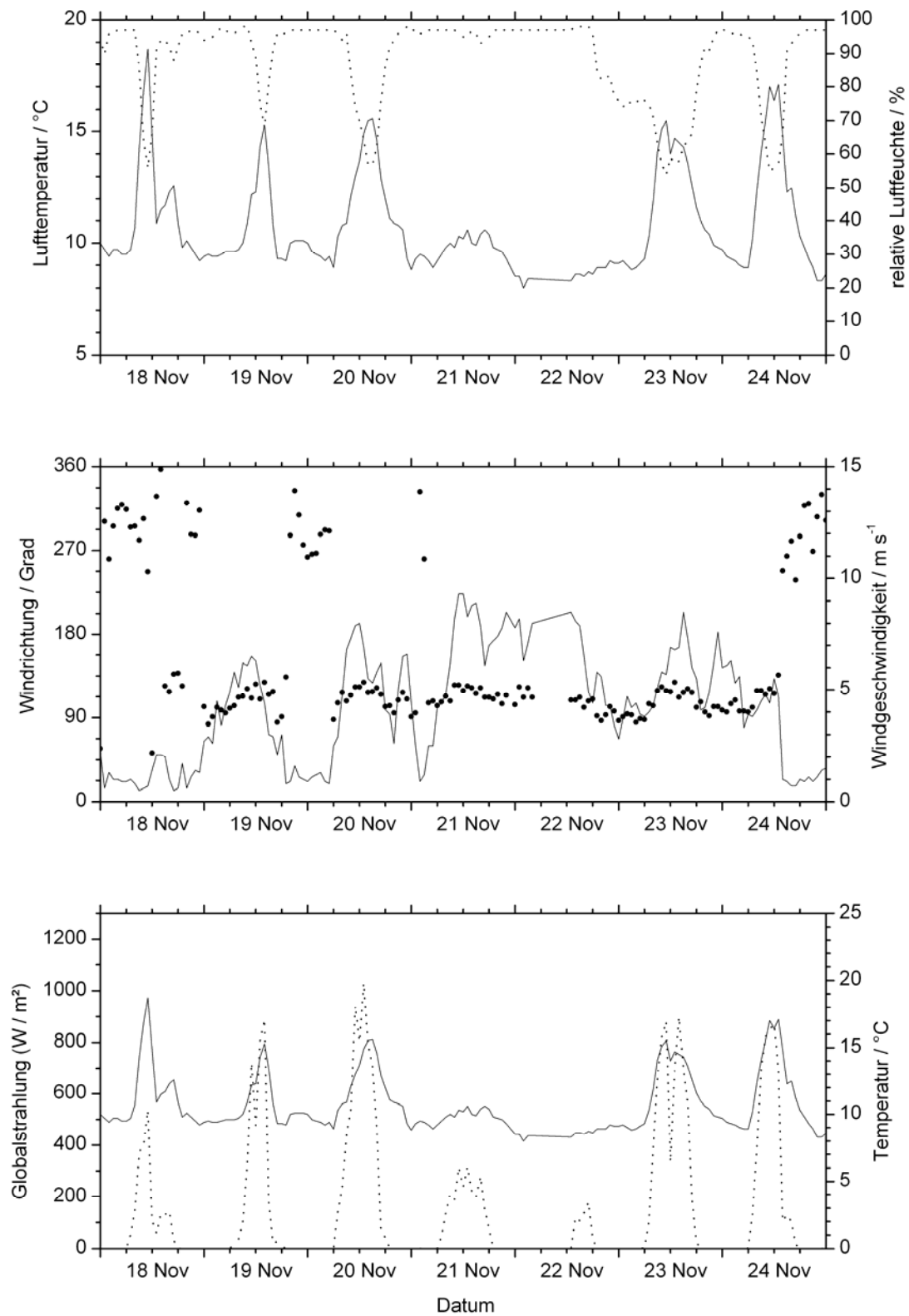
The author gratefully acknowledges the NOAA Air Resources Laboratory (ARL) for the provision of the HYSPLIT transport and dispersion model and the READY website (<http://www.arl.noaa.gov/ready.html>) used in this publication.

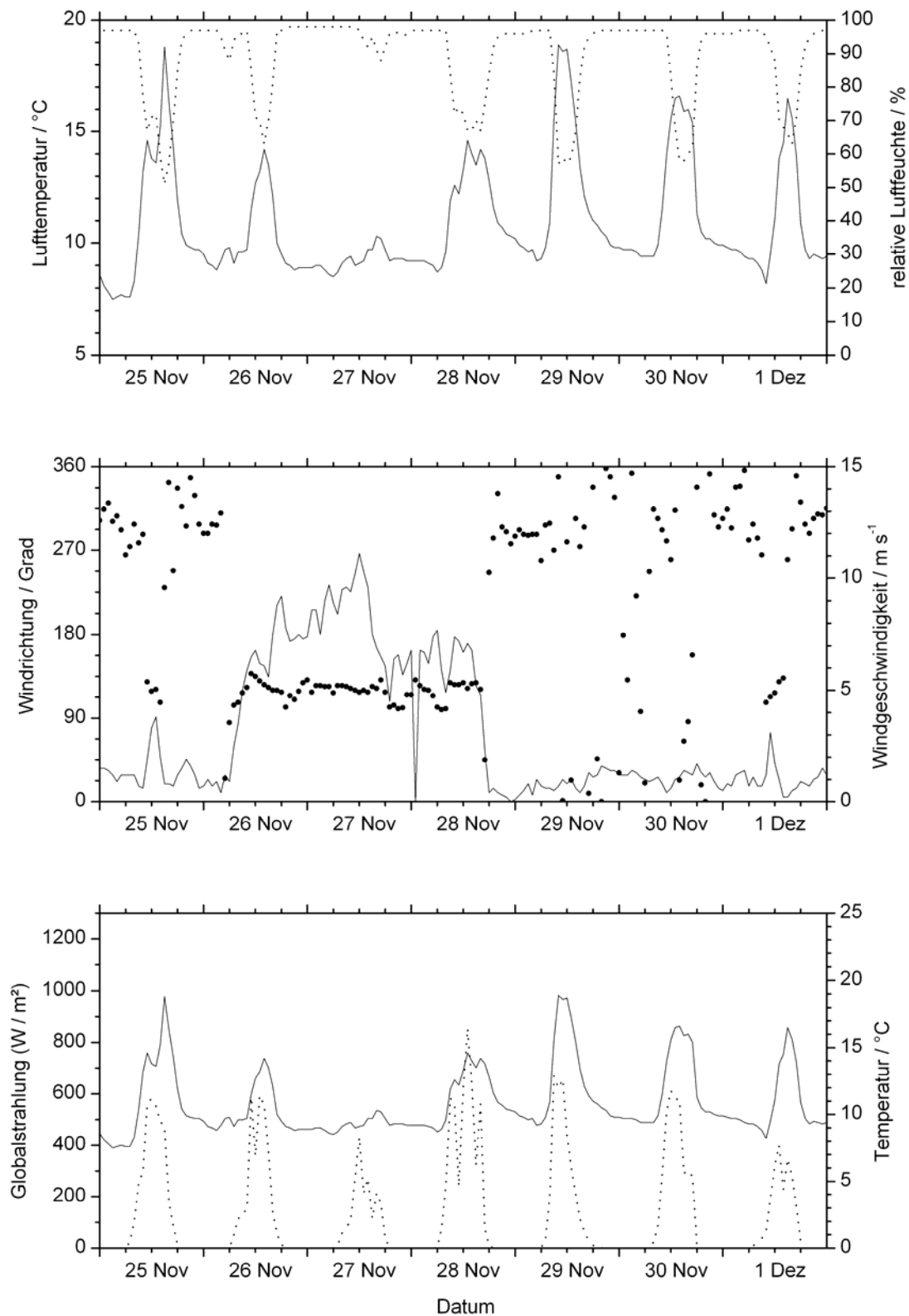
9 ANHANG

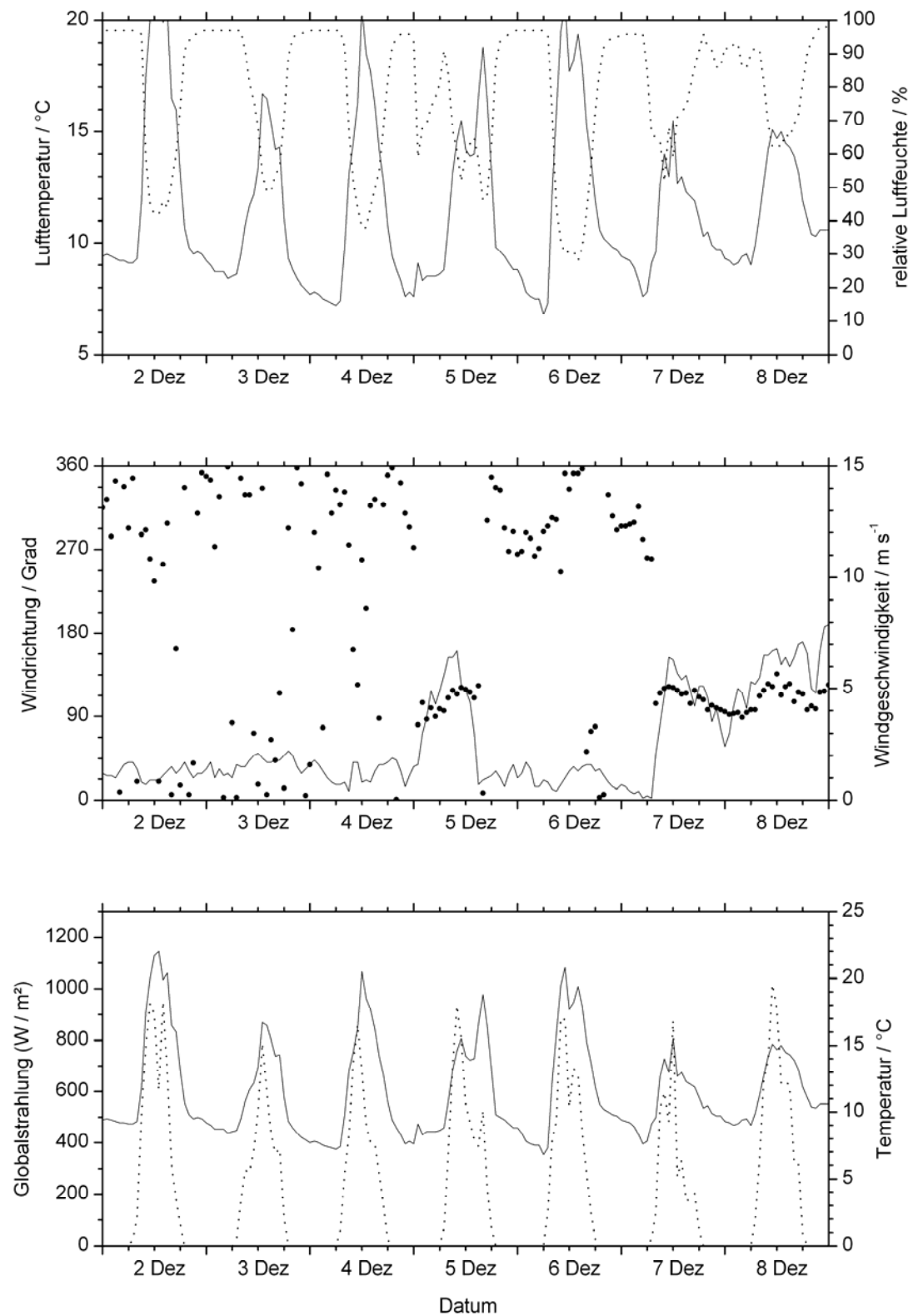
ANHANG 1: METEOROLOGISCHE PARAMETER GEMESSEN AN DER KLIMASTATION „EL TIRO“ FÜR DEN ZEITRAUM VOM 04.11.2003 BIS ZUM 15.01.2004

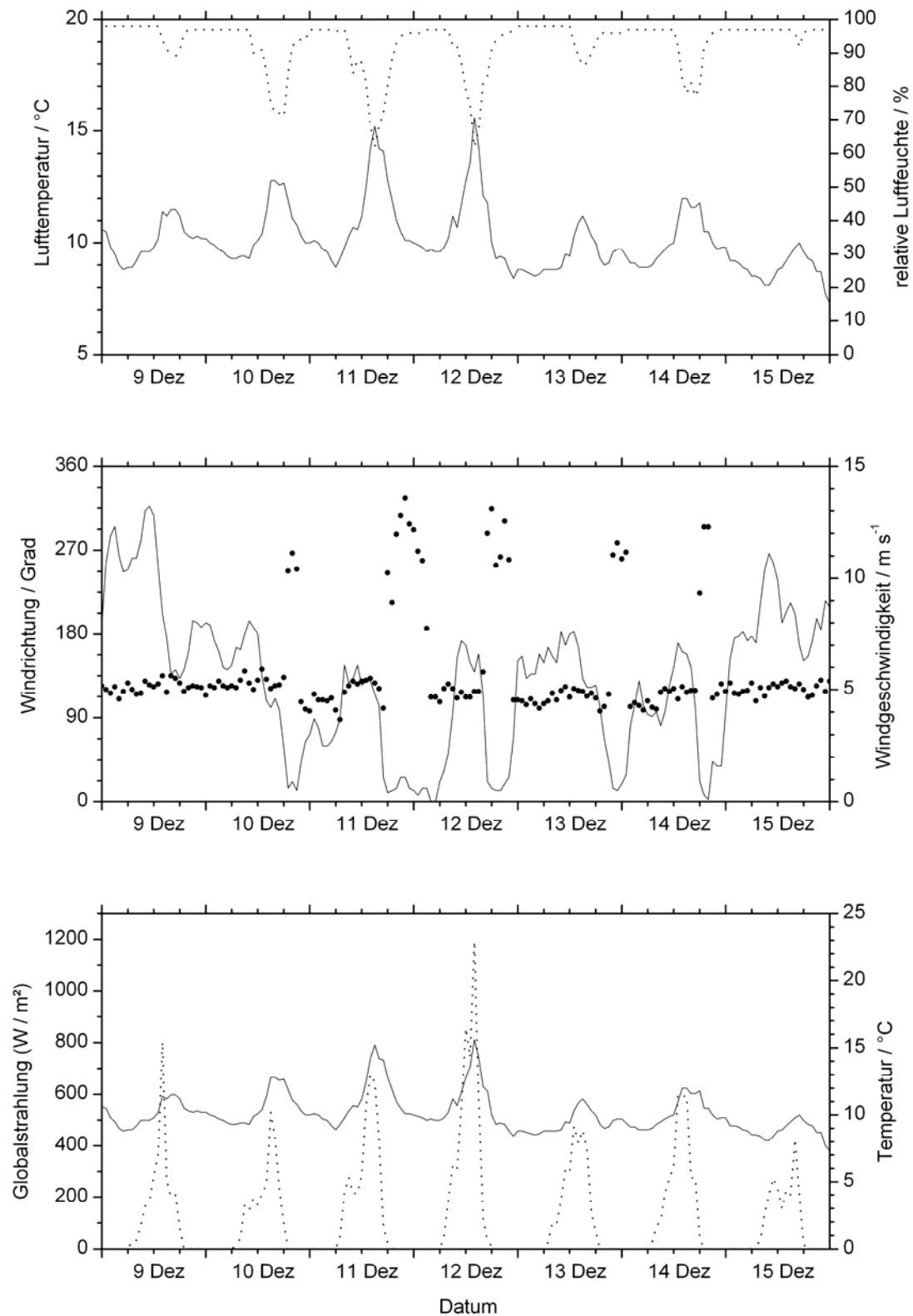


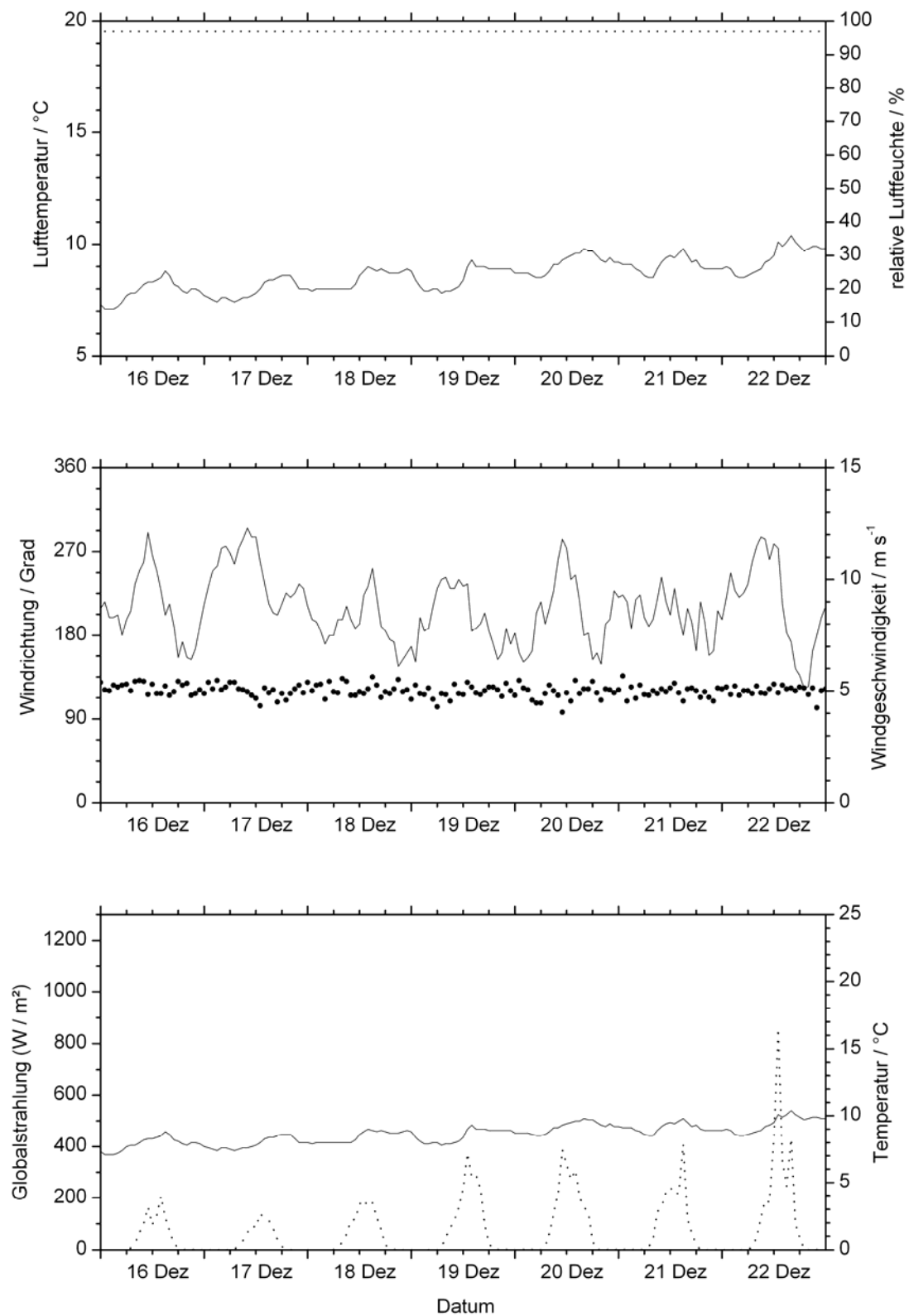


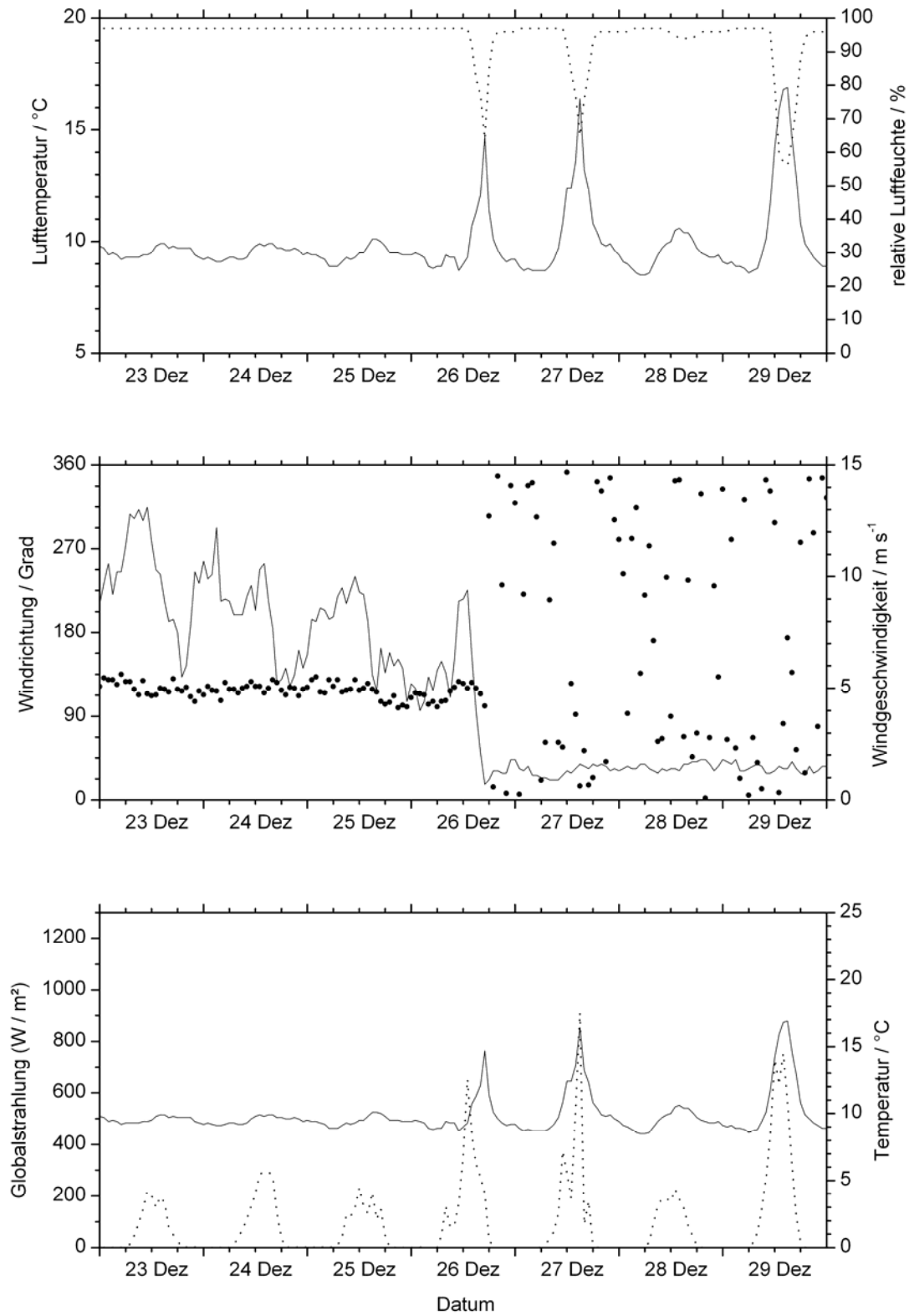


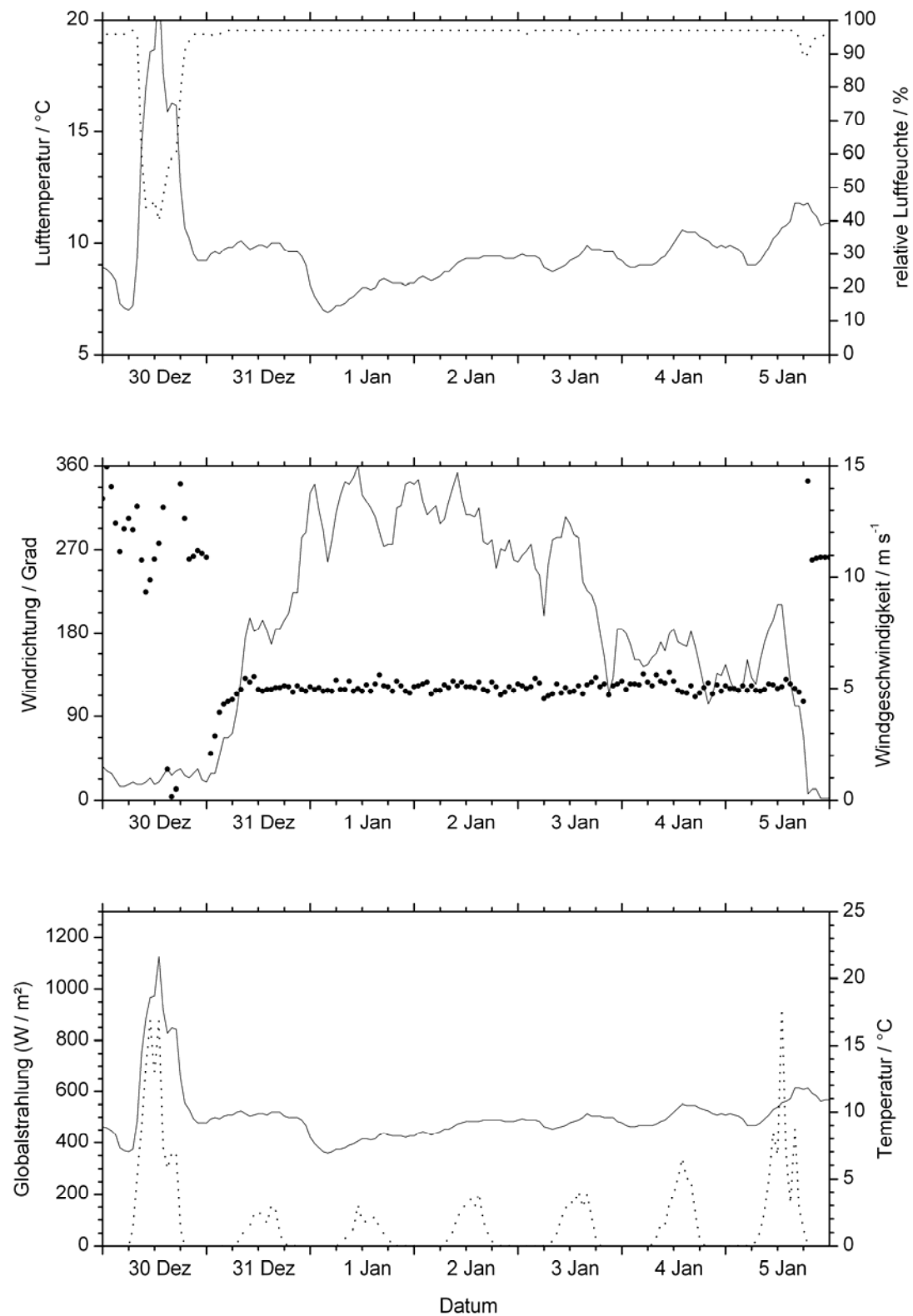


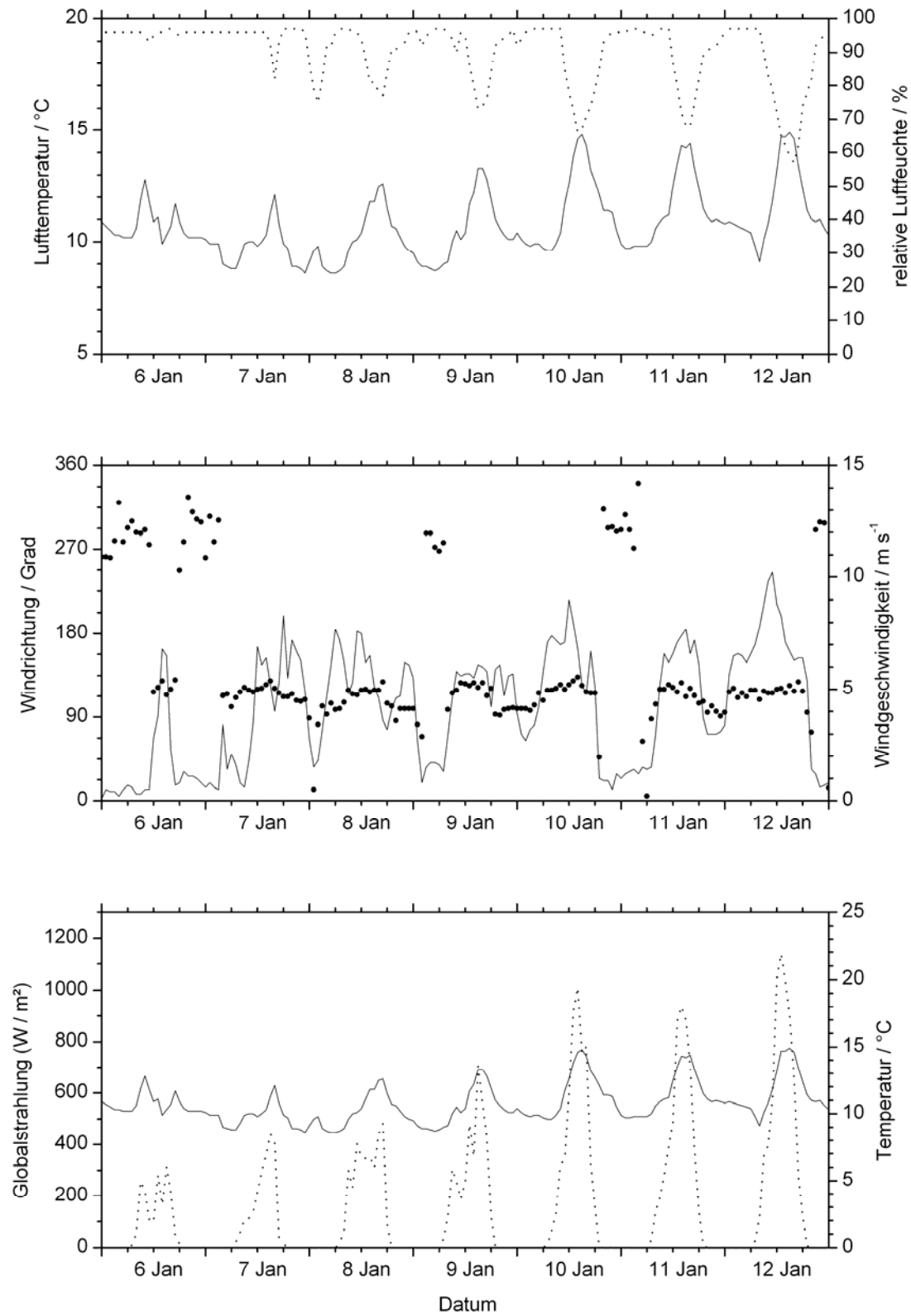


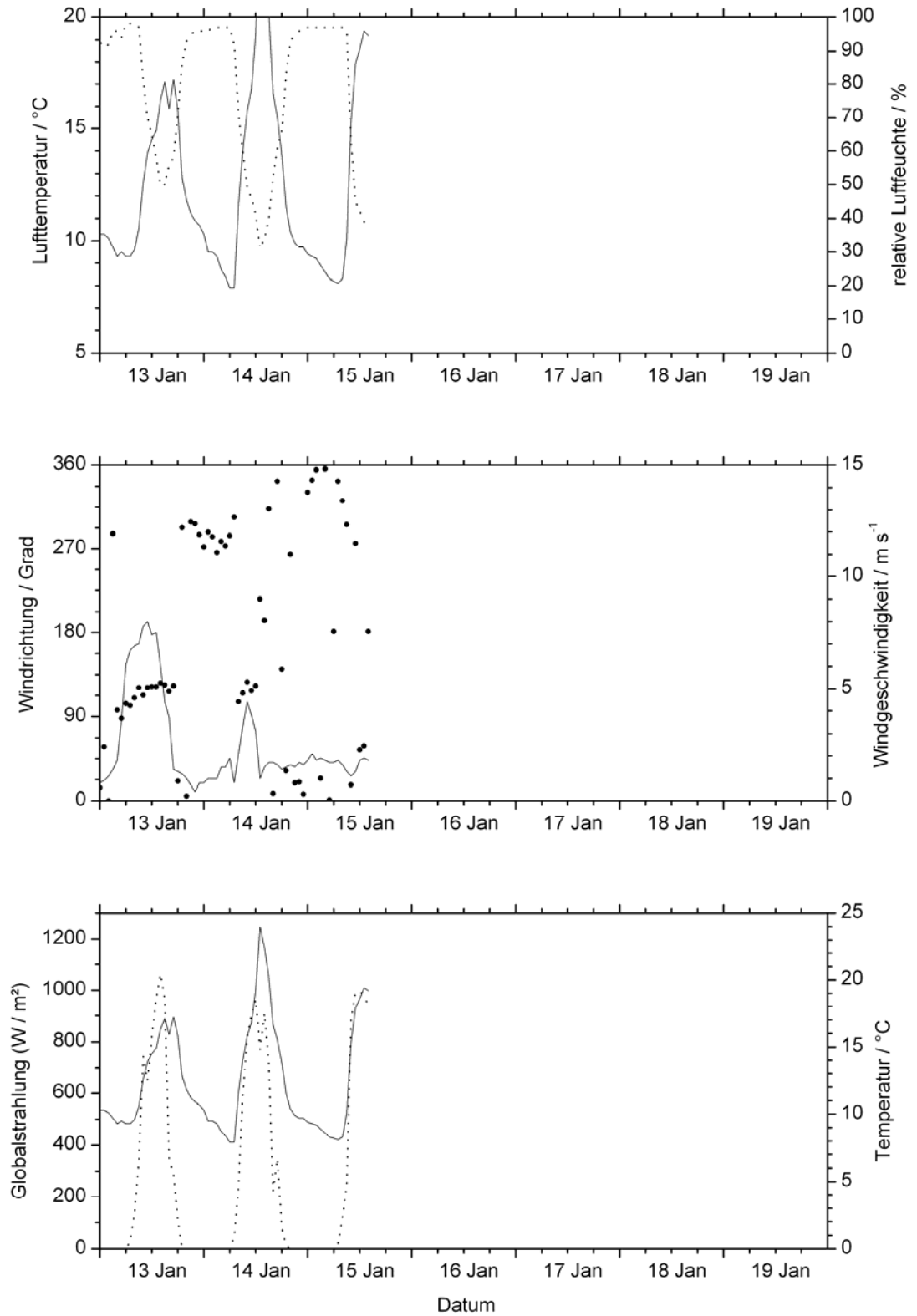












ANHANG 2: ERGEBNISSE DER CHEMISCHEN ANALYSE FÜR ALLE WASSERPROBEN

| Datum | Probe | Art | Uhrzeit | pH | LF µS/cm | bLF µS/cm | LF/bLF | H ⁺ mg/L | H ⁺ µeq/L |
|------------|-------|-----|---------|------|-------------|--------------|---------|------------------------|-------------------------|
| 03.11.2003 | 1 | N | 16:00 | 4,54 | 32 | 26 | 125,46% | 0,03 | 28,61 |
| 04.11.1930 | 2 | N | 13:25 | 4,60 | 26 | 18 | 147,21% | 0,03 | 24,92 |
| 08.11.2003 | 3 | N | 12:55 | 4,23 | 33 | 29 | 114,25% | 0,06 | 58,42 |
| 09.11.2003 | 4 | B | 12:10 | 4,88 | 11 | 8 | 134,31% | 0,01 | 13,08 |
| 09.11.2003 | 5 | R | 12:10 | 5,05 | 6 | 6 | 104,61% | 0,01 | 8,84 |
| 11.11.2003 | 6 | N | 12:10 | 4,12 | 50 | 42 | 118,53% | 0,08 | 75,26 |
| 12.11.2003 | 7 | N | 11:50 | 4,64 | 16 | 17 | 92,00% | 0,02 | 22,73 |
| 13.11.2003 | 8 | N | 12:25 | 4,31 | 37 | 27 | 135,52% | 0,05 | 48,59 |
| 15.11.2003 | 9 | N | 15:05 | 4,55 | 17 | 13 | 132,69% | 0,03 | 27,96 |
| 16.11.2003 | 10 | N | 15:15 | 4,77 | 14 | 10 | 141,70% | 0,02 | 16,85 |
| 16.11.2003 | 11 | R | 15:15 | 5,38 | 5 | 4 | 125,75% | 0,00 | 4,14 |
| 17.11.2003 | 12 | N | 10:30 | 4,96 | 10 | 6 | 174,36% | 0,01 | 10,88 |
| 19.11.2003 | 13 | N | 11:20 | 4,40 | 31 | 27 | 115,56% | 0,04 | 39,50 |
| 20.11.2003 | 14 | N | 11:55 | 4,76 | 15 | 11 | 133,93% | 0,02 | 17,24 |
| 22.11.2003 | 15 | N | 11:10 | 4,58 | 23 | 18 | 127,96% | 0,03 | 26,10 |
| 23.11.2003 | 16 | B | 10:00 | 4,88 | 14 | 11 | 127,68% | 0,01 | 13,08 |
| 23.11.2003 | 17 | R | 10:00 | 5,26 | 7 | 4 | 166,22% | 0,01 | 5,45 |
| 23.11.2003 | 18 | N | 10:00 | 4,62 | 20 | 16 | 121,44% | 0,02 | 23,80 |
| 27.11.2003 | 19 | N | 09:15 | 4,40 | 26 | 23 | 114,84% | 0,04 | 39,50 |
| 28.11.2003 | 20 | N | 09:20 | 4,33 | 29 | 25 | 117,55% | 0,05 | 46,41 |
| 30.11.2003 | 21 | R | 10:00 | 5,55 | 6 | 4 | 145,12% | 0,00 | 2,80 |
| 30.11.2003 | 22 | N | 10:00 | 4,68 | 30 | 26 | 113,94% | 0,02 | 20,73 |
| 30.11.2003 | 23 | B | 10:00 | 4,86 | 11 | 10 | 111,85% | 0,01 | 13,70 |
| 02.12.2003 | 24 | N | 09:45 | 4,58 | 73 | 68 | 107,70% | 0,03 | 26,10 |
| 10.12.2003 | 25 | N | 09:00 | 4,20 | 42 | 37 | 113,22% | 0,06 | 62,60 |
| 12.12.2003 | 26 | N | 09:50 | 3,97 | 95 | 91 | 103,95% | 0,11 | 106,31 |
| 13.12.2003 | 27 | N | 09:20 | 4,56 | 19 | 16 | 118,31% | 0,03 | 27,33 |
| 14.12.2003 | 28 | N | 09:25 | 4,04 | 52 | 49 | 107,16% | 0,09 | 90,48 |
| 14.12.2003 | 29 | R | 09:25 | 5,07 | 7 | 6 | 117,51% | 0,01 | 8,44 |
| 14.12.2003 | 30 | B | 09:25 | 5,23 | 4 | 3 | 136,53% | 0,01 | 5,84 |
| 15.12.2003 | 31 | N | 15:00 | 4,88 | 8 | 7 | 111,46% | 0,01 | 13,08 |
| 16.12.2003 | 32 | N | 10:55 | 4,63 | 17 | 13 | 129,64% | 0,02 | 23,26 |
| 18.12.2003 | 33 | N | 10:10 | 4,95 | 7 | 5 | 138,03% | 0,01 | 11,13 |
| 19.12.2003 | 34 | N | 10:35 | 5,28 | 4 | 2 | 163,12% | 0,01 | 5,21 |
| 20.12.2003 | 35 | N | 15:15 | 5,49 | 3 | 2 | 188,49% | 0,00 | 3,21 |
| 21.12.2003 | 36 | N | 10:20 | 5,01 | 6 | 4 | 134,21% | 0,01 | 9,70 |
| 21.12.2003 | 37 | R | 10:20 | 5,24 | 3 | 3 | 106,70% | 0,01 | 5,71 |
| 23.12.2003 | 38 | N | 10:10 | 4,92 | 6 | 5 | 112,22% | 0,01 | 11,93 |
| 24.12.2003 | 39 | N | 15:40 | 5,36 | 6 | 2 | 244,17% | 0,00 | 4,33 |
| 25.12.2003 | 40 | N | 14:35 | 5,01 | 7 | 5 | 136,41% | 0,01 | 9,70 |
| 26.12.2003 | 41 | N | 14:25 | 4,74 | 12 | 9 | 132,60% | 0,02 | 18,05 |
| 27.12.2003 | 42 | N | 10:10 | 4,72 | 18 | 16 | 115,53% | 0,02 | 18,90 |
| 28.12.2003 | 43 | N | 15:15 | 5,20 | 13 | 11 | 115,36% | 0,01 | 6,26 |
| 28.12.2003 | 44 | R | 15:15 | 5,45 | 3 | 2 | 128,36% | 0,00 | 3,52 |
| 30.12.2003 | 45 | N | 10:55 | 5,32 | 10 | 9 | 117,40% | 0,00 | 4,75 |
| 31.12.2003 | 46 | N | 17:00 | 4,70 | 14 | 9 | 150,94% | 0,02 | 19,80 |
| 01.01.2004 | 47 | N | 15:30 | 4,29 | 34 | 27 | 126,15% | 0,05 | 50,88 |
| 02.01.2004 | 48 | N | 16:30 | 5,61 | 4 | 2 | 174,13% | 0,00 | 2,44 |
| 03.01.2004 | 49 | N | 14:45 | 5,17 | 5 | 3 | 147,30% | 0,01 | 6,71 |
| 04.01.2004 | 50 | N | 15:20 | 5,05 | 6 | 4 | 138,41% | 0,01 | 8,84 |
| 04.01.2004 | 51 | R | 15:20 | 4,97 | 4 | 5 | 74,80% | 0,01 | 10,63 |

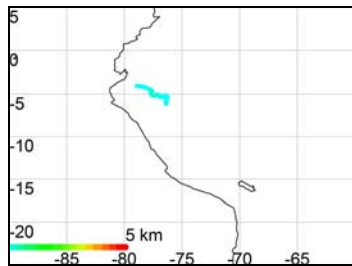
| Datum | Probe | Art | Uhrzeit | pH | LF μS/cm | bLF μS/cm | LF/bLF | H ⁺ mg/L | μeq/L |
|------------|-------|-----------|---------|------|-------------|--------------|---------|------------------------|--------|
| 05.01.2004 | 52 | N | 15:30 | 4,80 | 10 | 9 | 110,44% | 0,02 | 15,72 |
| 06.01.2004 | 53 | N | 15:15 | 4,73 | 17 | 15 | 113,38% | 0,02 | 18,47 |
| 07.01.2004 | 54 | N | 15:45 | 5,13 | 6 | 5 | 109,87% | 0,01 | 7,35 |
| 07.01.2004 | 55 | B | 15:45 | 5,12 | 4 | 4 | 100,65% | 0,01 | 7,53 |
| 08.01.2004 | 56 | N | 14:40 | 5,13 | 5 | 4 | 126,67% | 0,01 | 7,35 |
| 10.01.2004 | 57 | N | 15:30 | 4,32 | 38 | 34 | 110,65% | 0,05 | 47,49 |
| 11.01.2004 | 58 | R | 12:45 | 5,61 | 3 | 2 | 161,54% | 0,00 | 2,44 |
| 12.01.2004 | 59 | N | 14:30 | 4,41 | 40 | 36 | 112,63% | 0,04 | 38,60 |
| 15.01.2004 | 60 | N | 15:00 | 4,23 | 135 | 120 | 112,36% | 0,06 | 58,42 |
| 26.01.2001 | 61 | N | 09:45 | 4,27 | 227 | 309 | 73,51% | 0,05 | 53,28 |
| 27.01.2004 | 62 | N | 14:40 | 4,27 | 68 | 59 | 114,95% | 0,05 | 53,28 |
| 29.01.2004 | 63 | N | 14:35 | 4,54 | 50 | 41 | 121,51% | 0,03 | 28,61 |
| 29.01.2004 | 64 | B | 14:35 | 4,73 | 16 | 16 | 100,35% | 0,02 | 18,47 |
| 31.01.2004 | 65 | N | 09:20 | 4,17 | 51 | 48 | 106,60% | 0,07 | 67,08 |
| 31.01.2004 | 66 | Nd | 09:20 | 4,17 | 51 | 48 | 106,72% | 0,07 | 67,08 |
| 31.01.2004 | 67 | R | 09:20 | 5,41 | 11 | 11 | 102,80% | 0,00 | 3,86 |
| 31.01.2004 | 68 | Rd | 09:20 | 5,41 | 11 | 9 | 117,51% | 0,00 | 3,86 |
| 02.02.2004 | 69 | N | 14:30 | 4,14 | 53 | 47 | 113,49% | 0,07 | 71,87 |
| 02.02.2004 | 70 | Nd | 14:30 | 4,14 | 53 | 47 | 112,40% | 0,07 | 71,87 |
| 02.02.2004 | 71 | Nd | 14:30 | 4,14 | 53 | 47 | 112,04% | 0,07 | 71,87 |
| 03.02.2004 | 72 | N | 15:00 | 4,02 | 94 | 90 | 104,19% | 0,10 | 94,75 |
| 03.02.2004 | 73 | Nd | 15:00 | 4,02 | 94 | 91 | 103,39% | 0,10 | 94,75 |
| 04.02.2004 | 74 | N | 15:30 | 3,91 | 88 | 83 | 105,84% | 0,12 | 122,06 |
| 04.02.2004 | 75 | Nd | 15:30 | 3,91 | 88 | 82 | 106,82% | 0,12 | 122,06 |
| 05.02.2004 | 76 | N | 14:30 | 4,23 | 78 | 71 | 110,50% | 0,06 | 58,42 |
| 05.02.2004 | 77 | Nd | 14:30 | 4,23 | 78 | 68 | 114,39% | 0,06 | 58,42 |
| 06.02.2004 | 78 | N | 09:15 | 4,23 | 77 | 66 | 116,02% | 0,06 | 58,42 |
| 06.02.2004 | 79 | Nd | 09:15 | 4,23 | 77 | 66 | 116,16% | 0,06 | 58,42 |
| 07.02.2004 | 80 | N | 12:30 | 4,14 | 78 | 74 | 105,37% | 0,07 | 71,87 |
| 07.02.2004 | 81 | Nd | 12:30 | 4,14 | 78 | 76 | 102,14% | 0,07 | 71,87 |
| 08.02.2004 | 82 | N | 13:45 | 4,32 | 42 | 40 | 105,01% | 0,05 | 47,49 |
| 08.02.2004 | 83 | Nd | 13:45 | 4,32 | 42 | 40 | 104,68% | 0,05 | 47,49 |
| 08.02.2004 | 84 | R | 13:45 | 4,54 | 10 | 13 | 76,63% | 0,03 | 28,61 |
| 08.02.2004 | 85 | Rd | 13:45 | 4,54 | 10 | 13 | 74,88% | 0,03 | 28,61 |
| 09.02.2004 | 86 | N | 09:20 | 4,28 | 46 | 43 | 107,26% | 0,05 | 52,07 |
| 09.02.2004 | 87 | Nd | 09:20 | 4,28 | 46 | 41 | 113,18% | 0,05 | 52,07 |
| 10.02.2004 | 88 | N | 14:45 | 4,50 | 23 | 23 | 99,94% | 0,03 | 31,37 |
| 10.02.2004 | 89 | Nd | 14:45 | 4,50 | 23 | 23 | 101,25% | 0,03 | 31,37 |
| | 90 | Millipore | | | | 1 | | | 0,00 |

| Probe | NH ₄ ⁺ | | K ⁺ | | Na ⁺ | | Ca ²⁺ | | Mg ²⁺ | |
|-------|------------------------------|--------|----------------|-------|-----------------|-------|------------------|-------|------------------|-------|
| | mg/L | µeq/L | mg/L | µeq/L | mg/L | µeq/L | mg/L | µeq/L | mg/L | µeq/L |
| 1 | 1,23 | 68,20 | 0,36 | 9,21 | 0,30 | 12,91 | 0,81 | 40,42 | 0,07 | 5,43 |
| 2 | 0,39 | 21,76 | 0,72 | 18,44 | 0,10 | 4,31 | 0,27 | 13,47 | 0,01 | 1,15 |
| 3 | 0,59 | 32,45 | 0,18 | 4,60 | 0,10 | 4,31 | 0,18 | 8,98 | 0,02 | 1,81 |
| 4 | 0,06 | 3,38 | 0,36 | 9,21 | 0,10 | 4,31 | 0,16 | 7,98 | 0,03 | 2,63 |
| 5 | 0,00 | 0,00 | 0,27 | 6,91 | 0,20 | 8,61 | 0,17 | 8,48 | 0,03 | 2,80 |
| 6 | 1,57 | 87,05 | 0,45 | 11,51 | 0,30 | 12,91 | 0,37 | 18,46 | 0,02 | 1,40 |
| 7 | 0,24 | 13,44 | 1,98 | 50,69 | 0,10 | 4,31 | 0,20 | 9,98 | 0,02 | 1,65 |
| 8 | 0,98 | 54,23 | 0,45 | 11,51 | 0,10 | 4,31 | 0,17 | 8,48 | 0,03 | 2,55 |
| 9 | 0,20 | 11,33 | 0,09 | 2,30 | 0,10 | 4,31 | 0,14 | 6,99 | 0,01 | 0,74 |
| 10 | 0,16 | 8,81 | 0,18 | 4,60 | 0,10 | 4,31 | 0,10 | 4,99 | 0,02 | 1,23 |
| 11 | 0,02 | 1,00 | 0,45 | 11,51 | 0,20 | 8,61 | 0,10 | 4,99 | 0,05 | 4,20 |
| 12 | 0,07 | 3,71 | 0,09 | 2,30 | 0,10 | 4,31 | 0,08 | 3,99 | 0,01 | 0,58 |
| 13 | 0,74 | 40,75 | 0,54 | 13,84 | 0,40 | 17,22 | 0,26 | 12,97 | 0,09 | 6,99 |
| 14 | 0,31 | 16,94 | 0,09 | 2,30 | 0,10 | 4,31 | 0,16 | 7,98 | 0,02 | 1,89 |
| 15 | 0,45 | 24,89 | 0,27 | 6,91 | 0,30 | 12,91 | 0,24 | 11,98 | 0,05 | 4,36 |
| 16 | 0,23 | 12,96 | 0,27 | 6,91 | 0,10 | 4,31 | 0,44 | 21,96 | 0,04 | 3,46 |
| 17 | 0,00 | 0,00 | 0,09 | 2,30 | 0,10 | 4,31 | 0,12 | 5,99 | 0,01 | 0,49 |
| 18 | 0,68 | 37,59 | 0,18 | 4,60 | 0,10 | 4,31 | 0,24 | 11,98 | 0,02 | 1,81 |
| 19 | 0,50 | 27,46 | 0,27 | 6,91 | 0,20 | 8,61 | 0,26 | 12,97 | 0,04 | 3,29 |
| 20 | 0,52 | 28,79 | 0,27 | 6,91 | 0,20 | 8,61 | 0,11 | 5,49 | 0,03 | 2,39 |
| 21 | 0,00 | 0,00 | 0,72 | 18,44 | 0,10 | 4,31 | 0,10 | 4,99 | 0,01 | 0,66 |
| 22 | 1,82 | 100,85 | 0,45 | 11,51 | 0,30 | 12,91 | 0,23 | 11,48 | 0,07 | 5,43 |
| 23 | 0,21 | 11,72 | 0,09 | 2,30 | 0,10 | 4,31 | 0,20 | 9,98 | 0,03 | 2,14 |
| 24 | 5,43 | 301,07 | 0,72 | 18,44 | 1,39 | 60,27 | 0,89 | 44,41 | 0,32 | 25,92 |
| 25 | 0,85 | 47,35 | 0,27 | 6,91 | 0,49 | 21,52 | 0,46 | 22,96 | 0,11 | 8,89 |
| 26 | 3,41 | 189,01 | 1,53 | 39,18 | 1,68 | 73,18 | 1,15 | 57,39 | 0,38 | 31,35 |
| 27 | 0,31 | 17,22 | 0,18 | 4,60 | 0,20 | 8,61 | 0,15 | 7,49 | 0,04 | 3,04 |
| 28 | 1,03 | 57,03 | 0,45 | 11,51 | 0,20 | 8,61 | 0,15 | 7,49 | 0,04 | 3,62 |
| 29 | 0,00 | 0,00 | 0,18 | 4,60 | 0,20 | 8,61 | 0,20 | 9,98 | 0,05 | 3,95 |
| 30 | 0,00 | 0,02 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,10 | 4,99 | 0,01 | 0,41 |
| 31 | 0,08 | 4,43 | 0,09 | 2,30 | 0,10 | 4,31 | 0,09 | 4,49 | 0,03 | 2,30 |
| 32 | 0,28 | 15,60 | 0,09 | 2,30 | 0,20 | 8,61 | 0,09 | 4,49 | 0,01 | 0,82 |
| 33 | 0,01 | 0,40 | 0,00 | 0,00 | 0,10 | 4,31 | 0,08 | 3,99 | 0,00 | 0,25 |
| 34 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,06 | 2,99 | 0,00 | 0,16 |
| 35 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,06 | 2,99 | 0,00 | 0,08 |
| 36 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,10 | 4,31 | 0,07 | 3,49 | 0,00 | 0,08 |
| 37 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,10 | 4,31 | 0,09 | 4,49 | 0,01 | 0,49 |
| 38 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,10 | 4,31 | 0,09 | 4,49 | 0,01 | 0,41 |
| 39 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,10 | 4,31 | 0,12 | 5,99 | 0,00 | 0,33 |
| 40 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,10 | 4,31 | 0,10 | 4,99 | 0,01 | 0,99 |
| 41 | 0,00 | 0,00 | 0,09 | 2,30 | 0,20 | 8,61 | 0,10 | 4,99 | 0,02 | 1,81 |
| 42 | 0,51 | 28,26 | 0,63 | 16,14 | 0,10 | 4,31 | 0,24 | 11,98 | 0,03 | 2,72 |
| 43 | 0,87 | 48,46 | 0,27 | 6,91 | 0,10 | 4,31 | 0,20 | 9,98 | 0,02 | 1,97 |
| 44 | 0,00 | 0,00 | 0,09 | 2,30 | 0,10 | 4,31 | 0,07 | 3,49 | 0,01 | 0,74 |
| 45 | 0,65 | 36,11 | 0,09 | 2,30 | 0,10 | 4,31 | 0,14 | 6,99 | 0,02 | 1,40 |
| 46 | 0,24 | 13,39 | 0,00 | 0,00 | 0,10 | 4,31 | 0,14 | 6,99 | 0,02 | 1,40 |
| 47 | 0,96 | 53,43 | 0,18 | 4,60 | 0,30 | 12,91 | 0,10 | 4,99 | 0,03 | 2,14 |
| 48 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,10 | 4,31 | 0,04 | 2,00 | 0,00 | 0,00 |
| 49 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,10 | 4,31 | 0,06 | 2,99 | 0,01 | 0,49 |
| 50 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,10 | 4,31 | 0,08 | 3,99 | 0,01 | 0,49 |
| 51 | 0,00 | 0,00 | 0,09 | 2,30 | 0,10 | 4,31 | 0,09 | 4,49 | 0,02 | 1,32 |

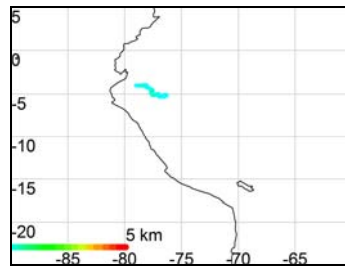
| Probe | NH ₄ ⁺ | | K ⁺ | | Na ⁺ | | Ca ²⁺ | | Mg ²⁺ | |
|-------|------------------------------|--------|----------------|---------|-----------------|--------|------------------|--------|------------------|--------|
| | mg/L | µeq/L | mg/L | µeq/L | mg/L | µeq/L | mg/L | µeq/L | mg/L | µeq/L |
| 52 | 0,16 | 8,78 | 0,00 | 0,00 | 0,10 | 4,31 | 0,08 | 3,99 | 0,02 | 1,32 |
| 53 | 0,45 | 25,21 | 0,36 | 9,21 | 0,40 | 17,22 | 0,14 | 6,99 | 0,06 | 4,53 |
| 54 | 0,08 | 4,60 | 0,09 | 2,30 | 0,20 | 8,61 | 0,11 | 5,49 | 0,02 | 1,48 |
| 55 | 0,00 | 0,00 | 0,09 | 2,30 | 0,10 | 4,31 | 0,06 | 2,99 | 0,01 | 0,74 |
| 56 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,10 | 4,31 | 0,10 | 4,99 | 0,01 | 0,82 |
| 57 | 0,66 | 36,53 | 1,08 | 27,65 | 0,99 | 43,05 | 0,23 | 11,48 | 0,15 | 12,51 |
| 58 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,10 | 4,31 | 0,10 | 4,99 | 0,01 | 0,74 |
| 59 | 1,12 | 62,31 | 0,90 | 23,04 | 1,48 | 64,57 | 0,31 | 15,47 | 0,18 | 14,48 |
| 60 | 4,17 | 231,38 | 2,88 | 73,74 | 7,82 | 340,07 | 1,69 | 84,34 | 0,23 | 18,60 |
| 61 | 9,27 | 514,12 | 54,06 | 1382,62 | 12,87 | 559,60 | 8,60 | 429,16 | 1,37 | 112,32 |
| 62 | 3,19 | 176,66 | 1,35 | 34,55 | 1,58 | 68,87 | 0,95 | 47,41 | 0,28 | 22,88 |
| 63 | 1,79 | 99,50 | 0,72 | 18,44 | 1,29 | 55,96 | 1,06 | 52,90 | 0,31 | 25,34 |
| 64 | 0,36 | 19,76 | 0,27 | 6,91 | 0,49 | 21,52 | 0,21 | 10,48 | 0,07 | 5,51 |
| 65 | 2,15 | 119,23 | 1,08 | 27,65 | 0,89 | 38,74 | 0,33 | 16,47 | 0,13 | 10,29 |
| 66 | 2,16 | 119,49 | 1,08 | 27,65 | 0,89 | 38,74 | 0,34 | 16,97 | 0,13 | 10,70 |
| 67 | 0,69 | 38,32 | 1,17 | 29,95 | 0,40 | 17,22 | 0,23 | 11,48 | 0,10 | 8,56 |
| 68 | 0,67 | 37,05 | 1,08 | 27,65 | 0,40 | 17,22 | 0,19 | 9,48 | 0,09 | 7,08 |
| 69 | 2,05 | 113,73 | 0,81 | 20,74 | 0,59 | 25,83 | 0,16 | 7,98 | 0,07 | 5,35 |
| 70 | 2,05 | 113,73 | 0,03 | 0,77 | 0,99 | 43,05 | 0,17 | 8,48 | 0,06 | 5,18 |
| 71 | 2,08 | 115,55 | 0,72 | 18,44 | 0,59 | 25,83 | 0,16 | 7,98 | 0,07 | 5,43 |
| 72 | 3,73 | 206,72 | 1,80 | 46,09 | 2,97 | 129,14 | 0,98 | 48,90 | 0,53 | 43,86 |
| 73 | 3,74 | 207,55 | 1,80 | 46,09 | 3,07 | 133,44 | 0,98 | 48,90 | 0,53 | 43,53 |
| 74 | 3,47 | 192,41 | 1,35 | 34,55 | 1,09 | 47,35 | 0,32 | 15,97 | 0,16 | 12,75 |
| 75 | 3,46 | 192,02 | 1,35 | 34,55 | 1,19 | 51,66 | 0,33 | 16,47 | 0,16 | 12,92 |
| 76 | 4,82 | 267,26 | 1,44 | 36,88 | 1,58 | 68,87 | 0,46 | 22,96 | 0,22 | 18,27 |
| 77 | 4,87 | 270,03 | 1,44 | 36,88 | 1,48 | 64,57 | 0,47 | 23,45 | 0,23 | 18,68 |
| 78 | 5,50 | 304,85 | 1,44 | 36,88 | 0,79 | 34,44 | 0,33 | 16,47 | 0,11 | 9,13 |
| 79 | 5,53 | 306,55 | 1,35 | 34,55 | 0,79 | 34,44 | 0,33 | 16,47 | 0,11 | 9,22 |
| 80 | 5,37 | 297,80 | 1,53 | 39,18 | 0,99 | 43,05 | 0,40 | 19,96 | 0,15 | 12,18 |
| 81 | 5,39 | 298,53 | 1,44 | 36,88 | 0,99 | 43,05 | 0,37 | 18,46 | 0,15 | 12,10 |
| 82 | 2,58 | 142,85 | 0,63 | 16,14 | 0,49 | 21,52 | 0,13 | 6,49 | 0,04 | 3,37 |
| 83 | 2,58 | 142,76 | 0,63 | 16,14 | 0,59 | 25,83 | 0,25 | 12,48 | 0,04 | 3,29 |
| 84 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,30 | 12,91 | 0,22 | 10,98 | 0,05 | 3,70 |
| 85 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,40 | 17,22 | 0,27 | 13,47 | 0,04 | 3,46 |
| 86 | 2,50 | 138,71 | 0,72 | 18,44 | 0,49 | 21,52 | 0,62 | 30,94 | 0,03 | 2,63 |
| 87 | 2,49 | 137,84 | 0,72 | 18,44 | 0,40 | 17,22 | 0,11 | 5,49 | 0,02 | 1,65 |
| 88 | 1,17 | 64,61 | 0,36 | 9,21 | 0,40 | 17,22 | 0,16 | 7,98 | 0,02 | 1,73 |
| 89 | 1,22 | 67,77 | 0,36 | 9,21 | 0,30 | 12,91 | 0,13 | 6,49 | 0,02 | 1,56 |
| 90 | 0,000 | 0,00 | 0,000 | 0,000 | 0,099 | 4,306 | 0,080 | 3,99 | 0,005 | 0,411 |

| Probe | Cl ⁻ | | NO ₃ ⁻ | | NO ₃ ⁻ (IC) | | PO ₄ ³⁻ | | SO ₄ ²⁻ | |
|-------|-----------------|-------|------------------------------|--------|-----------------------------------|--------|-------------------------------|-------|-------------------------------|--------|
| | mg/L | µeq/L | mg/L | µeq/L | mg/L | µeq/L | mg/L | µeq/L | mg/L | µeq/L |
| 1 | 0,27 | 7,47 | 1,74 | 27,98 | 1,38 | 22,34 | 0,32 | 9,97 | 2,34 | 48,81 |
| 2 | 0,60 | 16,90 | 0,67 | 10,73 | 0,68 | 10,98 | 0,00 | 0,00 | 1,72 | 35,75 |
| 3 | 0,17 | 4,86 | 0,97 | 15,72 | 0,71 | 11,47 | 0,07 | 2,29 | 2,04 | 42,41 |
| 4 | 0,11 | 2,98 | 0,56 | 9,08 | 0,46 | 7,39 | 0,11 | 3,44 | 0,59 | 12,32 |
| 5 | 0,17 | 4,86 | 0,03 | 0,45 | 0,00 | 0,00 | 0,14 | 4,37 | 0,39 | 8,12 |
| 6 | 0,45 | 12,81 | 2,83 | 45,64 | 2,13 | 34,34 | 0,27 | 8,48 | 1,54 | 32,13 |
| 7 | 1,20 | 33,91 | 0,59 | 9,50 | 0,45 | 7,18 | 0,10 | 3,26 | 0,34 | 7,12 |
| 8 | 0,15 | 4,12 | 2,55 | 41,08 | 1,87 | 30,10 | 0,18 | 5,65 | 0,83 | 17,21 |
| 9 | 0,06 | 1,64 | 0,75 | 12,08 | 0,58 | 9,37 | 0,10 | 3,00 | 0,23 | 4,69 |
| 10 | 0,49 | 13,84 | 0,69 | 11,14 | 0,49 | 7,91 | 0,00 | 0,00 | 0,34 | 7,17 |
| 11 | 0,24 | 6,70 | 0,03 | 0,45 | 0,00 | 0,00 | 0,82 | 25,91 | 0,07 | 1,46 |
| 12 | 0,11 | 3,17 | 0,33 | 5,33 | 0,27 | 4,28 | 0,08 | 2,40 | 0,23 | 4,79 |
| 13 | 0,46 | 12,99 | 2,27 | 36,63 | 1,93 | 31,12 | 0,16 | 4,91 | 2,04 | 42,39 |
| 14 | 0,15 | 4,27 | 0,54 | 8,64 | 0,43 | 6,96 | 0,00 | 0,00 | 1,22 | 25,30 |
| 15 | 0,15 | 4,33 | 1,22 | 19,72 | 0,97 | 15,68 | 0,07 | 2,17 | 1,91 | 39,81 |
| 16 | 0,10 | 2,88 | 1,57 | 25,27 | 1,27 | 20,56 | 0,13 | 4,07 | 0,72 | 15,04 |
| 17 | 0,15 | 4,23 | 0,21 | 3,31 | 0,40 | 6,48 | 0,07 | 2,22 | 0,59 | 12,23 |
| 18 | 0,14 | 3,91 | 1,35 | 21,83 | 1,19 | 19,24 | 0,00 | 0,00 | 1,30 | 27,07 |
| 19 | 0,14 | 3,98 | 1,45 | 23,35 | 1,16 | 18,73 | 0,08 | 2,57 | 1,78 | 36,96 |
| 20 | 0,16 | 4,58 | 1,93 | 31,07 | 1,53 | 24,72 | 0,09 | 2,79 | 1,42 | 29,61 |
| 21 | 0,17 | 4,81 | 0,19 | 3,11 | 0,15 | 2,42 | 0,08 | 2,44 | 0,40 | 8,31 |
| 22 | 0,20 | 5,55 | 3,45 | 55,59 | 2,87 | 46,30 | 0,13 | 4,14 | 2,89 | 60,15 |
| 23 | 0,08 | 2,31 | 0,48 | 7,71 | 0,87 | 14,06 | 0,10 | 3,29 | 1,42 | 29,58 |
| 24 | 0,93 | 26,29 | 10,49 | 169,23 | 9,10 | 146,81 | 0,61 | 19,16 | 8,44 | 175,62 |
| 25 | 0,23 | 6,59 | 2,48 | 39,92 | 2,00 | 32,18 | 0,29 | 9,19 | 2,97 | 61,93 |
| 26 | 1,28 | 36,12 | 12,68 | 204,47 | 12,02 | 193,85 | 0,36 | 11,23 | 6,81 | 141,87 |
| 27 | 0,10 | 2,92 | 1,22 | 19,66 | 1,04 | 16,74 | 0,00 | 0,00 | 1,34 | 27,95 |
| 28 | 0,14 | 3,82 | 1,33 | 21,40 | 1,00 | 16,16 | 0,00 | 0,00 | 5,38 | 112,04 |
| 29 | 0,25 | 7,19 | 0,04 | 0,71 | 0,00 | 0,00 | 0,08 | 2,58 | 0,50 | 10,41 |
| 30 | 0,04 | 1,11 | 0,09 | 1,48 | 0,06 | 1,02 | 0,00 | 0,00 | 0,23 | 4,71 |
| 31 | 0,10 | 2,77 | 0,35 | 5,69 | 0,32 | 5,15 | 0,00 | 0,00 | 0,53 | 11,08 |
| 32 | 0,21 | 6,05 | 0,87 | 14,02 | 0,76 | 12,25 | 0,00 | 0,00 | 0,88 | 18,26 |
| 33 | 0,06 | 1,78 | 0,21 | 3,33 | 0,16 | 2,60 | 0,00 | 0,00 | 0,19 | 3,88 |
| 34 | 0,04 | 1,18 | 0,21 | 3,34 | 0,16 | 2,60 | 0,00 | 0,00 | 0,07 | 1,44 |
| 35 | 0,03 | 0,87 | 0,11 | 1,79 | 0,09 | 1,39 | 0,00 | 0,00 | 0,06 | 1,15 |
| 36 | 0,05 | 1,51 | 0,26 | 4,27 | 0,20 | 3,29 | 0,00 | 0,00 | 0,14 | 2,91 |
| 37 | 0,06 | 1,73 | 0,03 | 0,52 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,08 | 1,72 |
| 38 | 0,04 | 1,10 | 0,28 | 4,59 | 0,22 | 3,58 | 0,00 | 0,00 | 0,16 | 3,25 |
| 39 | 0,03 | 0,86 | 0,12 | 1,87 | 0,09 | 1,39 | 0,00 | 0,00 | 0,09 | 1,94 |
| 40 | 0,23 | 6,49 | 0,28 | 4,49 | 0,21 | 3,35 | 0,00 | 0,00 | 0,22 | 4,51 |
| 41 | 0,12 | 3,50 | 0,62 | 10,05 | 0,50 | 8,07 | 0,00 | 0,00 | 0,46 | 9,50 |
| 42 | 0,19 | 5,47 | 0,65 | 10,46 | 0,53 | 8,53 | 0,00 | 0,00 | 2,08 | 43,39 |
| 43 | 0,19 | 5,39 | 0,86 | 13,95 | 0,67 | 10,82 | 0,00 | 0,00 | 1,61 | 33,62 |
| 44 | 0,11 | 3,04 | 0,03 | 0,40 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,13 | 2,67 |
| 45 | 0,18 | 5,02 | 0,78 | 12,59 | 0,62 | 10,05 | 0,00 | 0,00 | 1,23 | 25,58 |
| 46 | 0,00 | 0,00 | 0,44 | 7,08 | 0,04 | 0,64 | 0,00 | 0,00 | 0,10 | 1,98 |
| 47 | 0,10 | 2,92 | 1,36 | 21,85 | 0,38 | 6,05 | 0,00 | 0,00 | 1,23 | 25,69 |
| 48 | 0,28 | 7,82 | 0,09 | 1,37 | 0,13 | 2,15 | 0,00 | 0,00 | 0,25 | 5,21 |
| 49 | 0,08 | 2,17 | 0,17 | 2,71 | 0,13 | 2,15 | 0,00 | 0,00 | 0,16 | 3,38 |
| 50 | 0,08 | 2,26 | 0,20 | 3,27 | 0,14 | 2,25 | 0,00 | 0,00 | 0,22 | 4,48 |
| 51 | 0,21 | 5,84 | 0,04 | 0,60 | 0,05 | 0,87 | 0,14 | 4,47 | 0,25 | 5,26 |

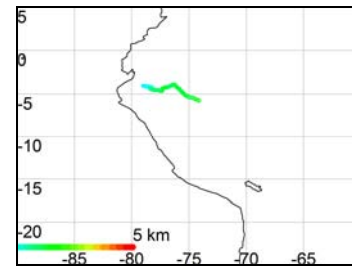
| Probe | Cl ⁻ | | NO ₃ ⁻ | | NO ₃ ⁻ (IC) | | PO ₄ ³⁻ | | SO ₄ ²⁻ | |
|-------|-----------------|--------|------------------------------|--------|-----------------------------------|--------|-------------------------------|-------|-------------------------------|--------|
| | mg/L | µeq/L | mg/L | µeq/L | mg/L | µeq/L | mg/L | µeq/L | mg/L | µeq/L |
| 52 | 0,24 | 6,80 | 0,53 | 8,58 | 0,51 | 8,25 | 0,00 | 0,00 | 0,75 | 15,71 |
| 53 | 0,36 | 10,22 | 1,28 | 20,69 | 1,05 | 16,93 | 0,07 | 2,22 | 1,34 | 27,86 |
| 54 | 0,17 | 4,81 | 0,38 | 6,06 | 0,31 | 5,00 | 0,00 | 0,00 | 0,45 | 9,32 |
| 55 | 0,13 | 3,56 | 0,16 | 2,63 | 0,17 | 2,68 | 0,00 | 0,00 | 0,17 | 3,51 |
| 56 | 0,10 | 2,71 | 0,08 | 1,23 | 0,08 | 1,26 | 0,00 | 0,00 | 0,32 | 6,56 |
| 57 | 0,47 | 13,28 | 3,19 | 51,42 | 2,51 | 40,46 | 0,00 | 0,00 | 2,90 | 60,44 |
| 58 | 0,09 | 2,56 | 0,03 | 0,55 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,13 | 2,74 |
| 59 | 0,63 | 17,89 | 3,58 | 57,78 | 2,92 | 47,03 | 0,00 | 0,00 | 3,20 | 66,64 |
| 60 | 3,15 | 88,97 | 17,74 | 286,04 | 14,79 | 238,48 | 0,11 | 3,49 | 16,24 | 338,05 |
| 61 | 4,79 | 135,10 | 37,15 | 599,21 | 28,15 | 453,99 | 0,18 | 5,75 | 22,93 | 477,38 |
| 62 | 0,44 | 12,29 | 6,38 | 102,85 | 4,05 | 65,36 | 0,13 | 4,16 | 5,55 | 115,51 |
| 63 | 0,48 | 13,41 | 4,41 | 71,07 | 2,82 | 45,43 | 0,00 | 0,00 | 5,46 | 113,57 |
| 64 | 0,26 | 7,21 | 1,27 | 20,51 | 1,38 | 22,30 | 0,07 | 2,18 | 2,11 | 43,96 |
| 65 | 0,34 | 9,71 | 3,56 | 57,34 | 2,85 | 46,00 | 0,10 | 3,27 | 3,18 | 66,16 |
| 66 | 0,34 | 9,65 | 3,58 | 57,71 | 2,78 | 44,81 | 0,13 | 4,18 | 3,09 | 64,35 |
| 67 | 0,26 | 7,29 | 0,52 | 8,38 | 0,41 | 6,63 | 0,22 | 6,85 | 0,71 | 14,76 |
| 68 | 0,09 | 2,64 | 0,51 | 8,20 | 0,23 | 3,64 | 0,00 | 0,00 | 0,40 | 8,36 |
| 69 | 0,30 | 8,44 | 3,98 | 64,23 | 2,75 | 44,30 | 0,00 | 0,00 | 2,64 | 55,06 |
| 70 | 0,44 | 12,52 | 4,01 | 64,61 | 3,34 | 53,85 | 0,00 | 0,00 | 3,06 | 63,80 |
| 71 | 0,36 | 10,16 | 4,01 | 64,64 | 3,17 | 51,08 | 0,00 | 0,00 | 2,93 | 61,00 |
| 72 | 1,01 | 28,63 | 13,33 | 214,95 | 10,39 | 167,61 | 0,10 | 3,12 | 5,57 | 115,90 |
| 73 | 1,06 | 29,85 | 13,24 | 213,53 | 11,07 | 178,49 | 0,11 | 3,46 | 5,84 | 121,51 |
| 74 | 0,66 | 18,49 | 7,07 | 114,09 | 6,45 | 103,97 | 0,10 | 3,14 | 6,14 | 127,87 |
| 75 | 0,61 | 17,20 | 7,05 | 113,66 | 5,83 | 94,03 | 0,00 | 0,00 | 5,63 | 117,15 |
| 76 | 1,21 | 34,23 | 7,69 | 124,01 | 7,18 | 115,87 | 0,10 | 3,14 | 6,34 | 131,96 |
| 77 | 1,02 | 28,80 | 7,74 | 124,75 | 5,84 | 94,18 | 0,10 | 3,05 | 5,09 | 105,98 |
| 78 | 0,69 | 19,45 | 7,13 | 114,94 | 5,63 | 90,82 | 0,00 | 0,00 | 4,77 | 99,26 |
| 79 | 0,46 | 13,03 | 7,12 | 114,81 | 5,95 | 95,97 | 0,00 | 0,00 | 5,05 | 105,09 |
| 80 | 0,65 | 18,20 | 8,47 | 136,57 | 6,88 | 110,99 | 0,09 | 2,77 | 5,40 | 112,43 |
| 81 | 0,99 | 27,93 | 8,42 | 135,75 | 8,23 | 132,80 | 0,08 | 2,49 | 6,52 | 135,77 |
| 82 | 0,46 | 13,10 | 3,68 | 59,35 | 3,27 | 52,70 | 0,00 | 0,00 | 2,90 | 60,32 |
| 83 | 0,42 | 11,84 | 3,67 | 59,23 | 3,05 | 49,16 | 0,00 | 0,00 | 2,70 | 56,22 |
| 84 | 0,19 | 5,25 | 0,06 | 0,89 | 0,08 | 1,32 | 0,00 | 0,00 | 0,65 | 13,56 |
| 85 | 0,18 | 4,99 | 0,06 | 0,98 | 0,05 | 0,77 | 0,00 | 0,00 | 0,63 | 13,14 |
| 86 | 0,40 | 11,25 | 3,86 | 62,33 | 3,43 | 55,24 | 0,00 | 0,00 | 2,86 | 59,54 |
| 87 | 0,34 | 9,64 | 3,89 | 62,72 | 3,22 | 51,91 | 0,00 | 0,00 | 2,68 | 55,77 |
| 88 | 0,32 | 8,92 | 1,60 | 25,84 | 1,45 | 23,42 | 0,00 | 0,00 | 1,60 | 33,29 |
| 89 | 0,27 | 7,68 | 1,62 | 26,15 | 1,43 | 23,12 | 0,00 | 0,00 | 1,51 | 31,49 |
| 90 | 0,044 | 1,244 | 0,022 | 0,355 | 0,000 | 0,000 | 0,00 | 0,00 | 0,000 | 0,000 |

ANHANG 3: RÜCKWÄRTSTRAJEKTORIEN (120 STD.) FÜR JEDE PROBENAHME**AUSGEHEND VOM MESSORT „EL TIRO“**

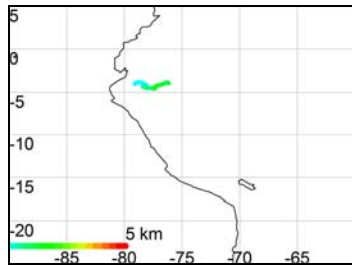
3.11.2003, 16 Uhr Ortszeit



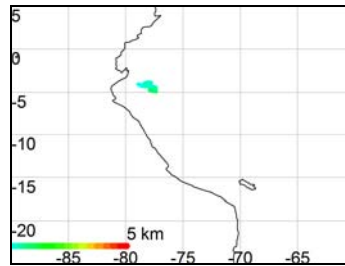
4.11.2003, 13 Uhr Ortszeit



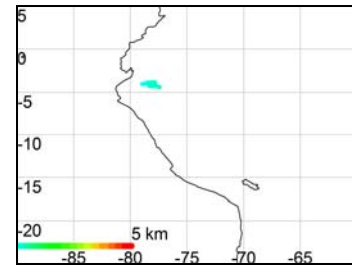
8.11.2003, 13 Uhr Ortszeit



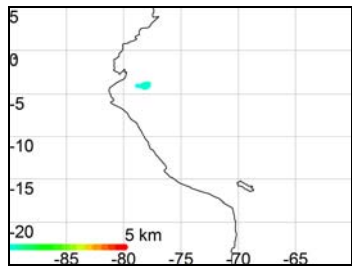
9.11.2003, 12 Uhr Ortszeit



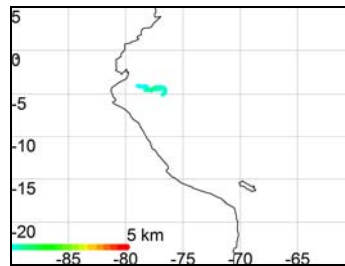
11.11.2003, 12 Uhr Ortszeit



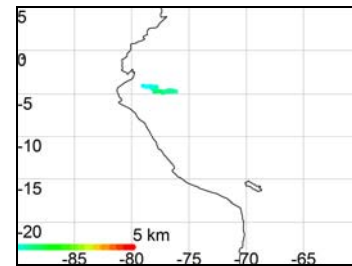
12.11.2003, 12 Uhr Ortszeit



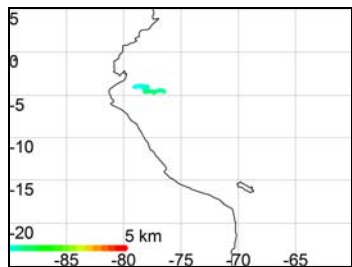
13.11.2003, 12 Uhr Ortszeit



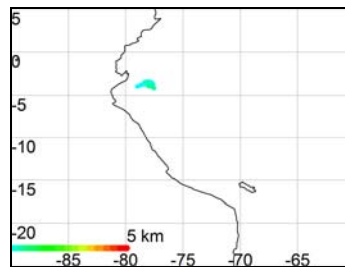
15.11.2003, 15 Uhr Ortszeit



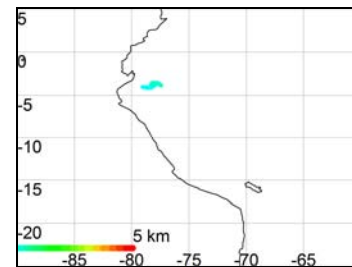
16.11.2003, 15 Uhr Ortszeit



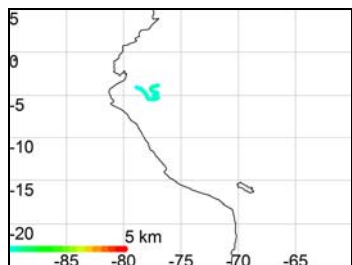
17.11.2003, 10 Uhr Ortszeit



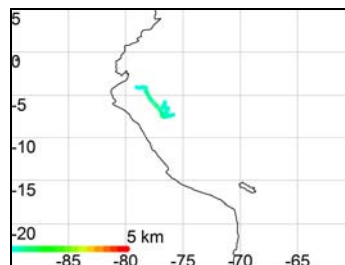
19.11.2003, 11 Uhr Ortszeit



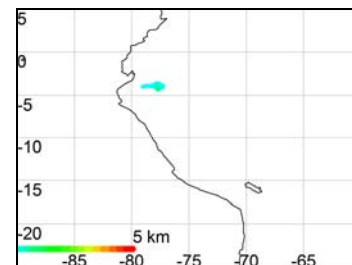
20.11.2003, 12 Uhr Ortszeit



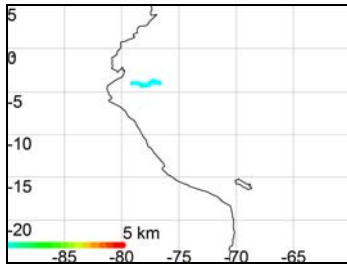
22.11.2003, 11 Uhr Ortszeit



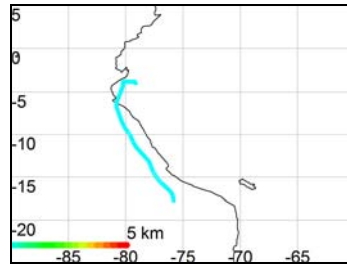
23.11.2003, 10 Uhr Ortszeit



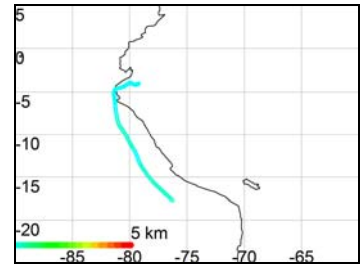
27.11.2003, 9 Uhr Ortszeit



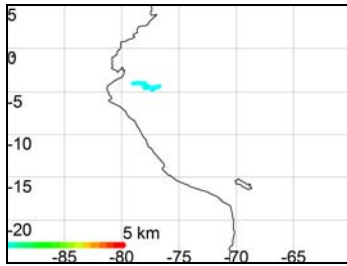
28.11.2003, 9 Uhr Ortszeit



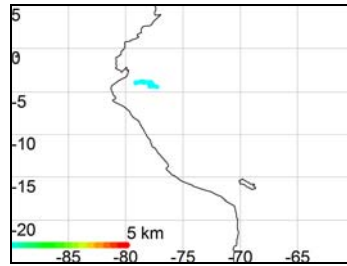
30.11.2003, 10 Uhr Ortszeit



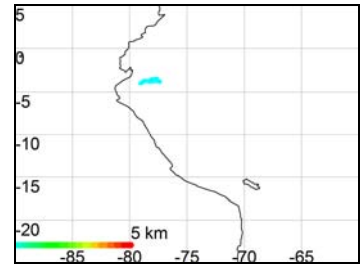
2.12.2003, 10 Uhr Ortszeit



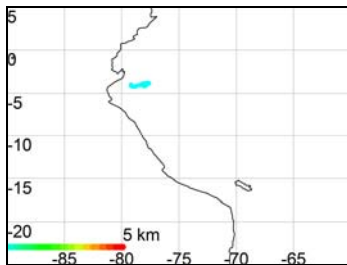
10.12.2003, 9 Uhr Ortszeit



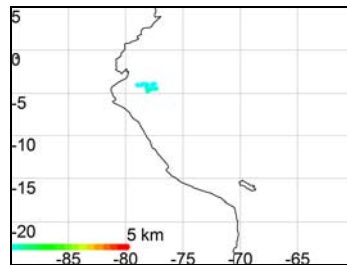
12.12.2003, 10 Uhr Ortszeit



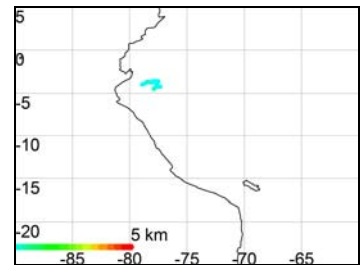
13.12.2003, 9 Uhr Ortszeit



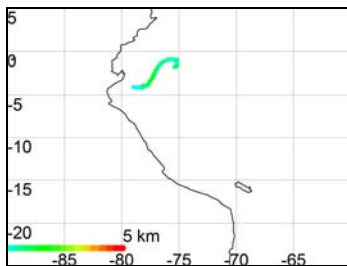
14.12.2003, 09 Uhr Ortszeit



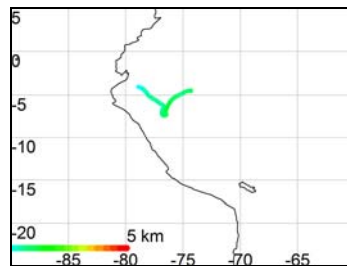
15.12.2003, 15 Uhr Ortszeit



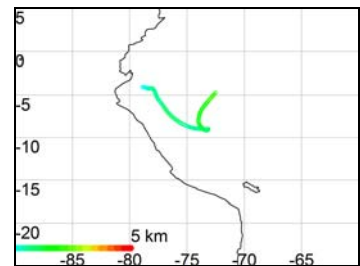
16.12.2003, 11 Uhr Ortszeit



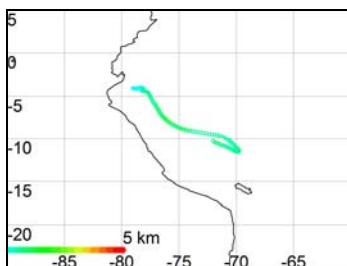
18.11.2003, 10 Uhr Ortszeit



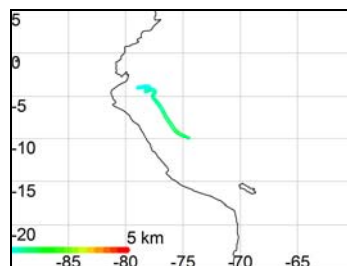
19.12.2003, 11 Uhr Ortszeit



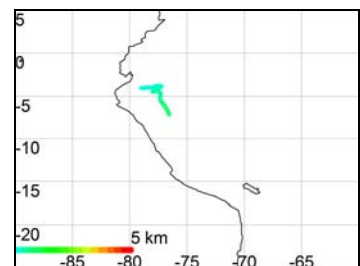
20.12.2003, 15 Uhr Ortszeit



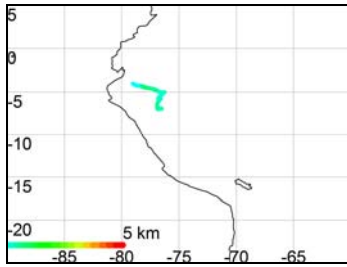
21.12.2003, 10 Uhr Ortszeit



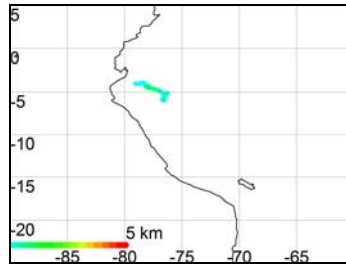
23.12.2003, 10 Uhr Ortszeit



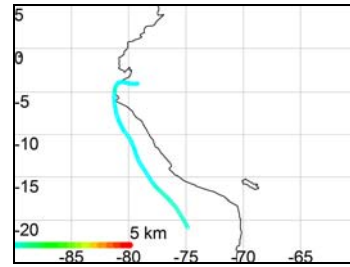
24.12.2003, 16 Uhr Ortszeit



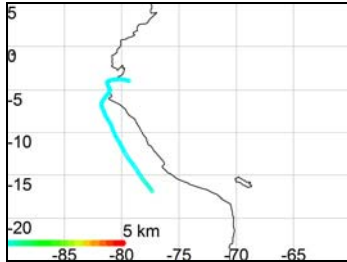
25.12.2003, 15 Uhr Ortszeit



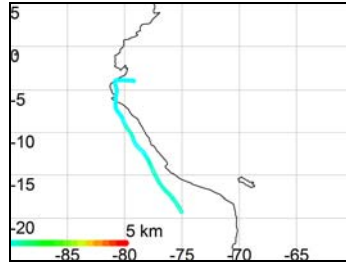
26.12.2003, 14 Uhr Ortszeit



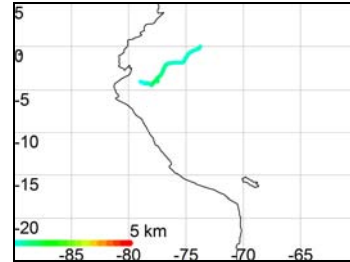
27.12.2003, 10 Uhr Ortszeit



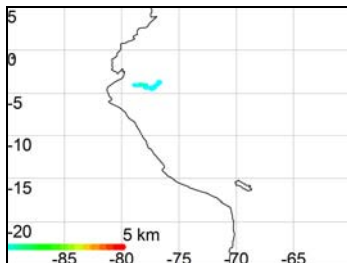
28.12.2003, 15 Uhr Ortszeit



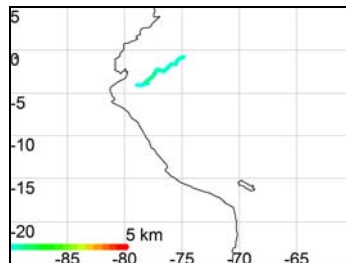
30.12.2003, 11 Uhr Ortszeit



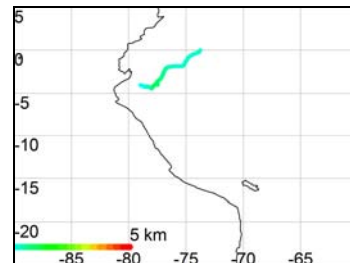
31.12.2003, 17 Uhr Ortszeit



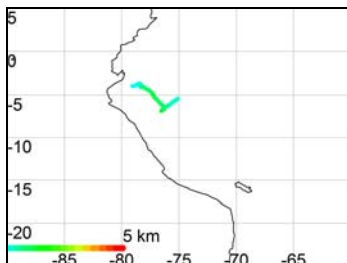
1.1.2004, 15 Uhr Ortszeit



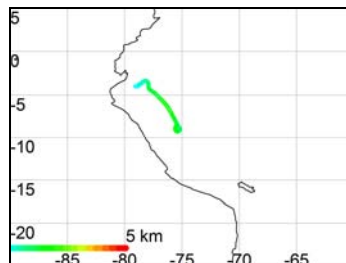
2.1.2004, 16 Uhr Ortszeit



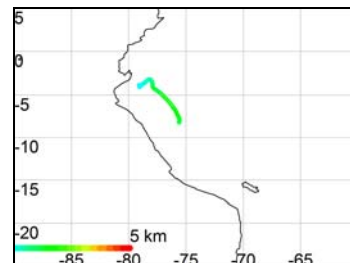
3.1.2004, 15 Uhr Ortszeit



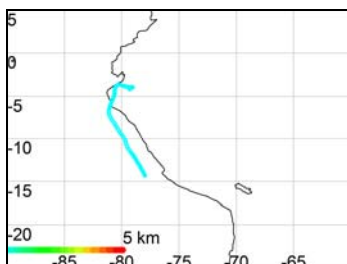
4.1.2004, 15 Uhr Ortszeit



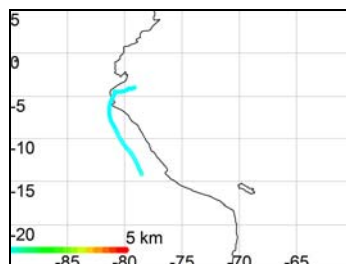
5.1.2004, 15 Uhr Ortszeit



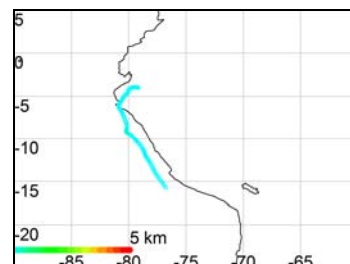
6.1.2004, 15 Uhr Ortszeit



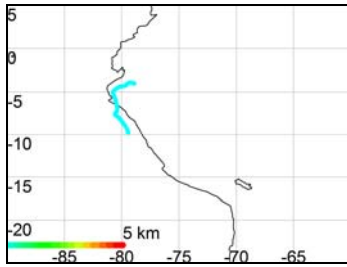
7.1.2004, 16 Uhr Ortszeit



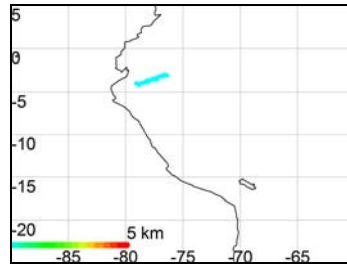
8.1.2004, 15 Uhr Ortszeit



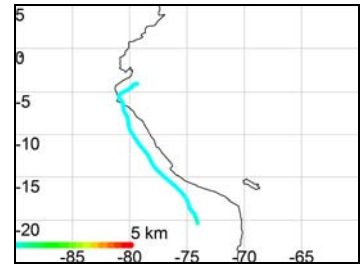
10.1.2004, 15 Uhr Ortszeit



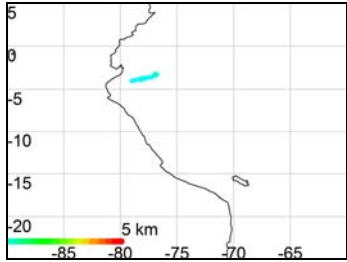
11.1.2004, 13 Uhr Ortszeit



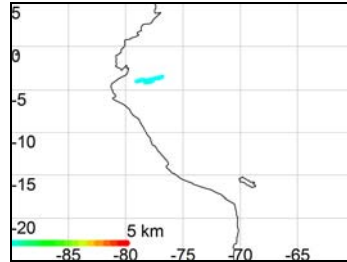
12.1.2004, 14 Uhr Ortszeit



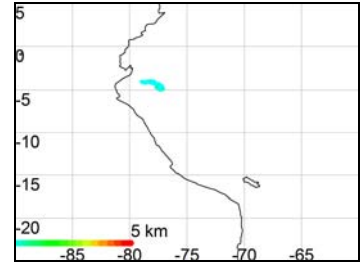
15.1.2004, 15 Uhr Ortszeit



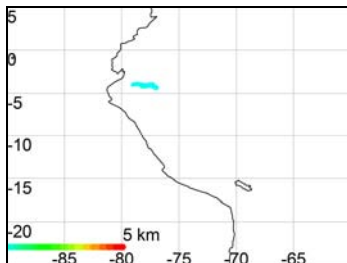
26.1.2004, 10 Uhr Ortszeit



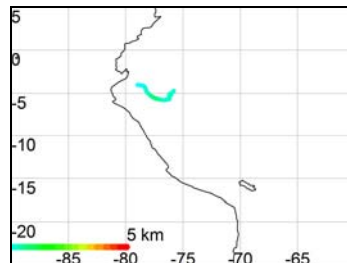
27.1.2004, 15 Uhr Ortszeit



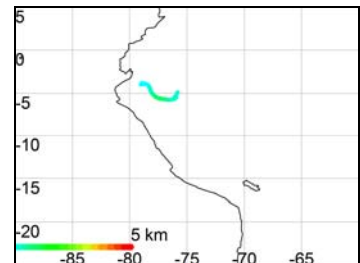
29.1.2004, 15 Uhr Ortszeit



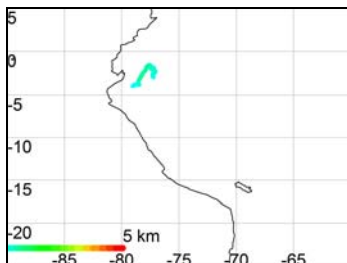
31.1.2004, 9 Uhr Ortszeit



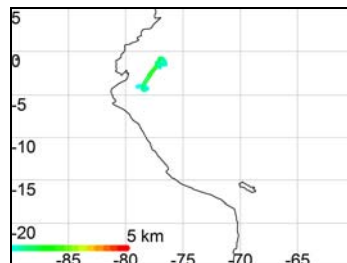
2.2.2004, 14 Uhr Ortszeit



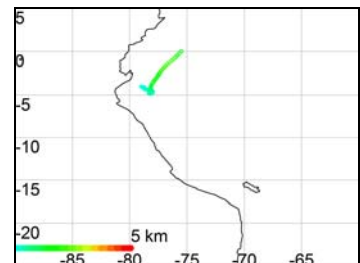
5.2.2004, 15 Uhr Ortszeit



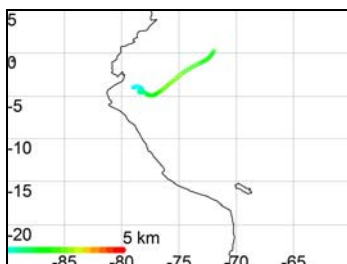
6.2.2004, 9 Uhr Ortszeit



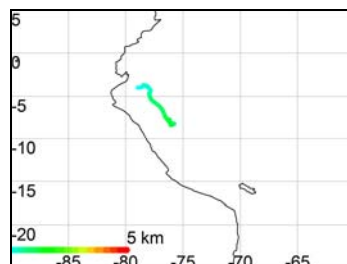
7.2.2004, 12 Uhr Ortszeit



8.2.2004, 14 Uhr Ortszeit



9.2.2004, 9 Uhr Ortszeit



10.2.2004, 15 Uhr Ortszeit

ERKLÄRUNG

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig verfasst und keine anderen als die von mir angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet habe.

Münster, August 2004