

Direkte Messung und Bewertung des nebelgebundenen Eintrags von Wasser und Spurenstoffen in ein montanes Waldökosystem

Inauguraldissertation

zur Erlangung des Doktorgrades

Dr. rer. nat.

der Fakultät Biologie, Chemie und Geowissenschaften
der Universität Bayreuth

vorgelegt von

Thomas Wrzesinsky

geboren in Wismar

Die Arbeit wurde durchgeführt am
Bayreuther Institut für Terrestrische Ökosystemforschung (BITÖK)

unter Leitung von

Prof. Dr. Otto Klemm.

Bayreuth, im November 2003

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät Biologie, Chemie und Geowissenschaften der Universität Bayreuth genehmigten Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades Doktor der Naturwissenschaften (Dr. rer. nat.).

Die vorliegende Arbeit wurde in der Zeit von November 1999 bis November 2003 in der Abteilung Klimatologie des Bayreuther Instituts für Terrestrische Ökosystemforschung (BITÖK) der Universität Bayreuth angefertigt.

Die Arbeit wurde eingereicht am 24. November 2003.

Das wissenschaftliche Kolloquium fand statt am 11. Februar 2004.

Der Prüfungsausschuss bestand aus:

Prof. Dr. John D. Tenhunen	(Vorsitzender)
Prof. Dr. Otto Klemm	(Erstgutachter)
Prof. Dr. Thomas Foken	(Zweitgutachter)
Prof. Dr. Egbert Matzner	
Prof. Dr. Stefan Peiffer	

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	i
Abbildungsverzeichnis.....	iii
Tabellenverzeichnis.....	viii
Danksagung.....	x
Zusammenfassung.....	xi
Summary.....	xii
1 Einleitung.....	1
1.1 Allgemeines.....	1
1.2 Definitionen.....	2
1.3 Zielsetzung.....	3
2 Messort und Methodik.....	4
2.1 Messort.....	4
2.2 Methodik.....	8
2.2.1 Meteorologische Messungen.....	8
2.2.2 Nebelwassersammler.....	10
2.2.2.1 Allgemeines.....	10
2.2.2.2 Materialien.....	13
2.2.2.3 Aufbau.....	13
2.2.2.4 Betrieb.....	16
2.2.2.5 Berechnung der Sammeleigenschaften.....	17
2.2.3 Messung der Nebelwasser-Deposition.....	20
2.2.3.1 Berechnungsverfahren.....	20
2.2.3.2 Messinstrumentation.....	23
2.2.3.3 Datenerfassung.....	28
2.2.3.4 Datenverarbeitung und Qualitätskontrolle.....	29
2.2.4 Berechnung von Tropfengrößenverteilung und Flüssigwassergehalt.....	30
2.2.5 Regenwassersammler.....	30
2.2.6 Chemische Analytik.....	31
2.2.7 Berechnung des nebelgebundenen Spurenstoffeintrags.....	32
3 Messergebnisse.....	33
3.1 Messzeitraum.....	33
3.2 Meteorologische Daten.....	33
3.2.1 Lufttemperatur.....	33
3.2.2 Relative Luftfeuchtigkeit.....	35
3.2.3 Niederschlag.....	36
3.2.4 Wind.....	38
3.2.5 Sichtweite.....	39
3.3 Nebelwasser-Sammelergebnisse.....	41
3.4 Nebelcharakterisierung mit dem FM-100.....	42
3.4.1 Tropfengrößen-Verteilung.....	42
3.4.2 Flüssigwassergehalt.....	44
3.5 Nebelwassereintrag.....	48
3.5.1 Qualitätskontrolle.....	48
3.5.2 Saisonale Verteilung und Gesamtfluss.....	51
3.5.3 Einzelereignis-Flüsse.....	52
3.5.4 Abhängigkeit des Nebelwasserflusses von der Tropfengröße.....	55
3.6 Chemische Zusammensetzung der Nebelproben.....	57
3.6.1 Allgemeines.....	57
3.6.2 Konzentration der wichtigsten Ionen, pH-Wert und elektrische Leitfähigkeit.....	57

3.7 Chemische Zusammensetzung der wet-only-Niederschlagswasserproben.....	66
3.7.1 Allgemeines.....	66
3.7.2 Konzentration der wichtigsten Ionen, pH-Wert und elektrische Leitfähigkeit.....	66
3.8 Eintrag von Spurenstoffen durch Nebel.....	68
3.9 Eintrag von Spurenstoffen durch Regen.....	69
3.10 Ökosystem-Bilanzdaten für den Waldstein.....	70
4 Diskussion.....	73
4.1 Charakterisierung des Messzeitraums.....	73
4.2 Messung von Flüssigwassergehalt und Nebelwasserfluss.....	77
4.3 Die Nebelwasser-Sammelergebnisse.....	83
4.4 Nebelwasser-Chemie.....	84
4.5 Vergleich von turbulenter und sedimentativer Deposition.....	89
4.6 Vergleich der Bedeutung von Regen und Nebel am Standort.....	90
4.6.1 Wassereintrag.....	90
4.6.2 Spurenstoffeintrag und Ökosystem-Bilanz.....	91
4.7 Möglichkeiten von Parametrisierungen der Nebelwasserdeposition.....	93
5 Schlussfolgerungen und Ausblick.....	98
5.1 Schlussfolgerungen.....	98
5.2 Ausblick.....	99
6 Literaturverzeichnis.....	101
Anhang A: Nebelereignisse: Probenbezeichnung, Sammeldaten.....	A1
Anhang B: Chemische Zusammensetzung der Nebelwasserproben – Kationen.....	A11
Anhang C: Chemische Zusammensetzung der Nebelwasserproben – pH-Wert, Anionen und elektrische Leitfähigkeit.....	A21
Anhang D: Gemessene Nebelwasserflüsse, Verteilungsmaxima, Flüssigwassergehalte und Sichtweiten für die Nebelereignisse.....	A31
Anhang E: Feuchte Deposition der wichtigsten anorganischen Ionen.....	A37
Anhang F: Nasse Deposition der wichtigsten anorganischen Ionen.....	A41

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Übersichtskarte mit dem Untersuchungsgebiets am Waldstein (siehe auch Detailkarte in Abbildung 3). Quelle: Ausschnitt aus der Karte Bundesrepublik Deutschland 1:1 Mio [Bayerisches Landesvermessungsamt 2001, verändert].....	4
Abbildung 2: Das Fichtelgebirge in perspektivischer Höhenreliefdarstellung mit einigen ausgewählten Kartenpunkten (Eigene Darstellung, Grundlage: Digital Elevation Model aus [Bayerisches Landesvermessungsamt 2001], Darstellung überhöht und perspektivisch verzerrt).....	5
Abbildung 3: Karte des mittleren Waldstein-Gebirges mit den Untersuchungsflächen des BITÖK. Ausschnitt aus der Topographischen Karte 1:50000, Quelle: [Bayerisches Landesvermessungsamt 2001].....	6
Abbildung 4: Zeichnung des Present Weather Detector PWD11 [Wrzesinsky 1998, verändert]..	10
Abbildung 5: Der „Bayreuth Heatable Active Strand Cloudwater Collector“ (BCC) im Schema (nicht vollständig maßstäblich, eigene Zeichnung).....	12
Abbildung 6: Der BCC-Nebelsammler auf dem Messturm „Weidenbrunnen“. Links das Ventilatorteil, in der Mitte das Zusatzmodul zur Sammlung interstitiellen Aerosols, rechts das Sammelteil mit der Schutzhaube	12
Abbildung 7: Die Nebelharfen. Eine der Harfen ist zum Reinigen herausgezogen.....	14
Abbildung 8: Der verwendete ISCO-Autosampler mit Nebelproben (eigenes Foto).....	17
Abbildung 9: Luftgeschwindigkeitsverteilung [m s^{-1}] im Querprofil des Einlasses des verwendeten BCC-Nebelsammlers. Die Linien sind Isotachen der Luft. Die Kreuze markieren die Messpunkte. Die Daten wurden für die Darstellung interpoliert und die Isotachen geglättet..	18
Abbildung 10: Sammeleffizienz des BCC-Nebelsammlers im Vergleich mit dem CASCC. Die gepunkteten Linien geben die Lage der jeweiligen cut size (50%-Sammeleffizienz) und der theoretischen Sammeleffizienz (Asymptote der Grafen) an.....	19
Abbildung 11: Das Nebeltropfenspektrometer FM-100 in der Ansicht von hinten im eingebauten Zustand. Quelle: eigenes Foto.....	24
Abbildung 12: Front- und Rückansicht (rechts) des Tropfenspektrometers FM-100 von Droplet Measurement Technologies (DMT). Quelle: [DMT 1999].....	24
Abbildung 13: Schaltungschema des Depositionssystems am Waldstein. Die Linien zwischen den Geräten geben die Kabelführung an, die Beschriftung die Art der übertragenen Daten (RS232 = serielle Daten, U = Spannungswert, 0/1 = aus/an, Rotor-Drehrichtung).....	25
Abbildung 14: Temperaturverlauf während des Experiments „Gerätevergleich“ 2000. Messort: Waldstein, Pflanzgarten (2 m Messhöhe). Quelle: BITÖK-Datenbank.....	34
Abbildung 15: Temperaturverlauf während der ersten Hälfte des Hauptexperiments 2001/2002. Messort: Waldstein , Pflanzgarten (2 m Messhöhe). Quelle: BITÖK-Datenbank.....	34
Abbildung 16: Temperaturverlauf während der zweiten Hälfte des Hauptexperiments 2001/2002. Messort: Waldstein , Pflanzgarten (2 m Messhöhe). Quelle: BITÖK-Datenbank.....	35
Abbildung 17: Gang der relativen Luftfeuchte während des Gerätevergleichs 2000. Messort: Waldstein, Weidenbrunnen-Turm (Messhöhe: 25 m über Grund). Quelle: BITÖK-Datenbank.	35
Abbildung 18: Gang der relativen Luftfeuchte während der ersten Hälfte des Hauptuntersuchungszeitraums 2001/2002. Messort: Waldstein, Weidenbrunnen-Turm (Messhöhe: 25 m über Grund). Quelle: BITÖK-Datenbank.....	36

Abbildung 19: Gang der relativen Luftfeuchte während des Hauptuntersuchungszeitraums 2001/2002. Messort: Waldstein, Weidenbrunnen-Turm (Messhöhe: 25 m über Grund). Quelle: BITÖK-Datenbank.....	36
Abbildung 20: Niederschlag am Waldstein 2000. Messort: Pflanzgarten. Dargestellt sind die Tages- und Monatssummen (kleines Diagramm, Korrektur nach [Rebmann et al. 2004]). Quelle: BITÖK-Datenbank.....	37
Abbildung 21: Niederschlag am Waldstein 2001. Erklärung siehe Abbildung 20.....	37
Abbildung 22: Niederschlag am Waldstein 2002. Erklärung siehe Abbildung 20.....	38
Abbildung 23: Windrichtungsverteilung am Waldstein während des Hauptmesszeitraums 2001/2002 (1.4.2001 bis 31.3.2002). Messort: Waldstein, Weidenbrunnen-Turm (Messhöhe: 32 m über Grund). Dargestellt sind die Häufigkeiten der Hauptwindrichtungen, kumuliert über die gemessenen Windgeschwindigkeiten in 1 m s^{-1} -Klassen (innerstes Achteck entspricht der Häufigkeitsverteilung bei Windgeschwindigkeiten bis 1 m s^{-1} usw., letztes Achteck umfasst alle Geschwindigkeiten bis zum Maximum von 12 m s^{-1}). Quelle: BITÖK-Datenbank.....	39
Abbildung 24: Anzahl der monatlichen Nebeltage (Tage mit Nebel, Säulen im Hintergrund) und die monatliche Verteilung der Sichtweitenklassen (gestapelte Säulen) für alle Nebelereignisse für die Jahre 1997 bis 2002 am Waldstein, sowie die jeweilige Vollständigkeit des Datensatzes (gemessen an den möglichen 10-min-Werten).....	40
Abbildung 25: Mediane Tropfengrößenverteilung des Nebelwassers am Waldstein 2001/2002. Datengrundlage: ausgewertete 5-min-Werte des FM-100. Dargestellt sind Anzahl- und Massengrößenverteilung (LWC).....	42
Abbildung 26: Verteilung der Maxima der Anzahlgrößenverteilungen der Nebeltropfen am Waldstein auf Grundlage der gemessenen 5-min-Werte.....	43
Abbildung 27: Verteilung der Maxima der Massengrößenverteilungen der Nebeltropfen am Waldstein auf Grundlage der gemessenen 5-min-Werte. Erläuterung siehe Text.....	43
Abbildung 28: Anzahl der Verteilungen (logarithmische Schwarz-Weiß-Skala) mit einem bestimmten Massenverteilungsmaximum (x-Achse, als Größenklasse) und einem gemessenen Gesamtflüssigwassergehalt (y-Achse, in 10-mg m^{-3} -Klassen). Datengrundlage: 5-min-Werte am Waldstein ohne Kanal 40.....	44
Abbildung 29: Häufigkeitsverteilung der gemessenen Flüssigwassergehalte am Waldstein. Graue Säulen: absolute Häufigkeit des Messwertes, Linie: kumulierte (Summen-) Häufigkeit der Werte. Datengrundlage: 5-min-Messwerte 2001/2002 von der Station Weidenbrunnen, Waldstein.....	45
Abbildung 30: Flüssigwassergehalte der Luft während der Nebelereignisse vom 2.4.2001 bis zum 2.7.2001. Datengrundlage: 5-min-Werte des FM-100.....	45
Abbildung 31: Flüssigwassergehalte der Luft während der Nebelereignisse vom 2.7.2001 bis zum 1.10.2001. Datengrundlage: 5-min-Werte des FM-100.....	46
Abbildung 32: Flüssigwassergehalte der Luft während der Nebelereignisse vom 1.10.2001 bis zum 31.12.2001. Datengrundlage: 5-min-Werte des FM-100.....	46
Abbildung 33: Flüssigwassergehalte der Luft während der Nebelereignisse vom 31.12.2001 bis zum 1.4.2002. Datengrundlage: 5-min-Werte des FM-100.....	47
Abbildung 34: Verteilung der time lags für alle Messungen des Young 81000/FM-100-Systems. Datengrundlage: Alle Messungen (30-min-Werte) 2001/2002.....	48

- Abbildung 35: Vergleich der 5-min- und 30-min-Varianzen von Wind (u, v, w), Temperatur und Flüssigwassergehalt (LWC) zum Test der Stationarität nach [Foken und Wichura 1996]. Die Säulen stellen die jeweilige Klassenhäufigkeit (linke y-Achse), die Linien die kumulierten Häufigkeiten (rechte y-Achse) dar. Auf der Abszisse ist die Differenz zwischen beiden Werten, normiert auf den 30-min-Wert, abgebildet..... 50
- Abbildung 36: Monatlicher turbulenter Nebelwassereintrag am Standort Weidenbrunnen, Waldstein für 2001/2002. Alle Monatsflüsse sind Einträge in das Ökosystem. Datengrundlage: Messwerte vom 17.4.2001 bis zum 31.3.2002..... 51
- Abbildung 37: Monatlicher sedimentativer Nebelwassereintrag am Standort Weidenbrunnen, Waldstein für 2001/2002. Datengrundlage: Messwerte vom 2.4.2001 bis 2.4.2002..... 52
- Abbildung 38: Nebelwasserfluss (turbulent und gravitativ) am Waldstein während der Nebelereignisse 2001/2002: Nebelereignisse N191 bis N249. Positive Flüsse bedeuten Emission, negative Deposition. Datengrundlage: 30-min-Messwerte des Nebeldepositions- setups am Weidenbrunnen, Waldstein..... 53
- Abbildung 39: Nebelwasserfluss (turbulent und gravitativ) am Waldstein während der Nebelereignisse 2001/2002: Nebelereignisse N250 bis N300. Positive Flüsse bedeuten Emission, negative Deposition. Datengrundlage: 30-min-Messwerte des Nebeldepositions- setups am Weidenbrunnen, Waldstein..... 53
- Abbildung 40: Nebelwasserfluss (turbulent und gravitativ) am Waldstein während der Nebelereignisse 2001/2002: Nebelereignisse N301 bis N352. Positive Flüsse bedeuten Emission, negative Deposition. Datengrundlage: 30-min-Messwerte des Nebeldepositions- setups am Weidenbrunnen, Waldstein..... 54
- Abbildung 41: Nebelwasserfluss am Waldstein während der Nebelereignisse 2001/2002: Nebelereignisse N353 bis N404. Positive Flüsse bedeuten Emission, negative Deposition. Datengrundlage: 30-min-Messwerte des Nebeldepositions- setups am Weidenbrunnen, Waldstein..... 54
- Abbildung 42: Nebelwasserfluss am Waldstein während der Nebelereignisse 2001/2002: Nebelereignisse N405 bis N445. Positive Flüsse bedeuten Emission, negative Deposition. Datengrundlage: 30-min-Messwerte des Nebeldepositions- setups am Weidenbrunnen, Waldstein..... 55
- Abbildung 43: Abhängigkeit des turbulenten Gesamtflusses 2001/2002 von der Tropfengröße 56
- Abbildung 44: Anteil der 30-min-Werte mit Emission von Nebelwasser für die 40 Tropfengrößenklassen..... 56
- Abbildung 45: Die Stabilitätsdiagramme von Sulfat (links) und Phosphat (rechts). Die senkrechten Linien zeigen den gemessenen pH-Wert-Bereich..... 59
- Abbildung 46: Vergleich der gemessenen elektrischen Leitfähigkeit mit der berechneten. Die Linie gibt das 1:1-Verhältnis an..... 60
- Abbildung 47: Chemische Zusammensetzung der Nebelproben N001 bis N050 (2.2. bis 28.5.2000). Der untere Teil der Abbildung: P = Nebelereignis, n.a. = Nebelereignis, nicht analysiert (wegen zu geringer Sammelmengen), B = Blindwert. Oberste Achse: Bezeichnung, unterste Achse: Datum des Ereignisses (wenn verfügbar)..... 60
- Abbildung 48: Chemische Zusammensetzung der Nebelproben N051 bis N100 (31.5.2001 bis 5.10.2001). Ausführliche Beschreibung: siehe Abbildung 47..... 61
- Abbildung 49: Chemische Zusammensetzung der Nebelproben N101 bis N150 (6.10.2000 bis 4.2.2001). Ausführliche Beschreibung: siehe Abbildung 47..... 61

Abbildung 50: Chemische Zusammensetzung der Nebelproben N151 bis N200 (5.2.2001 bis 18.4.2001). Ausführliche Beschreibung: siehe Abbildung 47.....	62
Abbildung 51: Chemische Zusammensetzung der Nebelproben N201 bis N250 (19.4.2001 bis 15.7.2001). Ausführliche Beschreibung: siehe Abbildung 47.....	62
Abbildung 52: Chemische Zusammensetzung der Nebelproben N251 bis N300 (16.7.2001 bis 19.9.2001). Ausführliche Beschreibung: siehe Abbildung 47.....	63
Abbildung 53: Chemische Zusammensetzung der Nebelproben N301 bis N350 (21.9.2001 bis 7.11.2001). Ausführliche Beschreibung: siehe Abbildung 47.....	63
Abbildung 54: Chemische Zusammensetzung der Nebelproben N351 bis N400 (7.11.2001 bis 9.1.2002). Ausführliche Beschreibung: siehe Abbildung 47. Probe 364a wurde nicht analysiert.	64
Abbildung 55: Chemische Zusammensetzung der Nebelproben N401 bis N439 (20.1.2002 bis 23.2.2002). Ausführliche Beschreibung: siehe Abbildung 47.....	64
Abbildung 56: Mediane chemische Zusammensetzung der Nebelwasserproben vom Waldstein, Zeitraum 2000 bis 2002. Gesamtkonzentration: $1633 \mu\text{eq l}^{-1}$	65
Abbildung 57: Mediane Zusammensetzung der wet-only-Niederschlagsproben vom Waldstein (Pflanzgarten) 2.4.2001 bis 25.2.2002 (45 Proben). Gesamtkonzentration: $107,1 \mu\text{eq l}^{-1}$	67
Abbildung 58: Chemische Zusammensetzung der wet-only-Niederschlagsproben aus dem Pflanzgarten, Waldstein für den Zeitraum vom 2.4.2001 bis zum 25.2.2002 und die Niederschläge für den jeweiligen Probenahmezeitraum. Oben dargestellt ist die Probennummer (komplette Nomenklatur: PG WO nnnn, nnnn = Nummer), unten das Probenahmedatum 2001/2002.....	68
Abbildung 59: Monatssummen der feuchten Deposition der wichtigsten anorganischen Ionen am Waldstein während des Hauptuntersuchungszeitraums 2001/2002. Datengrundlage: 30-min-Werte des Depositionssetups und ereignisbezogene chemische Analytik (211 Ereignisse).....	69
Abbildung 60: Monatssummen der nassen Deposition der wichtigsten anorganischen Ionen am Waldstein während des Hauptuntersuchungszeitraums 2001/2002. Datengrundlage: Chemische Analyse von 44 Proben und Niederschlagsdaten aus dem Pflanzgarten, Waldstein zwischen 2.4.2001 und 25.2.2002.....	70
Abbildung 61: Lage der Messflächen für den Bestandesniederschlag I bis IV im Coulissenhieb, Waldstein. Die Punkte markieren Bäume, auf den Waldumbauflächen wird nach einem Kahlschlag ein Teil natürlich verjüngt, ein anderer forstlich aufbereitet. Quelle: [Gerstberger 2003].....	71
Abbildung 62: Durch den Bestandesniederschlag eingetragene anorganische Ionen während des Hauptuntersuchungszeitraums 2001/2002 im Coulissenhieb, Waldstein. Quelle: [Alewell 2003].....	72
Abbildung 63: Vergleich der mittleren monatlichen Temperaturen am Waldstein für die Messphase 2001/2002 mit der Normalreihe. Oben: Verlauf der Temperaturen. Unten: Abweichung von Messzeitraum und Normalreihe. Quelle der Normalreihe: [Foken 2003b]..	73
Abbildung 64: Vergleich der während der Messperiode 2001/2002 gemessenen Niederschläge mit der Normalreihe für den Waldstein. Oben: monatliche Niederschläge. Unten: Abweichung der Messwerte von der Normalreihe. Quelle der Normalreihe: [Foken 2003b].....	74
Abbildung 65: Vergleich der monatlichen Werte für die Anzahl der Nebeltage und den Nebelanteil zwischen dem Hauptuntersuchungszeitraum 2001/2002 und dem Gesamtdatensatz seit 1997 am Waldstein.....	75

Abbildung 66: Tagesgang der Sichtweitenverteilung am Waldstein. Datengrundlage: Sichtweitemessungen 1997 bis 2002. Quelle: BITÖK-Datenbank.....	76
Abbildung 67: Vergleich zwischen PVM100 und FM-100 von gemessenen Flüssigwassergehalten an der Station Lägeren [Burkard et al. 2003] in der Schweiz. Die schwarze Linie ist die 1-zu-1-Linie, die graue ein Fit. Quelle der Grafik: [Burkard 2003].....	79
Abbildung 68: Verteilung der gemessenen Stabilitätsparameter $\zeta = z/L$ (Stabilitätsparameter) für alle gemessenen 30-min-Werte. Labile Schichtungen ($\zeta \leq -0,03$) machen ca. 22 %, neutrale Schichtungen ca. 65 % und stabile Schichtungen ($\zeta \geq +0,02$) ca. 13 % aller betrachteten Fälle aus.....	80
Abbildung 69: Verteilung der gemessenen Schubspannungsgeschwindigkeiten u_* am Waldstein während Nebelereignissen im Hauptuntersuchungszeitraum 2001/2002. Säulen: relative Klassenhäufigkeit, Linie: Kumulierte Häufigkeit. Zu den negativen u_* siehe Kapitel 2.2.3.1....	81
Abbildung 70: Abhängigkeit der Nebelwasserflüsse vom Flüssigwassergehalt. Oben: Sedimentativer Fluss, Mitte: Turbulenter Fluss, Unten: Gesamtfluss.....	82
Abbildung 71: Verteilung der Depositionsgeschwindigkeiten für den turbulenten Fluss während des Hauptuntersuchungszeitraums am Waldstein. Säulen: Relative Klassenhäufigkeit, Linie: Kumulierte Häufigkeit.....	83
Abbildung 72: Vergleich der Flüssigwassergehalte, berechnet aus den Sammeldaten des Nebelsammlers BCC und aus den Tropfenspektren des FM-100 (Basis: 30-min-Werte).....	83
Abbildung 73: Vergleich der mittleren chemischen Zusammensetzung des Nebelwassers am Waldstein mit Literaturwerten, geordnet nach der Gesamtäquivalentkonzentration. Siehe auch Tabelle 27.....	85
Abbildung 74: Die gemessenen Leitfähigkeiten während der Feldexperimente 1997 [Wrzesinsky 1998] und 2000 bis 2002.....	86
Abbildung 75: Größenabhängiger Vergleich von turbulentem und sedimentativem Fluss am Waldstein für den Messzeitraum 2001/2002.....	89
Abbildung 76: Monatliche gemittelter Flüssigwassergehalt während Nebels am Waldstein für den Hauptmesszeitraum 2001/2002.....	91
Abbildung 77: Abhängigkeit der gemessenen Sichtweiten von den gemessenen Nebelwasserflüssen am Waldstein. Oben: Sedimentativer Fluss, Mitte: Turbulenter Fluss, Unten: Gesamtfluss. Die vertikalen Linien (Mitte und Unten) geben die Grenze zwischen Deposition und Emission an.....	94
Abbildung 78: Der Quotient aus turbulentem Fluss und Sichtweite als Funktion der Schubspannungsgeschwindigkeit u_* . Basis: 30-min-Werte.....	95
Abbildung 79: Die turbulente Depositionsgeschwindigkeit v_d als Funktion der Schubspannungsgeschwindigkeit u_* . Die horizontale Linie gibt die Grenze zwischen Deposition und Emission an. Die vertikale Linie kennzeichnet den für diese Arbeit verwendeten Grenzwert für die Schubspannungsgeschwindigkeit an. Basis: 30-min-Werte.....	95
Abbildung 80: Abhängigkeit der monatlichen Deposition von der Andauer des Unterschreitens verschiedener Sichtweiteklassen (100 m, 200 m, 300 m, 500 m, 1000 m und 1700 m) und die jeweilige lineare Regression für die Daten für die Gerade $y = a + bx$ mit dem Korrelationskoeffizienten R	97

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Geografische und Gauß-Krüger-Koordinaten sowie die Höhen über Normalnull (üNN) der BITÖK-Messflächen am Waldstein [Bayerisches Landesvermessungsamt 2001].....	6
Tabelle 2: Messhöhen und Ausrichtung der eingesetzten Geräte am Messturm Weidenbrunnen. Die Messhöhen der beiden Geräte der Universität Bern (GIUB: FM-100 und Gill Solent HS) sind für den Gerätevergleich bzw. den Vertikalvergleich angegeben.....	7
Tabelle 3: Übersicht der meteorologischen und luftchemischen Parameter, die im Rahmen des BITÖK-Routine-Messprogramms gemessen werden und in dieser Arbeit verwendet werden. Die zeitliche Auflösung beträgt 10 min. (Quelle: BITÖK-Datenbank).....	8
Tabelle 4: Wichtige Kenngrößen des Present Weather Detector PWD11 [Vaisala 2001].....	9
Tabelle 5: Spezifikationen des Nebelwasser-Sammelsystem (BCC und Autosampler), Erläuterung siehe Text.....	14
Tabelle 6: Mittlere Sedimentationsgeschwindigkeiten v_s der Nebeltropfen in den 40 vom FM-100 gemessenen Größenklassen in Abhängigkeit vom mittleren Durchmesser d	21
Tabelle 7: Verwendete Größenklassen für die Messungen mit dem Tropfenspektrometer FM-100. Der OPC-Grenzwert ist der intern im FM-100 genutzte Wert (wird über eine vom Hersteller gelieferte Software berechnet). Das Klassenmittel ist der Durchmesser, der für weitere Berechnungen (LWC, Flüsse etc.) als Klassenwert verwendet wurde. Minimum und Maximum beziehen sich auf den Tropfendurchmesser.....	25
Tabelle 8: Kenngrößen zum Tropfenspektrometer FM-100.....	27
Tabelle 9: Datenstruktur in den Rohdateien der Aufzeichnung.....	28
Tabelle 10: Verwendete analytische Verfahren für die Quantifizierung der gemessenen chemischen Parameter und deren Bestimmungsgrenzen [Moser 2003]. Bei der Messung von Nitrat und Sulfat im Regenwasser wurde aufgrund der geringeren Konzentrationen ein Verfahren mit verbesserter Bestimmungsgrenze verwendet.....	31
Tabelle 11: Spezifische Leitfähigkeiten in $\mu\text{S cm}^{-1} \mu\text{eq}^{-1}$ für die gemessenen Ionen. Quelle: [D'Ans und Lax 1992].....	32
Tabelle 12: Beginn, Ende und Länge der verwendeten Datenreihen für die verschiedenen Parameter am Waldstein 2001/2002.....	33
Tabelle 13: Mittlere monatliche und jährliche Zahl der Nebeltage an Stationen in Bayern für 1961 bis 1990. Quellen: 1 = [Enders 1996], 2 = [Böer & Vesecký 1973] und eigene Daten (für Station Waldstein, nur 1997 bis 2002).....	41
Tabelle 14: Statistische Kenngrößen zum Flüssigwassergehalt der Luft während Nebels am Waldstein 2001/2002. Datengrundlage 24996 5-min-Messwerte des FM-100.....	47
Tabelle 15: Statistische Kenngrößen der mittleren Flüssigwassergehalte während 226 Nebelereignissen am Waldstein 2001/2002. Datengrundlage: 30-min-Messwerte des FM-100... ..	47
Tabelle 16: Veränderungen der turbulenten Gesamtdeposition 2001/2002 durch Anwendung der verschiedenen Qualitätskontrollen.....	49
Tabelle 17: Im Gesamtzeitraum genommene Proben und Anzahl der jeweils analysierten Proben. In Klammern die Zahlen für den eigentlichen Messzeitraum vom 1. April 2001 bis 18. März 2002.....	57
Tabelle 18: Statistische Kenngrößen der chemischen Zusammensetzung der Nebelwasserproben vom Waldstein für den Zeitraum 2000 bis 2002: Minima, Maxima und Perzentile. Angegebene Parameter: pH-Wert (pH), elektrische Leitfähigkeit (λ) [$\mu\text{S cm}^{-1}$], Äquivalentkonzentrationen [$\mu\text{eq l}^{-1}$] der Ionen: Wasserstoff (H^+), Natrium (Na^+), Kalium (K^+), Ammonium (NH_4^+), Magnesium (Mg^{2+}), Calcium (Ca^{2+}) und Chlorid (Cl^-), Nitrat (NO_3^-), Phosphat (PO_4^{3-}) sowie Sulfat (SO_4^{2-}). < bedeutet: unter der Bestimmungsgrenze.....	57
Tabelle 19: Statistische Kenngrößen der chemischen Zusammensetzung der Nebelwasserproben vom Waldstein für den Hauptmesszeitraum vom 1.4.2001 bis zum 18.3.2002. Erläuterungen siehe Tabelle 18.....	58

Tabelle 20: Statistische Kenngrößen der chemischen Zusammensetzung der Blindproben vom Waldstein für den Gesamtzeitraum 2000 bis 2002 (n = 22 Proben). Erläuterungen siehe Tabelle 18.....	58
Tabelle 21: Statistische Kenngrößen der nebelgebundenen chemischen Luftbelastung in ng m^{-3} . Datengrundlage 218 Proben aus dem Zeitraum 1.4.2001 bis 18.3.2002 (für H^+ 217 Proben), für die chemische Analysen und der mittlere Flüssigwassergehalt vorliegen. < bedeutet: unter der Bestimmungsgrenze.....	65
Tabelle 22: Statistische Kenngrößen der chemischen Zusammensetzung der wet-only-Niederschlagsproben aus dem Pflanzgarten, Waldstein für die Periode vom 2.4.2001 bis zum 25.2.2002. Dargestellt sind der pH-Wert (pH), die elektrische Leitfähigkeit (λ) in $\mu\text{S cm}^{-1}$ und die Äquivalentkonzentrationen der gemessenen anorganischen Ionen in $\mu\text{eq l}^{-1}$	66
Tabelle 23: Summe der feuchten Deposition der wichtigsten anorganischen Ionen an der Station Weidenbrunnen, Waldstein im Untersuchungszeitraum 2001/2002. Datengrundlage: 211 Ereignisse 17.4.2001 bis 28.2.2002.....	68
Tabelle 24: Summe der nassen Deposition der wichtigsten anorganischen Ionen an der Station Weidenbrunnen, Waldstein im Untersuchungszeitraum 2001/2002. Datengrundlage: 44 Proben vom 2.4.2001 bis 28.2.2002.....	70
Tabelle 25: Summe der durch den Bestandesniederschlag eingetragenen wichtigsten anorganischen Ionen an der Station Coulissenhieb, Waldstein im Untersuchungszeitraum 2001/2002. Quelle der Rohdaten: [Alewell 2003], Daten vom 27.3.2001 bis 25.3.2002.....	72
Tabelle 26: Vergleichswerte für den Flüssigwassergehalt der Luft [mg m^{-3}] während Nebelereignissen weltweit. Angegeben sind Minimum (Min), Maximum (Max) und Mittelwert oder Median (Mittel) je nach Angabe in der zitierten Arbeit.....	78
Tabelle 27: Lage, Messzeitraum und Quelle der in Abbildung 74 angegebenen Nebelmessstationen.....	86
Tabelle 28: Statistische Kenngrößen gemessener chemischer Zusammensetzungen von Nebelwasser im Fichtelgebirge und im Frankenwald im Verlauf der letzten 20 Jahre und die Vergleichswerte aus der vorliegenden Arbeit. Dargestellt sind elektrische Leitfähigkeit λ [$\mu\text{S cm}^{-1}$], pH-Wert und die Äquivalentkonzentrationen der analysierten Ionen [$\mu\text{eq l}^{-1}$].....	88
Tabelle 29: Vergleich der mittleren Werte für pH, elektrische Leitfähigkeit und die Äquivalentkonzentrationen der wichtigsten Ionen im wet-only-Niederschlag und Nebelwasser. Angegeben sind die Mediane. Für Na^+ , K^+ , Mg^{2+} und Ca^{2+} lagen die Mediane der wet-only-Proben unter der Bestimmungsgrenze. Die Anreicherung ist der Quotient aus Nebelwasserkonzentration und wet-only-Konzentration.....	88
Tabelle 30: Monatlicher Niederschlag am Waldstein: Regen und Schnee, Nebel, Gesamtniederschlag und Anteil des Nebels am Gesamtniederschlag. Alle Werte in mm. April 2001: nur Daten ab 17.4. Regen und Schnee: Korrektur aus [Rebmann et al. 2004].....	90
Tabelle 31: Vergleich der gemessenen Bestandesniederschläge mit den ermittelten wet-only-Niederschlägen und der Nebeldeposition. Alle Einheiten sind $\text{kg ha}^{-1} \text{a}^{-1}$. „wet-only und Nebel“ ist die Summe aus wet-only-Niederschlag und Nebeldeposition, „Differenz“ die Differenz zwischen Bestandesniederschlag und „wet-only und Nebel“. Messperiode: 1.4.2001 bis 31.3.2002.....	92
Tabelle 32: Stickstoffdeposition am Waldstein: Vergleich von Bestandesniederschlag, wet-only-Niederschlag und Nebeldeposition.....	92

Danksagung

Ich möchte allen danken, die zum Gelingen dieser Dissertation beigetragen haben.

Für die enge und freundschaftliche Zusammenarbeit, Hilfe und Kritik bei der Organisation und Durchführung des Projektes danke ich herzlichst Herrn Prof. Dr. Otto Klemm.

Herrn Jörg Gerchau danke ich besonders für seine Hilfe bei vielen technischen Problemen, beim Aufbau der Messapparaturen und für die gute und freundschaftliche Zusammenarbeit.

Herrn Andreas Held und Herrn Alexander Mangold danke ich sehr für die vielen Diskussionen und Hilfen während der Projektlaufzeit.

Die kritische Begleitung und viele Anregungen von Herrn Prof. Dr. Thomas Foken unterstützten mich bei dieser Arbeit. Dafür besonderen Dank an ihn.

Die Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter des Bayreuther Instituts für Terrestrische Ökosystemforschung (BITÖK) haben durch Hilfe bei der chemischen Analytik, der Probenahme, der Überlassung von Geräten und viele Ratschläge zu dieser Arbeit beigetragen. Besonderer Dank gilt Frau Kerstin Moser und Frau Bettina Popp von der Zentralen Analytik für die Analysen der Nebel- und Regenproben sowie Herrn Thomas Köhler für die Hilfe bei etlichen programmiertechnischen Problemen.

Den mechanischen Werkstätten der Universität Bayreuth, insbesondere Herrn Böhm danke ich für den Bau des Bayreuth Heatable Active Strand Cloudwater Collector (BCC).

Herrn PD Dr. Werner Eugster gilt mein Dank für die Überlassung des Programms „convertall“ zur Berechnung der turbulenten Flüsse und seine Hilfe bei der Verwendung des Programms.

Herrn Dr. Reto Burkard danke ich für die enge Zusammenarbeit während der ersten Messperiode und die vielen fruchtbaren Diskussionen über den Fortgang des Projekts.

Herrn Prof. Dr. Hartmut Frank danke ich für die Überlassung eines wet-only-Niederschlagssammlers.

Frau Sabine Helbig, meiner Mutter Frau Angelika Wrzesinsky und Frau Anna Wodsak danke ich für das Durchlesen und die Korrektur des Manuskripts.

Der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) danke ich für die Förderung des Projektes „Quantifizierung des Eintrags von Wasser und ausgewählten Nährstoffen in ein Waldökosystem durch die Deposition von Nebel“ (Geschäftszeichen Kl 623/4-1 und -2).

Dem Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gilt mein Dank für die Förderung durch Vorhaben Nr. PT BEO 51 – 0339476 C und D.

Zusammenfassung

Der nebelgebundene Eintrag von Wasser und Spurenstoffen kann in den Bergwäldern Mitteleuropas eine wichtige Rolle spielen. Die Quantifizierung dieses Eintrags stieß jedoch in der Vergangenheit auf messtechnische Grenzen. Nach der Entwicklung und Erprobung eines Systems aus einem Tropfenspektrometer zur schnellen Messung der Größenverteilung (40 Tropfengrößenklassen zwischen $\varnothing 1,5$ und $50 \mu\text{m}$) im Nebel und einem Ultraschallanemometer zur Bestimmung des vertikalen Windes konnten an der Ökosystemmessstation „Waldstein“ von April 2001 bis März 2002 Messungen zur Nebelwasserdeposition durchgeführt werden. Zusätzlich wurden die Sichtweite und die chemische Zusammensetzung (pH, elektrische Leitfähigkeit, Na^+ , K^+ , NH_4^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} und PO_4^{3-}) des Nebelwassers gemessen. Zur Sammlung von Nebelwasser wurde ein aktiver beheizbarer Nebelsammler entwickelt und parallel zu den Wasserflussmessungen eingesetzt. Die Proben wurden automatisch alle acht Stunden genommen. Die Sammelmengen betragen im Median 249 ml und erlaubten die gewünschten chemischen Analysen. Im Untersuchungszeitraum waren 223 Nebeltage zu verzeichnen. Der Nebelanteil betrug 25,7 %.

Für die Qualitätskontrolle der gemessenen Flüsse wurden die Daten auf Stationarität und Turbulenz überprüft und der Datensatz entsprechend angepasst. Die Messung der Nebeldeposition im Untersuchungszeitraum ergab einen Eintrag von $108 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ Wasser für die turbulente Deposition und $17 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ für den Eintrag über Sedimentation. Der turbulente Eintrag dominiert also mit ca. 86 % die Nebeldeposition. Die Summe aus beiden Eintragsarten entspricht einem Nebelniederschlag von 125 mm p. a. Eine klare Saisonalität der Nebelwasserflüsse ist erkennbar. Die höchsten Nebelniederschläge sind im Spätherbst und im Winter zu verzeichnen, monatlich bis zu 24 mm (Januar) wurden gemessen. Die geringste Nebeldeposition wurde im August mit ca. 1 mm gemessen. Die ermittelten Tropfenspektren zeigen bei der Anzahlverteilung Maxima bei 2, 6 und $9 \mu\text{m}$ sowie ein Maximum von $12 \mu\text{m}$ in der Massenverteilung. Für die Massengrößenverteilung sind Verteilungen mit Maxima bei 9, 12 und $15 \mu\text{m}$ häufig. Die gemessenen Flüssigwassergehalte lagen bei einem Median von 156 mg m^{-3} und erreichten Maxima von 2639 mg m^{-3} (5-min-Mittel). Den größten Anteil am Fluss hatte die Größenklasse von 14,5 bis $15,5 \mu\text{m}$ Tropfendurchmesser. Tropfen kleiner $7 \mu\text{m}$ wurden effektiv emittiert, die größeren deponiert. Die im Untersuchungszeitraum gefallene Menge an Regen und Schnee beträgt 1414 mm. Der Anteil des Nebels am atmosphärischen Eintrag von Wasser beträgt demzufolge etwa 8 %.

Für insgesamt 253 Nebelereignisse wurden im Untersuchungszeitraum Proben gewonnen. Außerdem wurden zum Vergleich auf wöchentlicher Basis wet-only-Proben genommen. Die Konzentrationen in Nebel- und Regenwasser sind hoch variabel. Die Mediane liegen im Nebelwasser bei pH 4,14, $621 \mu\text{eq l}^{-1}$ für NH_4^+ , $487 \mu\text{eq l}^{-1}$ für NO_3^- und $321 \mu\text{eq l}^{-1}$ für SO_4^{2-} . Diese 3 Hauptionen machen ca. 87 % der Gesamtkonzentration aus. Die Konzentrationen im Nebelwasser sind deutlich gegenüber dem wet-only-Niederschlag erhöht. Die Anreicherungsfaktoren sind 18,1 (NH_4^+), 13,1 (NO_3^-) bzw. 11,5 (SO_4^{2-}).

Der nebelgebundene Eintrag der wichtigsten Ionen wurde aus der Konzentration und dem Nebelwasserfluss errechnet. Die eingetragenen Mengen sind $9,8 \text{ kg ha}^{-1}$ für NH_4^+ ($7,9 \text{ kg ha}^{-1}$ für wet-only), $27,9 \text{ kg ha}^{-1}$ für NO_3^- ($25,1$) bzw. $14,0 \text{ kg ha}^{-1}$ für SO_4^{2-} ($15,0$). Die durch feuchte oder okkulte Deposition eingetragene Menge ist für diese Ionen also im gleichen Größenbereich wie die Menge aus Regen und Schnee. Der Stickstoffeintrag beträgt insgesamt $13,9 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ ($11,8$ für wet-only). Der im Untersuchungszeitraum durch den Bestandesniederschlag gemessene Eintrag von Stickstoff liegt bei $23,3 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$. Die Differenz aus Bestandesniederschlag einerseits und wet-only und Nebel andererseits liegt mit $-0,9 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ nahe Null. Zusätzliche Einträge sind durch die trockene Deposition (z. B. durch partikuläres Nitrat und Salpetersäure) zu erwarten. Der Umsatz von Stoffen im Kronenraum spielt dann eine wichtige Rolle in der Schließung der Ökosystembilanz für die verschiedenen Stoffe.

Summary

For mountainous forests in Central Europe fog deposition is likely to play an important role in the cycling of water, nutrients, and pollutants. Quantifying the amount of occult deposition was very difficult in the past due to technical limitations. In this project a deposition measurement setup was developed, tested and operated at the ecosystem research site “Waldstein”. The system consisted of a fast droplet spectrometer (measuring range from 1.5 to 50 μm diameter in 40 size classes) and an ultrasonic anemometer to measure the vertical wind component. From April 2001 through March 2002 a continuous data set of fogwater deposition had been obtained. In addition, visibility and the chemical composition of fog water (pH, electrical conductivity, Na^+ , K^+ , NH_4^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} und PO_4^{3-}) were determined. Fog water was collected using an active heatable cloudwater collector which was developed during this project. Samples were taken every 8 h during fog events. The median sample volume was 249 ml. A total of 223 days with fog were observed during the measuring period. The percentage of fog occurrence was 25.7 %.

Quality control of data included stationarity and turbulence tests. Corrected data sets were then used for flux calculations. During one year of measurements (2001/2002) a total water input of 108 kg ha^{-1} by turbulent deposition and 17 kg ha^{-1} by sedimentation was observed. Hence, turbulent deposition is dominating the total fog precipitation of 125 mm with a percentage of 86 %. Fogwater deposition shows a significant seasonal cycle. The highest monthly amounts were observed during late fall and winter (24 mm in January), lowest during the summertime (1 mm in August). Measured droplet count spectra show peak values at diameters of 2, 6, and 9 μm , respectively. The median droplet mass spectrum has a maximum at 12 μm . Typical mass spectra have peak values at 9, 12, or 15 μm diameter. For the liquid water content the median is 156 mg m^{-3} with a maximum of 2639 mg m^{-3} (5-min averages). The largest contribution to total fogwater flux is in the droplet diameter class from 14.5 to 15.5 μm . Droplets smaller than 7 μm are emitted (net balance), whereas larger droplets are deposited. For the measuring period the amount of precipitation by rain and snow was 1414 mm. Therefore, the percentage of fogwater input amounts to about 8 % of the total input.

During the measurements 253 samples of fog water were taken. For comparison, wet only precipitation samples were taken on a weekly basis, too. The chemical composition of fog and rain water is highly variable. For fog water, median pH was 4.14, median concentrations were 621 $\mu\text{eq l}^{-1}$ for NH_4^+ , 487 $\mu\text{eq l}^{-1}$ for NO_3^- , and 321 $\mu\text{eq l}^{-1}$ for SO_4^{2-} , respectively. These three major ions contribute 87 % to the total concentration. Fogwater concentrations are significantly higher than those in rain. Enrichment factors are 18.1 (NH_4^+), 13.1 (NO_3^-), and 11.5 (SO_4^{2-}), respectively.

The fog deposition for the main ions was calculated from concentrations and fogwater fluxes. The inputs are 9.8 kg ha^{-1} for NH_4^+ (7.9 kg ha^{-1} wet only), 27.9 kg ha^{-1} for NO_3^- (25.1) and 14.0 kg ha^{-1} for SO_4^{2-} (15.0), respectively. Therefore, occult deposition is a major contributor to total ion inputs at that site, playing approximately the same role as rain and snow precipitation. Nitrogen input is 13.9 $\text{kg N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ (11.8 wet only). Throughfall measurements for the measuring period show a nitrogen input of 23.3 $\text{kg N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$. Hence, throughfall is nearly the same as the sum of fog, rain, and snow. The role of dry deposition (e.g., the input of nitrate by particles or gaseous HNO_3) in the ecosystem balance has not been quantified and has to be considered when trying to close the nitrogen cycles as well as other nutrient fluxes. Another aspect is the turnover within the tree canopy which may play a significant role in closing the balance.

1 Einleitung

1.1 Allgemeines

Die Untersuchung der Wege und Mechanismen der Flüsse von Stoffen sowie von Energie innerhalb natürlicher Räume ist eine der vornehmsten Aufgaben der Ökosystemforschung. Die wichtigsten der dabei untersuchten Stoffe sind die für die Ernährung und Lebensfunktionen der Pflanzen relevanten. An der Grenzfläche zwischen Vegetation und Boden einerseits sowie der Atmosphäre andererseits treten die verschiedensten, sich gegenseitig überlagernden Prozesse für den Austausch von Stoffen und Energie zwischen den Kompartimenten auf. Der Fluss von Stoffen kann aufgrund von Sedimentation, turbulentem Transport und molekularer Diffusion erfolgen. Der Austausch mit den Pflanzen oder Böden geschieht dann über Sedimentation, Impaktion, Austausch über Stomata und Kutikula, Evaporation und Sublimation von Oberflächen und andere Prozesse.

Seit 1992 wird an der Station „Waldstein“ im oberfränkischen Fichtelgebirge versucht, anhand eines typischen Bergnadelwaldes die Flüsse, Umsätze und Vorräte von Stoffen und Energie in einem Waldökosystem zu bilanzieren. Aus Sorge um die Anfang der 1980er Jahre beobachteten „neuartigen“ Waldschäden [Rehfuess 1981] sollte diese Bilanz zur Klärung der Ursachen dienen. Das Bayreuther Institut für Terrestrische Ökosystemforschung (BITÖK) hat daher in vielen Projekten u. a. geologische, bodenkundliche, pflanzenphysiologische, mikrobiologische und meteorologische Methoden zur Identifizierung und Quantifizierung der grundlegenden stofflichen und energetischen Flüsse genutzt. [Wrzesinsky & Klemm 2000] zeigten für den Standort eine große Häufigkeit von Nebel und konnten deutliche Anreicherungen von chemischen Bestandteilen im Vergleich zu Regenwasser feststellen. Diese Anreicherung wird in Nebelwasserproben weltweit (z. B. [Fuzzi *et al.* 1996], [Choulaton *et al.* 1997], [Fišák *et al.* 2002]) und lokal (z. B. [Schrimpff *et al.* 1984], [Verhoeven *et al.* 1987], [Goss 1994]) beobachtet. Aufgrund dieser Kenntnisse wurde von [Wrzesinsky & Klemm 2000] der Beitrag des Nebels zum Wassereintrag mit 163 bis 564 mm für 1997 abgeschätzt. Verbunden mit den höheren Konzentrationen an Inhaltsstoffen würde dies einen zumindest zum Regen gleichwertigen Beitrag des Nebels zum Eintrag dieser Stoffe bedeuten. Aufgrund der fehlenden Methodik zur direkten Messung der Nebelwasserdeposition waren bisherige Untersuchungen auf sehr einfache und ungenaue Ansätze beschränkt oder nutzten Modelle zur Berechnung der Deposition (z. B. [Lovett 1984], [Pahl 1996]). Mit der technischen Entwicklung von schnellen Messgeräten zur Messung des Flüssigwassergehaltes der Luft konnten Anfang der 1990er Jahre erstmals durch Anwendung der so genannten Eddy-Kovarianz-Methode direkte Messungen der Nebelwasserdeposition durchgeführt werden. [Beswick *et al.* 1991], [Vong & Kowalski 1995], [Vermeulen *et al.* 1997] untersuchten den Fluss in Wäldern, [Gallagher *et al.* 1992] fokussierte auf Moore. Ein auf diesem Verfahren beruhender Ansatz wurde für diese Arbeit ausgewählt, um die Nebelwasserdeposition am Waldstein zu quantifizieren und deren Bedeutung für die Stoffflüsse im Ökosystem abzuschätzen.

1.2 Definitionen

Die Definition des Begriffes *Nebel* ist eigentlich zweigeteilt:

- (1) Nebel ist ein bodennahes Aerosol. Dieses besteht aus den Nebeltropfen¹ mit einem Durchmesser von üblicherweise ca. 2 µm bis ca. 50 µm und dem so genannten interstitiellen Aerosol, bestehend aus Gasphase und nicht aktivierten Partikeln (siehe [Grießbaum 2002]). In den Nebeltropfen sind weitere meist anorganische Verbindungen gelöst.
- (2) Die durch die schwebenden Nebeltropfen verursachte Trübung der Atmosphäre schränkt die Sichtweite² ein. Als Grenzwert für den Begriff *Nebel* wurde von der World Meteorological Organization (WMO) eine Sichtweite von 1000 m festgesetzt.

Es handelt sich beim Nebel also im Grunde um eine am Boden aufliegende Wolke mit Sichtweiten von unter 1000 m. Für Sichtweiten über 1000 m sollte man den Begriff *Dunst* verwenden. Hier gilt als Obergrenze eine Sichtweite von 10 km (z. B. [Alt 1932]), einige Autoren setzen hier eine Grenze von 8 km (z. B. [Malberg 2002]). Wird die Trübung bei hoher Luftfeuchte verzeichnet, bezeichnet man das als *feuchten Dunst*. Der *trockene Dunst* wird vor allem durch trockene Partikel verursacht und weist keine hohe Luftfeuchte auf. Bei Sichtweiten unter 200 m spricht man in der Meteorologie von *dichtem Nebel*. Die in Wetterkarten verwendeten Zeichen sind ∞ für Dunst, = für Nebel und ≡ für dichten Nebel.

Für die Entstehung von Nebel können unterschiedliche Vorgänge die Ursache sein. Abkühlungsnebel entsteht bei der Abkühlung der Luft. Der Sättigungsdampfdruck sinkt dabei ab, bis er gleich dem aktuellen Dampfdruck ist. Dann kann es zur Kondensation und Nebelbildung kommen. Erfolgt die Abkühlung aufgrund der Ausstrahlung von der Erdoberfläche (vor allem nachts), so spricht man von *Strahlungsnebel*. Kühlt die Luft dagegen ab, weil sie über einen kalten Untergrund streicht, spricht man von *Advektionsnebel*. An Gebirgen kann die Abkühlung auch durch den Aufstieg der Luftmasse erfolgen. Die meisten Nebelereignisse am Waldstein werden vor allem durch herangeführte Wolken gebildet. Auch hier bezeichnet man den Nebel als Advektionsnebel, da die Wolken advehiert werden. Diese Nebelart ist durch höhere Windgeschwindigkeiten als Strahlungsnebel gekennzeichnet und wird, luftchemisch gesehen, weniger durch den Messort als durch die Gesamtheit der durchlaufenen Ausbreitungspunkte (die so genannte Rückwärtstrajektorie) charakterisiert (siehe [Klemm *et al.* 1994]).

Wird durch Verdunstung von der Erdoberfläche (z. B. über einem See) die Sättigung der Luft erreicht, so bildet sich *Verdunstungsnebel*. Eine weitere Ursache für die Nebelbildung kann die Vermischung zweier knapp untersättigter Luftmassen sein. Die resultierende Feuchte kann dann über 100 %³ liegen und Kondensation einsetzen. Für den so entstehenden Nebel nutzt man den Begriff *Mischungsnebel*.

Für klimatologische Nebelstatistiken gibt es noch weitere Parameter. Als ein *Nebeltag* gilt ein Tag mit dem Auftreten von Nebel. Für die Messungen am Waldstein wurde er als ein Tage mit mindestens einem Messwert der Sichtweite (10-min-Mittel) von 1000 m oder weniger definiert. Besser geeignet für die Nebelcharakterisierung ist die *Nebeldauer*, die die Andauer von Messwerten der Sichtweite kleiner oder gleich 1000 m angibt. Der *Nebelanteil* schließlich bezieht die Nebeldauer auf den Messzeitraum.

In der vorliegenden Arbeit soll der Einfluss des Nebels im Ökosystem quantifiziert werden. Der Eintrag von Wasser und Spurenstoffen wird in der aktuellen Literatur oft als *feuchte Deposition* bezeichnet. Synonym wird auch der Begriff *okkulte Deposition* angewandt. In der deutschsprachigen Literatur verwendet man häufiger den ersten Begriff, der zweite ist in der englischsprachigen Literatur als „occult deposition“ geläufiger. Der Begriff soll die

¹ Eispartikel bei Eisnebel

² Der visuelle Kontrast eines Objektes in der unter Sichtweite spezifizierten Entfernung ist auf 5% des Ursprungswertes abgefallen.

³ Da die Sättigungsdampfdruckkurve nicht linear zur Temperatur verläuft, kann eine (linear) gemischte Luftmasse relativ feuchter sein als die bildenden Luftmassen.

Sonderstellung der Nebeldeposition gegenüber der nassen und trockenen Deposition verdeutlichen, da die physikalischen Vorgänge bei den verschiedenen Depositionstypen unterschiedlich sind. Die nasse Deposition umfasst den Eintrag von Wasser und dessen Inhaltsstoffen durch Regen und Schnee. Die trockene Deposition umfasst den Eintrag durch Partikel und Gase. Die physikalisch zu Grunde liegenden Vorgänge sind die Sedimentation (betrifft die nasse und feuchte, bei großen Partikeln auch die trockene Deposition), der turbulente Eintrag (relevant für feuchte und trockene Deposition) sowie die Diffusion (trockene Deposition).

Der grundlegende Prozess des Austrags von Nebeltropfen aus der Luft ist die *Impaktion* auf Oberflächen wie z. B. Bäume. Der turbulente Transport von Nebeltropfen hält diese in Bewegung. Strömt die nebelhaltige Luft um Hindernisse so können Tropfen, deren Trägheit zu groß ist, der Trajektorie der umgebenden Luftmoleküle nicht folgen und prallen auf das Hindernis. Diesen Vorgang bezeichnet man als Impaktion. Im großräumigen Maßstab wird oft auch der Begriff *Auskämmen* verwendet, der diesen Vorgang recht anschaulich macht.

Ein weiterer in dieser Arbeit häufig genutzter Begriff ist der des Flüssigwassergehaltes. Der *Flüssigwassergehalt* ist die Konzentration von flüssigem Wasser in der Luft und wird üblicherweise in g m^{-3} oder mg m^{-3} angegeben. Als Abkürzung hat sich *LWC* durchgesetzt, welches vom Englischen „liquid water content“ abgeleitet ist.

1.3 Zielsetzung

Für die vorliegende Arbeit gab es folgende wissenschaftliche Fragestellungen, die Gegenstand der Untersuchung sein sollten:

Es sollte ein System zur Messung der Nebelwasserdeposition mit Hilfe der so genannten Eddy-Kovarianz-Methode entwickelt, erprobt und eingesetzt werden.

Über einen Zeitraum von mindestens einem Jahr sollten an der nebelreichen Station „Waldstein“ Messungen der Nebelwasserdeposition durchgeführt werden.

Parallele Analysen der chemischen Zusammensetzung des Nebelwassers sollten eine Abschätzung des Eintrags von Nähr- und Spurenstoffen in das Ökosystem am Waldstein ermöglichen. Dazu musste ein Nebelsammler, der ganzjährige Beprobungen des Nebelwassers ermöglicht, entwickelt, erprobt und eingesetzt werden.

Ein detaillierte Untersuchung von Stickstoff und Schwefel auch im Regenwasser sollte eine verbesserte Bilanzierung dieser Elemente im Ökosystem ermöglichen.

2 Messort und Methodik

2.1 Messort

Alle Messungen wurden auf den Intensivmessflächen „Waldstein“ des Bayreuther Instituts für Terrestrische Ökosystemforschung (BITÖK) durchgeführt. Diese befinden sich im Waldsteingebirge, dem nördlichen Teil des Fichtelgebirges, im bayerischen Regierungsbezirk Oberfranken (siehe Abbildung 1).

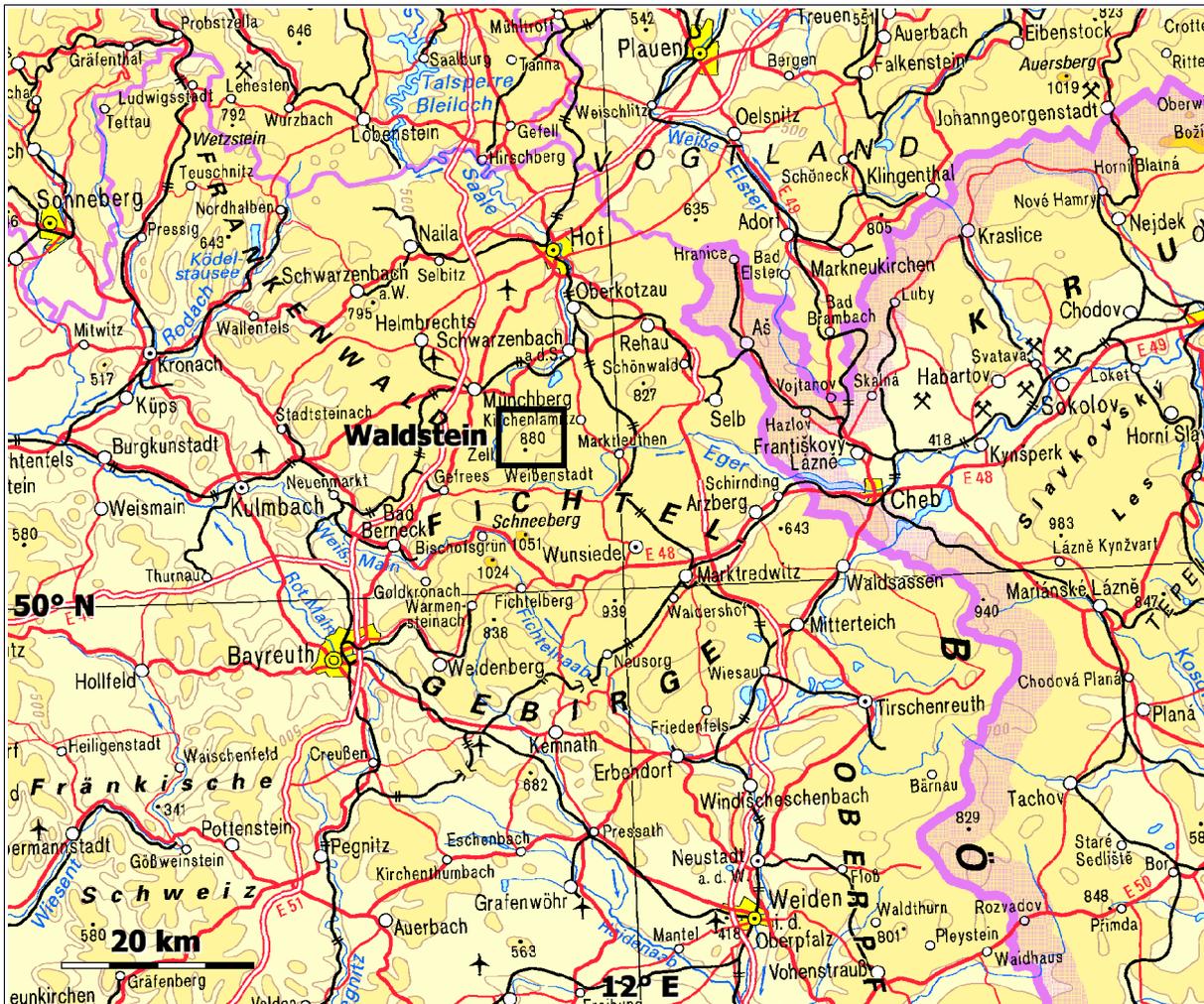


Abbildung 1: Übersichtskarte mit dem Untersuchungsgebiets am Waldstein (siehe auch Detailkarte in Abbildung 3). Quelle: Ausschnitt aus der Karte Bundesrepublik Deutschland 1:1 Mio [Bayerisches Landesvermessungsamt 2001, verändert]

Dieses Gebiet zeichnet sich durch hohe Nebelhäufigkeiten aus [Wrzesinsky 1998] und wurde daher für die Messungen ausgewählt. Weitere, die Wahl unterstützende Kriterien waren die Einbindung in die Ökosystemforschung des BITÖK mit aktuellem Messprogramm zu Ein- und Austrag von Wasser und Spurenstoffen in den untersuchten Waldbestand, die vorhandene Infrastruktur (Stromversorgung, Telefon- bzw. Internetanbindung) und die Nähe zu Bayreuth (ca. 35 km Straßentfernung).

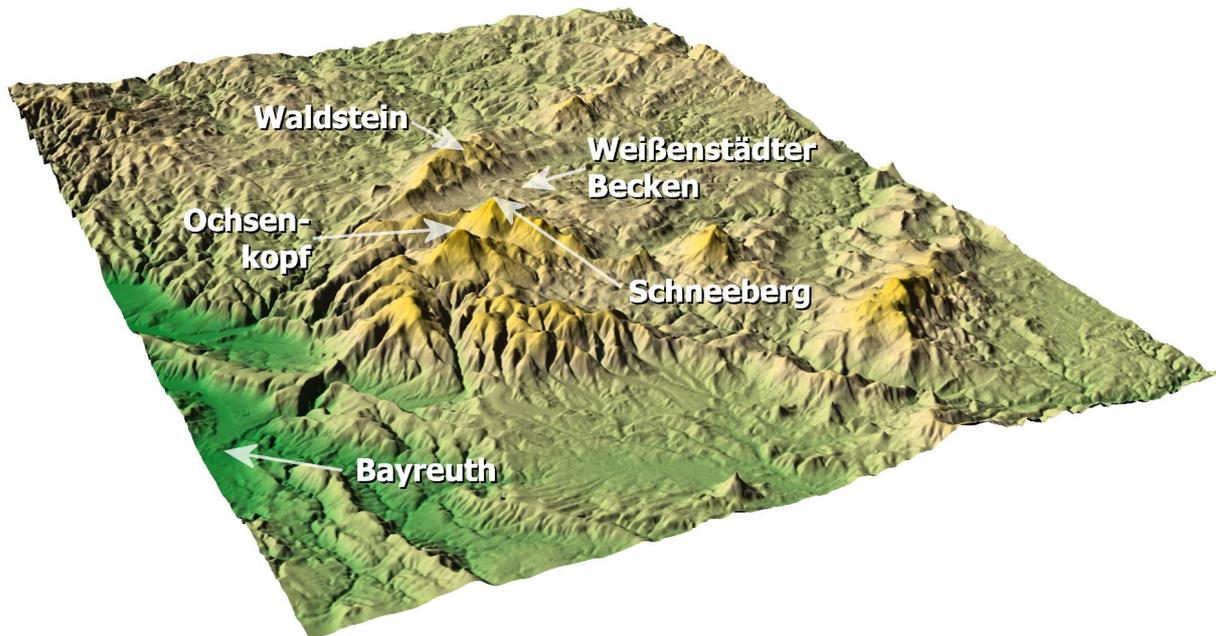


Abbildung 2: Das Fichtelgebirge in perspektivischer Höhenreliefdarstellung mit einigen ausgewählten Kartenpunkten (Eigene Darstellung, Grundlage: Digital Elevation Model aus [Bayerisches Landesvermessungsamt 2001], Darstellung überhöht und perspektivisch verzerrt).

Das Fichtelgebirge erreicht Höhen von maximal 1051 m (Schneeberg). Es erstreckt sich in Form eines nach Osten geöffneten Hufeisens mit dem Scheitel bei Goldkronach von Selb bis Marktredwitz (Abbildung 2). Die zwischen den Höhenzügen liegende Selb-Wunsiedeler Hochfläche hat ein Niveau von etwa 600 bis 650 m üNN und umfasst im Westen das Weißenstädter Becken, an das im Norden das Waldsteingebirge anschließt. Die Intensivmessflächen des BITÖK am Waldstein befinden sich im Einzugsgebiet des Lehstenbachs zwischen Großem Waldstein (879 m) und Bergkopf (857 m) in einer Höhenlage von ca. 700 bis 800 m üNN. Das Gebiet wird über den Lehstenbach zur Eger hin entwässert, ist also im Einzugsgebiet der Elbe. In dieser Arbeit werden Ergebnisse von drei der Messflächen vorgestellt. Allgemeine meteorologische und lufthygienische Messungen werden am Messcontainer auf der Messfläche „Pflanzgarten“ und am Messturm in der Messfläche „Weidenbrunnen“ durchgeführt. Die Messungen von Nebelchemie, Nebelwasserfluss und Sichtweite wurden auf diesem Messturm durchgeführt. Der Bestandesniederschlag und die Kronentraufbilanzen wurden auf der Messfläche „Coulissenhieb“ vom BITÖK erfasst. Eine Übersicht der Lage der einzelnen Flächen findet sich in Abbildung 3 und in Tabelle 1.

Das Fichtelgebirge befindet sich aufgrund seiner Grenzlage zu Tschechien und der Nähe zu Sachsen im Einzugsbereich etlicher Braunkohle verbrennender Kraftwerke und chemischer Industrie im nordböhmischen und mitteldeutschen Industriegebiet. Das war bis Anfang der 1990er Jahre prägend für die luftchemische Belastung der Region. Mittlerweile sind die gemessenen Konzentrationen des wichtigsten Luftschadstoffs Schwefeldioxid SO_2 deutlich zurückgegangen, was sich vor allem auf die neu eingeführten Abgasreinigungsanlagen und den Rückgang der industriellen Produktion in den genannten Gebieten seit der Beendigung der sozialistischen Produktionsweise [Klemm und Lange 1999] zurückführen lässt.

Die dominierende Baumart auf diesen Flächen ist die Gemeine Fichte (*Picea abies* (L.) KARST.) mit ca. 93 % Bestockung [Gerstberger 2001b]. Nach [Falge 2001] haben die verschiedenen Bestände im Gebiet ein Alter von ca. 50 a (Weidenbrunnen) bis ca. 150 a (Coulissenhieb), der Pflanzgarten dient als Baumschule. Die Bestandeshöhen (Stand ca. 1995) liegen bei im Mittel 17,8 m (Weidenbrunnen) bzw. 26,7 m (Coulissenhieb) und bis zu 27,9 m auf anderen Messflächen. Die Bäume im Weidenbrunnen weisen starke Zeichen von Waldschäden (Nadelvergilbung, Kahlwuchs und Absterben der Bäume) auf.

Tabelle 1: Geografische und Gauß-Krüger-Koordinaten sowie die Höhen über Normalnull (üNN) der BITÖK-Messflächen am Waldstein [Bayerisches Landesvermessungsamt 2001]

Standort	Geografische Breite und Hochwert	Geografische Länge und Rechtswert	Höhe üNN
Pflanzgarten (Container)	50° 08' 39,4" N 5556 344 m	11° 51' 53,6" E 4490 356 m	766 m
Weidenbrunnen (Messturm)	50° 08' 36,0" N 5556 244 m	11° 52' 06,6" E 4490 636 m	776 m
Coulissenhieb	50° 08' 39" N 5556 193 m	11° 52' 00" E 4490 540 m	775 m

Der Großteil der Messungen für diese Arbeit wurde auf dem meteorologischen Messturm des BITÖK auf der Messfläche Weidenbrunnen durchgeführt. Dabei handelt es sich um einen 30 m hohen, begehbaren Stahlgerüstturm mit Messplattformen in verschiedenen Höhen. Der Querschnitt des Turms verjüngt sich stufenweise bis zur Spitze. Das Gelände um den Turm ist leicht nach SSW geneigt (ca. 5°). Die Bäume der direkten Umgebung sind ca. 20 m hoch. In ca. 50 m Entfernung nach Osten und Westen sind im Mittel höhere Fichten (ca. 25 bis 30 m)

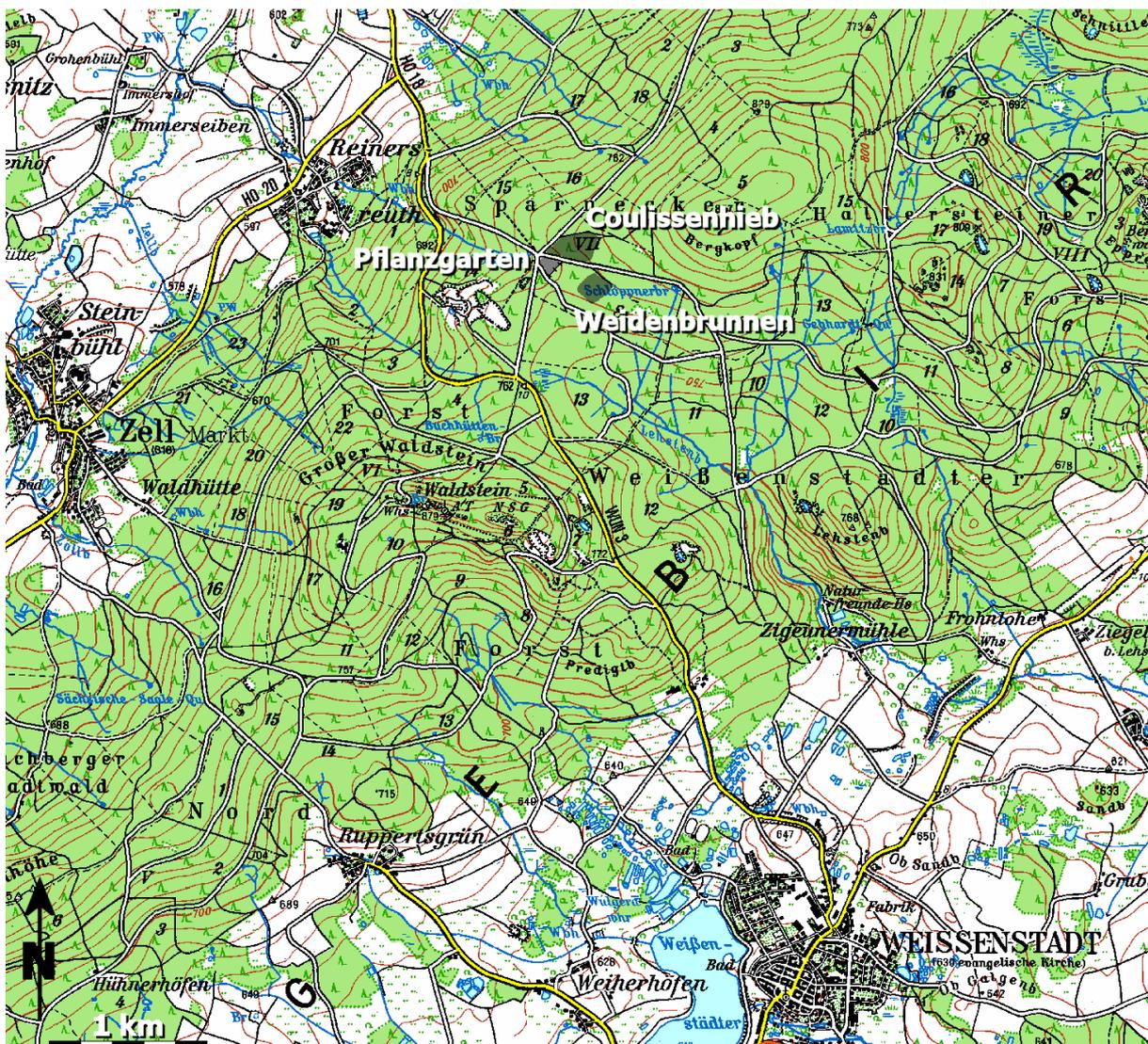


Abbildung 3: Karte des mittleren Waldstein-Gebirges mit den Untersuchungsflächen des BITÖK. Ausschnitt aus der Topographischen Karte 1:50000, Quelle: [Bayerisches Landesvermessungsamt 2001].

anzutreffen. Innerhalb der BITÖK-Routinemessungen werden an dem Turm Höhenprofile von Lufttemperatur, Luftfeuchte und Windgeschwindigkeit gemessen. Zusätzlich werden auf der 30 m-Plattform Niederschlag und Windrichtung sowie kurz- und langwellige Ein- und Ausstrahlung erfasst. Seit 1996 werden zusätzlich der Austausch von Kohlendioxid (CO₂) und Wasserdampf (H₂O) und in einigen Messperioden auch die Flüsse von Ozon (O₃), leichtflüchtigen organischen Kohlenwasserstoffen (VOC), Stickoxiden (NO_x) und Salpetersäure (HNO₃) sowie von Partikeln gemessen.

Für die Messungen der Nebelwasserchemie war ein Nebelsammler während der gesamten Messzeit (Januar 2000 bis April 2002) auf der Messplattform in 24 m Höhe (800 m üNN) befestigt. Der Ansaugstutzen war in Richtung Westen ausgerichtet. Ein Sichtweitenmessgerät (PWD11) wurde im August 2000 am Messturm in einer Höhe von 25 m angebracht. Ausgerichtet ist es nach Norden. Ein System zur Messung der Nebelwasserdeposition (FM-100 und Ultraschallanemometer) wurde an der höchsten Plattform des Turms in einer Höhe von ca. 30 m befestigt. Um ein ungestörtes Anströmen aus einem möglichst großen Sektor zu gewährleisten, wurde das gesamte System an einem Ausleger etwa 1,5 m nach Westen außerhalb des Turms montiert. Während der Vergleichsmessungen im 2. Halbjahr 2000 [Burkard *et al.* 2002] wurde das System der Universität Bern nacheinander in zwei Höhen befestigt. Beim direkten Gerätevergleich war das System ebenfalls auf 30 m angebracht. Es wurde an einem Nordausleger ca. 2 m außerhalb des Turms befestigt. Während der Untersuchung vertikaler Flussdifferenzen befand sich das Berner System auf Höhe der 20 m-Plattform an einem 2 m-Ausleger. Eine genaue Übersicht über die verwendeten Messhöhen und Ausrichtungen der Geräte findet sich in Tabelle 2. Die genauen Messzeiträume finden sich in Kapitel 3.1.

Tabelle 2: Messhöhen und Ausrichtung der eingesetzten Geräte am Messturm Weidenbrunnen. Die Messhöhen der beiden Geräte der Universität Bern (GIUB: FM-100 und Gill Solent HS) sind für den Gerätevergleich bzw. den Vertikalvergleich angegeben.

Messgerät	Messhöhe	Ausrichtung	Außenabstand vom Turm
PWD11 (Sichtweitenmessgerät)	25 m	Nord	1 m
BCC (Nebelsammler)	24,5 m	West	0 m
FM-100/BITÖK (Nebeltropfen-Spektrometer)	31 m	nach Wind (Ausleger West)	1,5 m
Young 81000 (Ultraschallanemometer)	31,5 m	nach Wind (Ausleger West)	1,5 m
FM-100/GIUB	31 m bzw. 21,5 m	nach Wind (Ausleger Nord bzw. West)	2 m
Gill Solent HS (Ultraschallanemometer)	31,5 m bzw. 22 m	nach Wind (Ausleger Nord bzw. West)	2 m

Am Messcontainer im Pflanzgarten werden folgende meteorologische und luftchemische Standardparameter gemessen: Lufttemperatur (in 2 m Höhe), Luftdruck (2,5 m), Luftfeuchte (2 m), Niederschlag (1 m), Windgeschwindigkeit und Windrichtung (jeweils in 10 m), diffuse Himmelsstrahlung (3 m) und bis August 2000 die Sichtweite (3 m) sowie die Luftbeimengungen (alle in 3 m) von Ammoniak NH₃ (bis Dezember 2001), Ozon O₃, Schwefeldioxid SO₂ und den Stickoxiden NO und NO₂. Im Pflanzgarten befand sich auch der „wet only“-Regensammler zur Beprobung von Regenwasser.

Eine ausführliche Beschreibung der Messflächen des BITÖK findet sich in [Gerstberger 2001a].

2.2 Methodik

2.2.1 Meteorologische Messungen

Die meteorologischen Messungen am Waldstein werden im Zuge des Routineprogramms des BITÖK von der Abteilung Klimatologie durchgeführt. Sie umfassen ein umfangreiches Spektrum meteorologischer und luftchemischer Parameter. Da die meisten dieser Parameter mit standardisierter Messtechnik erfasst werden, soll diese hier nicht weiter erläutert werden. Eine Übersicht aller verwendeten Parameter findet sich in Tabelle 3. Nur die im Zuge der Nebelforschung am Waldstein eingeführte Sichtweitenmessung soll hier näher vorgestellt werden.

Tabelle 3: Übersicht der meteorologischen und luftchemischen Parameter, die im Rahmen des BITÖK-Routine-Messprogramms gemessen werden und in dieser Arbeit verwendet werden. Die zeitliche Auflösung beträgt 10 min. (Quelle: BITÖK-Datenbank)

Messgröße	Messort	Messhöhe	Einheit	Messgerät
Ammoniak	Pflanzgarten	3,0 m	$\mu\text{g m}^{-3}$	ECN-Denuder
Kurzwellige Strahlung von oben	Weidenbrunnen	30,0 m	W m^{-2}	Kipp & Zonen CM14
Kurzwellige Strahlung von unten	Weidenbrunnen	30,0 m	W m^{-2}	Kipp & Zonen CM14
Langwellige Strahlung von oben	Weidenbrunnen	30,0 m	W m^{-2}	Kipp & Zonen CG2
Langwellige Strahlung von unten	Weidenbrunnen	30,0 m	W m^{-2}	Kipp & Zonen CG2
Luftdruck	Pflanzgarten	2,5 m	hPa	Ammonit AB60
Lufttemperatur	Weidenbrunnen	31,0 m	$^{\circ}\text{C}$	Vaisala HMP45a
Lufttemperatur	Weidenbrunnen	21,0 m	$^{\circ}\text{C}$	Vaisala HMP45a
Lufttemperatur	Weidenbrunnen	2,0 m	$^{\circ}\text{C}$	Vaisala HMP45a
Lufttemperatur	Pflanzgarten	2,0 m	$^{\circ}\text{C}$	Vaisala HMP45a
Niederschlag	Pflanzgarten	1,0 m	mm	Kippwaage
Niederschlag seitlich	Weidenbrunnen	31,0 m	1	Eigenbrodt Schiffsregensammler
Niederschlag von oben	Weidenbrunnen	31,0 m	1	regensammler
Ozon	Pflanzgarten	3,0 m	$\mu\text{g m}^{-3}$	MLU UV Absorption Ozone Analyzer
Relative Luftfeuchte	Weidenbrunnen	31,0 m	%	Vaisala HMP45a
Relative Luftfeuchte	Weidenbrunnen	21,0 m	%	Vaisala HMP45a
Relative Luftfeuchte	Weidenbrunnen	2,0 m	%	Vaisala HMP45a
Relative Luftfeuchte	Pflanzgarten	2,0 m	%	Vaisala HMP45a
Schwefeldioxid	Pflanzgarten	3,0 m	$\mu\text{g m}^{-3}$	MLU Fluorescent SO_2 Analyzer
Sichtweite	Weidenbrunnen ¹	24,0 m	m	Vaisala PWD11
Stickstoffdioxid	Pflanzgarten	3,0 m	$\mu\text{g m}^{-3}$	Tecan CLD700AL
Stickstoffmonoxid	Pflanzgarten	3,0 m	$\mu\text{g m}^{-3}$	Tecan CLD700AL

¹ bis August 2000 im Pflanzgarten.

Messgröße	Messort	Messhöhe	Einheit	Messgerät
Windgeschwindigkeit	Weidenbrunnen	32,0 m	m s ⁻¹	Friedrichs Schalensternanemometer
Windgeschwindigkeit	Weidenbrunnen	21,0 m	m s ⁻¹	
Windgeschwindigkeit	Weidenbrunnen	18,0 m	m s ⁻¹	
Windgeschwindigkeit	Weidenbrunnen	16,0 m	m s ⁻¹	
Windgeschwindigkeit	Weidenbrunnen	10,0 m	m s ⁻¹	
Windgeschwindigkeit	Weidenbrunnen	2,0 m	m s ⁻¹	
Windgeschwindigkeit	Pflanzgarten	10,0 m	m s ⁻¹	
Windrichtung	Weidenbrunnen	32,0 m	°	Thies 2D-Ultraschallanemometer
Windrichtung	Weidenbrunnen	32,0 m	°	Friedrichs Windfahne
Windrichtung	Pflanzgarten	10,0 m	°	Friedrichs Windfahne

Zur meteorologischen Charakterisierung des Nebels wird am Waldstein seit Ende 1996 ein Sichtweitenmessgerät Present Weather Detector PWD11 von Vaisala eingesetzt. Das Gerät war bis zum 14. August 2000 am Messcontainer im Pflanzgarten angebracht und wurde danach auf dem Messturm Weidenbrunnen betrieben. Die Messung der Sichtweite beruht auf der Lichtstreuung (Vorwärtsstreuung oder „forward scattering“) an (Wasser-)Partikeln in der Luft. Der Transmitter des PWD11 sendet während der Messung infrarotes Licht ($\lambda = 875 \text{ nm}$) aus. Da Transmitter und Empfänger jeweils um ca. 20° nach unten geneigt sind (siehe Abbildung 4), wird dieses Licht ohne das Vorhandensein von Partikeln in der Messstrecke nicht am Empfänger ankommen und das Empfangssignal daher nahe Null sein. Befinden sich aber in der Messstrecke Partikel, kann das Licht an diesen gestreut werden und in den Empfänger gelangen. Dieses von der Partikelanzahl abhängige Messsignal wird zur Korrektur von Intensitätsverlusten durch verschmutzte Linsen durch die Messung der Rückstreuung berichtigt und dann intern in eine Sichtweite umgerechnet. Wichtige Kenngrößen des PWD11 sind in Tabelle 4 dargestellt.

Tabelle 4: Wichtige Kenngrößen des Present Weather Detector PWD11 [Vaisala 2001]

Eigenschaft	Spezifikation
Leistungsaufnahme und Versorgung	10 W (max. 17 W) bei 12 – 50 V Gleichstrom
Größe	22 × 72 × 32 cm (HBT)
Oberflächenmaterial	eloxiertes Aluminium (schwarz)
Kommunikation	RS-232 ¹ RS-485 ¹ 2 Relais-Ausgänge für Sichtweiten-Alarme
Messgrößen	- Sichtweite als 1-min- und 10-min-Mittel - Automatische Wettercodes nach WMO 4680 ^{2,4} und NWS ^{3,4} - Niederschlagsintensität, -summe und kumulative Schneehöhe
Lichtquelle	Infrarot-Diode ($\lambda = 875 \text{ nm}$, 60 mW)

¹ Das PWD kann automatisch Daten ausgeben oder auf Anfragen („Polling“) antworten.

² WMO 4680: Wettercodes der World Meteorological Organization der UNO für automatische Wetterstationen

³ NWS: National Weather Service, der Wetterdienst der Vereinigten Staaten von Amerika

⁴ Die Codes finden sich u. a. im Handbuch zum PWD11 [Vaisala 2001].

Eigenschaft	Spezifikation	
Empfänger	Fotodiode	
	Empfangsbereich 550 – 1050 nm, max. Empfindlichkeit bei 850 nm	
Sichtweite	Messbereich	10 – 2000 m
	Messunsicherheit	± 10 %
	Wiederholbarkeit	+5 %
	Ansprechzeit	60 s
	Auflösung	15 s

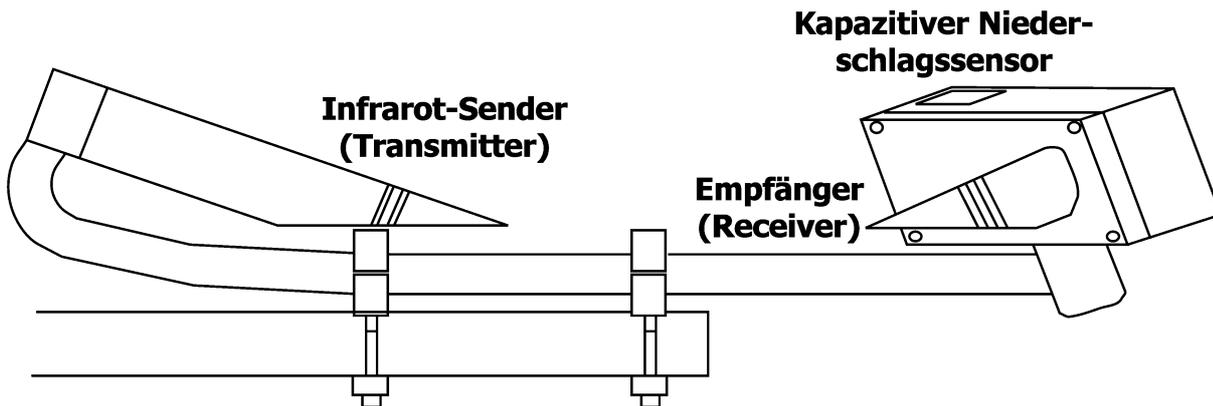


Abbildung 4: Zeichnung des Present Weather Detector PWD11 [Wrzesinsky 1998, verändert]

Die Datenaufzeichnung wurde mit dem Umsetzen des Geräts im August 2000 verändert. Bis zu diesem Zeitpunkt war die Aufzeichnung mit einem selbst geschriebenen Programm realisiert worden [Wrzesinsky 1998]. Mit dem Umsetzen wurde das PWD11 per RS-232-Schnittstelle an den Zentralcomputer am Messturm Weidenbrunnen angeschlossen. Dieser PC ist die Verbindung vom Datenaufzeichnungssystem am Turm (Vaisala QLC- und QLI-Datenlogger) und dem Waldstein-Zentralcomputer im Coulissenhieb, der den Datentransport zum BITÖK und damit die Aufzeichnung der meisten Messgrößen in die BITÖK-Datenbank steuert. Dieses Gesamtsystem wird vom Rechenzentrum des BITÖK betreut. Damit wurden die Sichtweitedaten ab August 2000 direkt in die BITÖK-Datenbank gespeichert und eine doppelte Datenhaltung beendet. Die Daten werden weiter auf den Internet-Seiten des BITÖK grafisch dargestellt.

2.2.2 Nebelwassersammler

2.2.2.1 Allgemeines

Für die Bestimmung der chemischen Zusammensetzung des Nebels ist es notwendig, Proben des Nebelwassers zu nehmen. Die Sammlung von Nebelwasser ist aber nicht trivial, es müssen folgende Fragen bedacht werden:

1. Was soll gesammelt werden?

Nebel ist ein Aerosol und besteht daher aus Nebeltropfen, Partikeln im interstitiellen Aerosol und der Gasphase. Zusätzlich können Ausprägungen weiterer Niederschlagsformen vorkommen (Regentropfen, Schneekristalle etc.). Je nach Aufgabenstellung muss der Nebel-sammler das Sammeln der nicht erwünschten Bestandteile ausschließen, zumindest qualitativ. Dabei spielt auch der Schutz des Sammlers vor unerwünschten Verunreinigungen (z. B. trockene Deposition) während nebelfreier Zeiten eine Rolle.

2. Soll das Sammeln natürliche (oder technische) Vorgänge nachbilden?

Bei der Impaktion von Nebeltropfen ist die Form des Hindernisses und die Luftbewegung entscheidend. Um die Eigenschaften des gesammelten Nebels (Tropfenspektrum) nicht zu

verändern, ist eine Nachbildung notwendig. Als Beispiel sei ein passiver Fadensammler genannt, der die turbulente Impaktion von Nebeltropfen an den Nadeln von Bäumen wahrscheinlich besser nachbildet als ein Impaktor.

3. Werden Nebeltropfen aufgrund ihrer Größe beim Sammeln diskriminiert oder bevorzugt?
Bei aktiven Nebelsammlern wird das Nebel-Aerosol in den Apparat gesaugt. Dabei kann eine erste Diskriminierung großer Tropfen erfolgen, die vielleicht sogar gewünscht ist (Ausschluss von Regentropfen). Beim Abscheiden der Tropfen an Sammelfäden erfolgt eine zweite Diskriminierung, diesmal kleiner Tropfen, da diese der die Fäden umströmenden Luft folgen können und nicht impaktieren.
 4. Soll die Sammlung tropfengrößenspezifisch (in verschiedenen Größenklassen) erfolgen?
Dies erfordert z. B. einen mehrstufigen Aufbau des Sammlers.
 5. Welche technischen Möglichkeiten stehen am Messort zur Verfügung?
Aktive Sammler haben leistungsstarke Ventilatoren oder Pumpen als Antrieb und benötigen eine gesicherte Stromversorgung. Manche Stationen sind nur schwer und/oder zu Fuß erreichbar, daher muss der Sammler leicht und kompakt sein. Der Abstand der Probenahmetermine muss ebenfalls bedacht und eventuell eine Zwischenlagerung eingerichtet werden.
 6. Wie sind die klimatischen Bedingungen am Messort?
Bei Frost sind Vorrichtungen zum Sammeln des gebildeten Eises oder zur Vermeidung der Eisbildung notwendig. Ein Standort mit hohen mittleren Windgeschwindigkeiten benötigt keine aktive Nebelsammlung.
 7. Welche zeitliche Auflösung der Nebelereignisse ist gewünscht und welche Sammelmengen müssen realisiert werden?
Hohe zeitliche Auflösungen bedingen geringe Sammelmengen. Man kann versuchen, dieses Problem technisch zu lösen (größerer Sammler, Verwendung aktiver Sammler), oder man muss einen praktikablen Kompromiss finden.
 8. Welche chemischen Bestandteile des Nebelwassers sollen gemessen werden?
Viele chemische Bestandteile können mit den Sammleroberflächen reagieren oder werden angelagert. Es ist also auf chemische Inertheit und geringe Absorptivität der verwendeten Materialien zu achten. Bei instabilen Verbindungen muss auf entsprechende Zwischenlagerung geachtet werden. Das muss mindestens für die zu untersuchenden Substanzen gelten.
- Es lassen sich praktisch nicht alle Kriterien auf einen Nebelsammler anwenden, so dass ein „Standard“-Sammler nicht existiert. Für diese Arbeit wurden nach den Erfahrungen aus [Wrzesinsky & Klemm 2000] die oben genannten Fragen wie folgt beantwortet:
1. Es soll nur Nebelwasser gesammelt werden. Für ein weiteres Experiment [Grießbaum 2002] wurde auch interstitielles Aerosol beprobt. Dazu war ein modularer Aufbau des Sammlers notwendig. Die Verunreinigung des Sammlers zwischen Nebelereignissen muss minimiert werden.
 2. Eine Nachbildung natürlicher Vorgänge ist zu komplex, um realisiert zu werden.
 3. Der Bereich natürlicher Tropfenspektren soll möglichst vollständig beprobt werden.
 4. Eine tropfengrößenspezifische Sammlung wäre wünschenswert, ist aber im Rahmen der Arbeit technisch nicht realisierbar gewesen.
 5. Ein Limit für den Stromverbrauch besteht praktisch nicht. Der Sammler soll auch von einer Person montiert werden können.
 6. Der Messzeitraum umfasst auch den Winter, daher muss der Sammler beheizbar sein.
 7. Um eine gewisse Mindestsammelmenge und eine ereignisabhängige Unterscheidung zu gewährleisten, ist eine Auflösung von ca. 6 bis 8 Stunden je Probe notwendig.
 8. Der Sammler soll chemisch weitgehend inert und die Absorptivität möglichst gering sein.
- Bei den vorhergehenden Messungen am Waldstein [Wrzesinsky & Klemm 2000] kam ein aktiver Nebelwassersammler des Typs „Caltech Active Strand Cloudwater Collector“ (CASCC) [Daube *et al.* 1987, Demoz *et al.* 1996] zum Einsatz. Da dieser Sammler die Kriterien gut erfüllt, wurde ein neuer Sammler nach diesem Vorbild gebaut. Wichtigste Modifikation war die Möglichkeit, den Sammler zu beheizen (Kriterium 6), um ihn auch im Winter einsetzen zu können. Der neue

Sammler wird in dieser Arbeit als „Bayreuth Heatable Active Strand Cloudwater Collector“ (BCC) bezeichnet, um seine veränderten Eigenschaften deutlich zu machen.

Das Sammelprinzip dieses Typs eines Aktivkollektors besteht im Abscheiden der Nebeltropfen an dünnen Fäden (Nebelsaiten), die in mehreren Harfen hintereinander angebracht sind, um so den Wirkungsgrad zu erhöhen. Die nebelhaltige Luft wird dabei mittels eines Ventilators über die Harfen gesaugt, um so die beprobte Luftmenge zu erhöhen. Die Nebeltropfen können aufgrund ihrer Trägheit der die Harfen durchströmenden Luft nicht mehr folgen und impaktieren an den Nebelsaiten. Die so gewonnenen Tropfen laufen an den Saiten nach unten in einen Sammelblock und aus diesem in ein Sammelsystem.

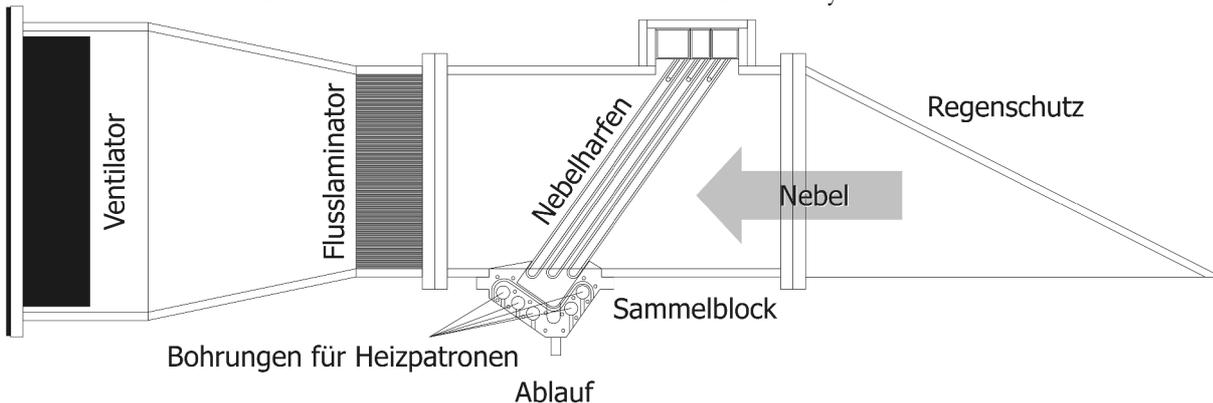


Abbildung 5: Der „Bayreuth Heatable Active Strand Cloudwater Collector“ (BCC) im Schema (nicht vollständig maßstäblich, eigene Zeichnung)

Die Proportionen des Sammlers wurden im Wesentlichen denen des CASCC nachempfunden. Der BCC besteht aus 3 Hauptteilen: Sammelteil (Vorderteil), Ventilatorteil (Hinterteil) und Versorgungsteil (Unterteil). Es wurden ein leistungsfähigerer Ventilator und ein leicht

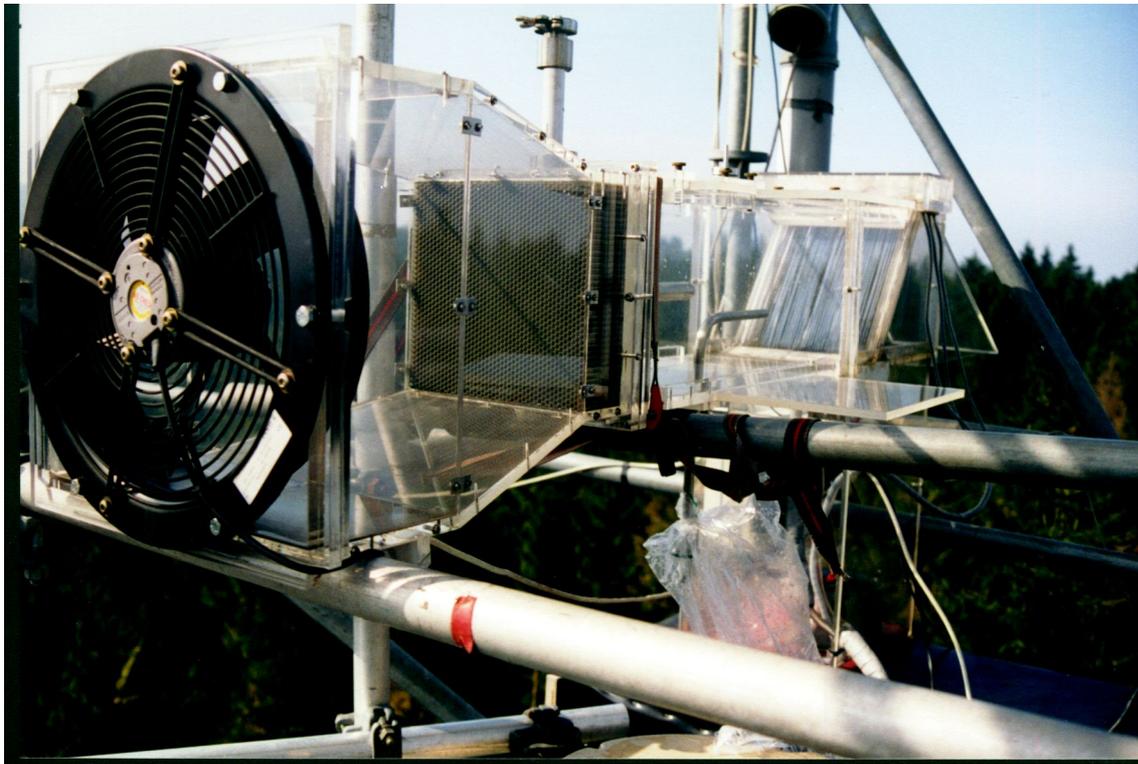


Abbildung 6: Der BCC-Nebelsammler auf dem Messturm „Weidenbrunnen“. Links das Ventilatorteil, in der Mitte das Zusatzmodul zur Sammlung interstitiellen Aerosols, rechts das Sammelteil mit der Schutzhaube .

vergrößerter Querschnitt verwendet, um die Fördermenge zu erhöhen. Als Saiten der Nebelharfen kamen deutlich dickere Teflonschläuche (\varnothing 1,5 mm) zum Einsatz (Original: Teflonfäden \varnothing ca. 0,5 mm). In Abbildung 5 ist ein Funktionsschema des BCC dargestellt und in Tabelle 5 sind die wichtigsten Daten des Sammlers zusammengefasst. Ein Foto des BCC ist in Abbildung 6 dargestellt.

2.2.2.2 Materialien

Bei den verwendeten Materialien wurde auf Kriterium 8 besonderer Wert gelegt. Auch das Gesamtgewicht (Kriterium 5) wurde berücksichtigt. Das Gehäuse des Sammlers besteht komplett aus Plexiglas (Polymethylmethacrylat), das weitgehend chemisch stabil bei typischen Umwelteinflüssen ist. Nach [Röhm 2002] widersteht Plexiglas verdünnten Säuren gut, absorbiert maximal 2,1 % Wasser (nach Wasserlagerung), ist witterungs- und UV-beständig und kann bei Temperaturen bis mindestens $+65\text{ }^{\circ}\text{C}$ dauerhaft eingesetzt werden. Es ist leicht (Dichte $\rho = 1190\text{ kg m}^{-3}$) und eignet sich daher für eine Gewicht sparende Bauweise. Das eingesetzte Plexiglas wurde bei der Verarbeitung geklebt und geschraubt, wobei im Sammelteil Nylon-schrauben und in den anderen Teilen Edelstahlschrauben verwendet wurden. Alle Teile des Sammlers, die in längeren direkten Kontakt mit gesammeltem Nebelwasser kommen, bestehen aus Teflon. Dieses besitzt laut [DuPont 2002] eine ausgezeichnete chemische Beständigkeit und ist stark witterungsfest. Der Sammelblock besteht aus Teflon PTFE (Polytetrafluorethylen) mit einer Dichte von ca. 2200 kg m^{-3} und einer dauerhaften Hitzebeständigkeit von $+204\text{ }^{\circ}\text{C}$. Die Saiten der Nebelharfen bestehen aus Teflon PFA (Perfluoroalkoxy-PTFE), welches noch etwas hitzetoleranter ist (Dauereinsatz bis $+260\text{ }^{\circ}\text{C}$). Zum Erwärmen der Nebelsaiten wurde Widerstandsdraht Typ Bo der Dicke 0,6 mm aus Konstantan und für den Sammelblock Heizkörperelemente für Lötkolben von Weller mit 50 W bei 24 V verwendet. Vor dem Ersteinsatz des Sammlers wurden alle Oberflächen gründlich gereinigt. Nach einem mehrtägigen Bad in verdünnter Salpetersäure wurde der Sammler mehrfach mit demineralisiertem Wasser gereinigt und anschließend einige Tage in doppelt deionisiertem Wasser gelagert.

2.2.2.3 Aufbau

Die drei getrennten Teile (Sammelteil, Ventilatorteil und Versorgungsteil) erlauben eine gewisse Modularisierung des Sammlers. Für das Sammeln von interstitiellem Aerosol in [Griebbaum 2002] konnte z. B. ein Modul zum Anschluss eines High Volume Samplers und eines Impaktors zwischen Sammel- und Ventilatorteil eingebaut werden.

Das Ventilatorteil beinhaltet den aktiven Teil des Sammlers, den Ventilator. Bei der Auswahl des Ventilators wurde auf eine hohe Förderleistung auch unter Last Wert gelegt. Das verwendete Modell vom Typ ebm W2E300 – CP02 – 31 hat laut Herstellerangaben eine entsprechend günstige Förderkurve auch bei größeren Druckabfällen [ebm 2002]. Der Ventilator ist mit Schutzklasse IP44 gegen Fremdkörper mit einem Durchmesser größer als 1 mm und gegen Spritzwasser ausreichend geschützt. Durch seinen senkrechten Einbau war der Einsatz eines Gerätes dieser Schutzklasse unproblematisch. Im Ventilatorteil befindet sich auch der Strömungslaminator (-gleichrichter), der Turbulenzen in der angesaugten Luft weit gehend verringert. Dieses Teil wurde aus Schichtluftstrom-Waben aus Polycarbonat mit einem Wabendurchmesser von 6 mm und einer Höhe von 80 mm hergestellt. Die verwendete Wabe wurde uns freundlicherweise von der Firma Tubus Bauer GmbH, Bad Säckingen, zur Verfügung gestellt. Die Wabe wurde passgenau zugeschnitten und in das Ventilatorteil eingepasst. Sie wurde nicht eingeklebt und bleibt daher für z. B. die Reinigung herausnehmbar.

Das Sammelteil umfasst die Nebelharfen und den Sammelblock. Die drei Nebelharfenblöcke wurden zur besseren Erreichbarkeit herausziehbar eingebaut (siehe Abbildung 7). Der Einbauwinkel wurde nach [Daube *et al.* 1987] auf 35° abweichend von der Vertikalen festgelegt. Auch der Abstand der Nebelsaiten wurde mit dem $3\frac{1}{2}$ -fachen Saitendurchmesser nach dem



Vorbild des CASCC bestimmt. Zum Einsatz kam aber nicht der ursprüngliche 0,02"-Teflonfaden (entspricht ca. 0,5 mm Durchmesser), sondern ein 1,5 mm-Teflonschlauch, in den ein Heizdraht eingezogen werden konnte. Der dafür eingesetzte Widerstandsdraht (\varnothing 0,6 mm) ließ sich per Hand in Schlauchstücke von 4 bis 6 m Länge schieben. Bei den gegebenen Abständen der Saiten und einer Innenbreite von 235 mm des Sammlers ergeben sich 45 benötigte Wicklungen je Harfe. Jede Harfe benötigt eine Gesamtlänge von ca. 27 m und musste aufgrund der kürzeren Einzelstücke zusammengesetzt werden. Es wurden abwechselnd Stücke zu 7 und 8 Wicklungen verwendet. Jeweils ein 7er und 8er Stück wurden in Reihe geschaltet und die so erhaltenen neun 15er Stücke parallel an die 24 V Versorgung angeschlossen. Die Heizleistung je Harfe ergibt sich daraus zu 110 W, die Gesamtheizleistung der Nebelharfen zu 329 W. Der Heizstrom beträgt 1,52 A und ist deutlich unter den nach Herstellerangaben [Bürklin 2002] für eine Heiztemperatur von 100 °C erforderlichen 2,21 A, womit eine Überhitzung und die damit verbundene Verdampfung von Nebelwasser vermieden wird.

Abbildung 7: Die Nebelharfen. Eine der Harfen ist zum Reinigen herausgezogen.

Tabelle 5: Spezifikationen des Nebelwasser-Sammelsystem (BCC und Autosampler), Erläuterung siehe Text.

Eigenschaft	Spezifikation
BCC allgemein	
Ansaugquerschnitt	235 × 235 mm ²
Einbauwinkel Nebelharfen	35° (vertikal abweichend)
Anzahl der Doppelharfen	3
Abstand der Doppelharfen	24,5 mm
Durchmesser Nebelsaite	1,5 mm
Material Nebelsaite	Teflon
Abstand der Nebelsaiten	5 mm (ca. 3½-facher Saitendurchmesser)
Wicklungsmuster je Harfe	7 – 8 – 7 – 8 – 7 – 8 (Σ 45)
Länge alle Saiten	82 m
BCC Ventilator	
Modell	ebm W2E300 – CP02 – 31
Versorgungsspannung	230 V
Leistung	230 W (bei 1,10 A)
Drehzahl	2700 min ⁻¹
Luftfördermenge (ohne Last)	3410 m ³ h ⁻¹
Schutzklasse	IP44
Durchmesser	300 mm

Eigenschaft	Spezifikation
BCC Sammeleigenschaften	
Ansauggeschwindigkeit	8,1 m s ⁻¹ (6,6 bis 10,2 m s ⁻¹ im Profil)
Wirkliche Luftfördermenge	1604 m ³ h ⁻¹
theoretische maximale Ausbeute	88,2 %
wirkliche Ausbeute (mittleres Spektrum)	78,5 %
50 %-Diskriminierungsgröße (cut size)	7,3 µm (bei 5 °C)
BCC Heizung	
Durchmesser Widerstandsdraht	0,6 mm
Material Widerstandsdraht	Konstantan-Legierung
Spezifischer Widerstand	1,73 Ω m ⁻¹
Versorgungsspannung	12 V
Schaltung der Wicklungen ¹	(R ₇ · R ₈) + (R ₇ · R ₈) + (R ₇ · R ₈)
Gesamt-Heizleistung	329 W
Blockheizung	3 Heizelemente à 50 W
BCC Steuerung	
Steuerplatine	Stubben Euromess
Programmiersprache	MCS-BASIC
Steuerparameter	<ul style="list-style-type: none"> • Ventilatorbetrieb • Harfenheizung (bei Außentemperatur unter 1°C) • Blockheizung (bei Blocktemperatur unter 5°C)
Eingänge	<ul style="list-style-type: none"> • Sichtweitenalarm (unter 500 m) • Außentemperatur (Pt-100-Sensor) • Blocktemperatur (Pt-100-Sensor)
Ausgang	RS-232
Ausgabe	<ul style="list-style-type: none"> • zweizeilige beleuchtete Anzeige (Block- und Außentemperatur, Status der Heizungen und des Sichtweitenalarms) • Speicherung der Sammelzeiten
ISCO-Sammler	
Anzahl Probenflaschen	24
Material der Probenflaschen	Polypropylen
Normale Zeitdauer einer Probenahme	6 h
mögliche Einsatzdauer	8 d

Der Sammelblock aus Teflon hat eine doppelte V-Form, um ein Abfließen der gesammelten Nebeltropfen zum Ablauf zu gewährleisten. Um ein Anfrieren der Nebeltropfen an die Blockoberflächen zu vermeiden, wurden in den Block Heizpatronen eingebaut. Es wurden dafür drei LötKolben-Heizelemente à 50 W (Weller Heizkörper TCP 0051011299) verwendet, maximal sind 10 möglich. Die Patronen wurden in Messingstäbe eingeschraubt, damit diese die Wärme im schlecht wärmeleitenden Block besser verteilen. Die Gesamtleistung von 150 W reichte aus, um den Block frostfrei zu halten.

Im Versorgungsteil ist neben dem Haupttransformator (24V Gleichspannung) auch die Steuerbox untergebracht. In der Steuerbox befindet sich ein Stubben Euromess-Einplatinenrechner, der die verschiedenen Parameter des Sammlers regelt.

¹ R₇ ... 7er Wicklung, R₈ ... 8er Wicklung, · ... Reihenschaltung, + ... Parallelschaltung

2.2.2.4 Betrieb

Die Programmierung der Euromess-Platine erfolgte in MCS-Basic in einem ereignisgesteuerten Programm. Eingangsparameter sind das Sichtweitensignal des PWD 11 (Sichtweite unter 500 m) und die Außen- sowie die Sammelblock-Temperatur von jeweils einem Pt-100-Temperatursensor. Gesteuert wird so der Ventilator sowie die Harfen- und die Blockheizung. Ein zusätzlicher Schalter für den Ventilator macht einen Handbetrieb des Sammlers möglich. Diese Möglichkeit wurde vor allem zur Blindprobengewinnung eingesetzt. Bei Außentemperaturen über +1 °C wurde der Ventilator nur über das Sichtweitensignal geschaltet. Bei geringeren Temperaturen wurde der Ventilator im Wechsel mit der Harfenheizung betrieben. Der Rhythmus wurde nach einigen Feldversuchen auf 15 min Sammeln und 250 s Heizen festgelegt. Dies reicht aus, gerade gebildetes Eis kontinuierlich wieder aufzutauen. Ein durchgehendes Sammeln und Heizen musste dagegen aufgrund der möglichen Verdunstung von Nebelwasser in der Größenordnung des Flüssigwassergehaltes bei Nebel verworfen werden¹.

Die Temperatur des Sammelblocks wurde über den Block-Temperatursensor auf mindestens +5 °C geregelt. Das Ein- und Ausschalten des Ventilators wurde im Speicher der Euromess-Platine aufgezeichnet. Diese Sammeldaten wurden regelmäßig ausgelesen. Auf diese Weise ist eine recht genaue Bestimmung der Sammelzeiten möglich.

Zur Vermeidung einer Verfälschung der gewonnenen Nebelproben durch z. B. trockene Deposition von Partikeln an den Nebelharfen wurde der Sammler regelmäßig gereinigt. Bei der wöchentlichen Wartung wurden die Nebelharfen aus dem Sammler gezogen und mit doppelt deionisiertem Wasser gespült und dabei mit einer Bürste vorsichtig von Belägen befreit. Außerdem wurden die Innenwände mit diesem Wasser gereinigt. Der Sammelblock wurde ebenfalls mit der Bürste und Wasser gereinigt. In einigen Abständen wurden Feldblindproben genommen. Dabei wurde mit einem Zerstäuber doppelt deionisiertes Wasser in das Sammelteil gesprüht und der Nebelsammler dabei eingeschaltet. In wenigen Minuten wurde so die Probe gewonnen.

¹ Nach dem Erwärmen der Luft durch die Heizung kann die Luft mehr Wasser aufnehmen, da der Sättigungsdampfdruck höher ist. Dabei kann maximal folgende Menge Wasser aufgenommen werden:

Gesamtheizleistung $P = 329,3 \text{ W}$

Luftfluss $\varphi = 1950 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1} = 0,5417 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$
zugeführte Wärme

Temperaturänderung $\Delta T = \frac{P \Delta t}{c_V \underbrace{\varphi \Delta t \rho_{\text{Luft}}}_{\text{Masse der Luft}}} = \frac{329,3 \text{ W}}{718 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1} \cdot 0,5417 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \cdot 1,2928 \text{ kg m}^{-3}} = 0,65 \text{ K}$

mit $\Delta t =$ Zeitdifferenz $c_V =$ Spezifische Wärmekapazität $\rho_{\text{Luft}} =$ Dichte der Luft

Bei einer maximalen Temperatur von +1 °C beim Heizen wirkt eine Erhöhung der Lufttemperatur auf den Sättigungsdampfdruck wie folgt:

Sättigungsdampfdruck $e_{\text{sat}} = 6,1078 \text{ hPa} \cdot e^{\frac{17,08085 \cdot T}{234,175 + T}} \quad (\text{Magnusformel für } T > 0 \text{ °C})$

Luft bei +1 °C $e_{\text{sat}}(1 \text{ °C}) = 6,568 \text{ hPa}$

Luft bei +1,65 °C $e_{\text{sat}}(1,65 \text{ °C}) = 6,883 \text{ hPa}$

Bei der Annahme, dass bei Nebel die Luft wassergesättigt ist, ergeben sich folgende Wassergehalte:

Wassergehalt $WG = \frac{e_{\text{sat}}}{p_{\text{Luft}}} \quad (p_{\text{Luft}} = \text{Luftdruck})$

Wassergehalt bei +1 °C $WG_{1 \text{ °C}} = 0,006482$

Wassergehalt bei +1,65 °C $WG_{1,65 \text{ °C}} = 0,006793$

Wassergehaltsänderung $\Delta WG = 0,000311 \cdot \frac{0,018 \text{ kg}}{0,0224 \text{ m}^3} = 250 \cdot 10^{-6} \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

Bei der Berechnung der Änderung wird der dimensionslose Wert in mol mol⁻¹ „umgerechnet“ und die Molmasse für Wasser und das Molvolumen für Gase eingesetzt.

Die Probenahme erfolgte im wöchentlichen Wartungsrhythmus. Zur Zwischenlagerung der Proben kam ein Autosampler ISCO zum Einsatz (siehe Abbildung 8), der 24 Proben aufnehmen kann. Der Autosampler wird dazu mit 24 Flaschen bestückt. Ein sich über den Flaschen befindlicher Arm kann jede dieser Flaschen anfahren und bestücken. Außerdem werden der Probenahmeschlauch durch eine Schlauchpumpe geführt und so die Probenahme unterstützt. Da der Autosampler keine einfache Möglichkeit der Ereignis gesteuerten Probenahme besitzt, wurde meist alle 8 h eine neue Flasche angesteuert. Damit ergibt sich eine Maximaldauer von 8 Tagen für den unbeaufsichtigten Betrieb des Sammlers. Während der Frostperiode wurde eine Dachrinnenheizung am Probenahmeschlauch entlang in den Sammler geführt und der Schlauch mit Polyurethan-Material wärmeisoliert. Die Sammelflaschen fassen ca. 11 und sind aus Polypropylen, welches für die vorgesehenen Standardanalysen (pH, Ionen) unproblematisch ist.

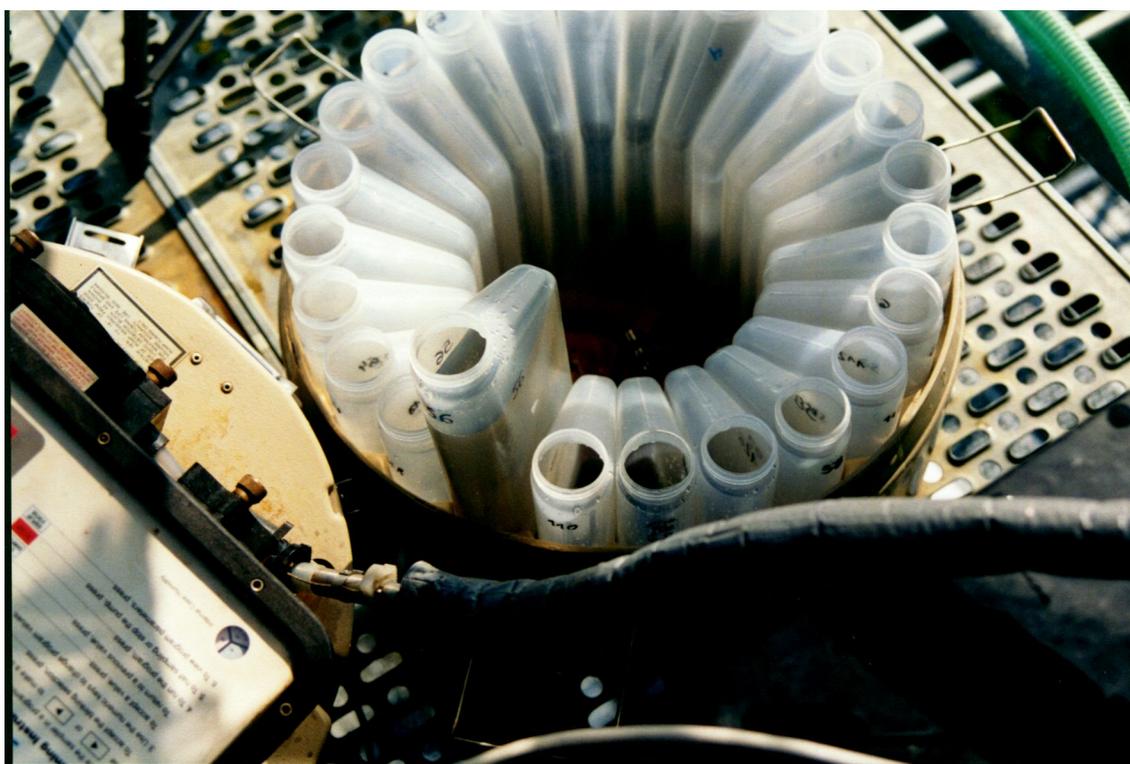


Abbildung 8: Der verwendete ISCO-Autosampler mit Nebelproben (eigenes Foto).

2.2.2.5 Berechnung der Sammeleigenschaften

Auch wenn der BCC-Sammler nach dem Vorbild des CASCC gebaut wurde, ist seine Sammelcharakteristik deutlich verändert. Hauptursache sind die dickeren Sammelfäden und der veränderte Luftfluss. Der Luftfluss wurde in einem Laborexperiment gemessen. Dazu kam ein Hitzedrahtanemometer zum Einsatz, mit dem an 144 Punkten des Querschnitts am Sammlereinlass des BCC die Luftgeschwindigkeit gemessen wurde. An jedem Punkt wurde bis zur Einstellung eines konstanten Wertes gewartet und dieser Endwert aufgezeichnet. In Abbildung 9 ist die Verteilung der Luftgeschwindigkeiten visualisiert. Die gemessenen Geschwindigkeiten sind am Rand höher als in der Mitte. Die mittlere Ansauggeschwindigkeit wurde als Mittelwert der nach repräsentierter Fläche gewichteten Summe der Einzelwerte ermittelt (die 23 cm-Reihe repräsentiert jeweils geringere Flächen als die anderen Messungen). Daraus ergibt sich eine mittlere Ansauggeschwindigkeit von $8,07 \text{ m s}^{-1}$.

Nach [Demoz *et al.* 1996] wurden die 50 %-Diskrimierungsgröße (cut size) für Nebeltropfen und die theoretische Sammeleffizienz des Sammlers berechnet. Die in dieser Arbeit angegebene Berechnungsmethode für die Sammeleffizienz einzelner Harfen ist durch einen Druckfehler

verfälscht und wurde nach [Collett 2001] korrigiert. Danach folgt zur Berechnung der Sammeffizienz einer Saite (dimensionslose Stokes'sche Zahl St) gemäß (1) als Funktion des Tropfendurchmessers.

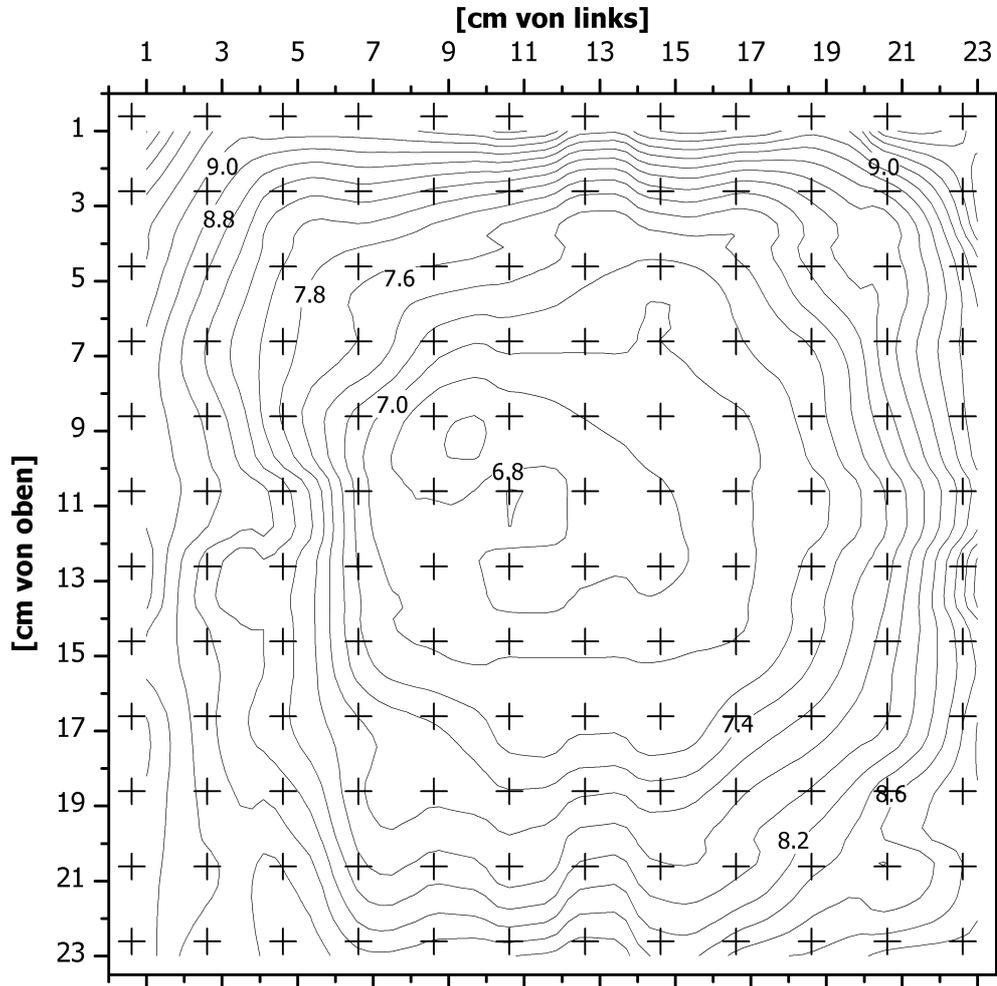


Abbildung 9: Luftgeschwindigkeitsverteilung [m s^{-1}] im Querprofil des Einlasses des verwendeten BCC-Nebelsammlers. Die Linien sind Isotachen der Luft. Die Kreuze markieren die Messpunkte. Die Daten wurden für die Darstellung interpoliert und die Isotachen geglättet.

$$St = \frac{\rho_{\text{Wasser}} d^2 v_{\text{Luft}} \cos \alpha}{9 \eta_{\text{Luft}} d_s} \quad (1)$$

mit ρ Dichte [kg m^{-3}] d Tropfendurchmesser [m]
 v Strömungsgeschwindigkeit [m s^{-1}] α Anstellwinkel der Saite
 η Dynamische Viskosität [$\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$] d_s Saitendurchmesser [m]

Für die Gesamteffizienz einer Harfe ε_H wird die korrigierte Version (2) aus [Demos *et al.* 1996] verwendet:

$$\varepsilon_H = \frac{St^3}{St^3 + 0,753 St^2 + 2,796 St + 0,202} \quad (2)$$

Die Gesamteffizienz aller Harfen ε errechnet sich dann nach (3):

$$\varepsilon = 1 - (1 - \varepsilon_H a)^n \quad (3)$$

mit a der durch die Saiten abgedeckte Anteil des Sammlerquerschnittes
 n Anzahl der Nebelharfen

Für die oben genannten Größen wurden folgende Werte eingesetzt (bei Temperatur $T = 0^\circ\text{C}$):

$$\begin{aligned} \rho_{\text{Wasser}} &= 1000 \text{ kg m}^{-3} & v_{\text{Luft}} &= 8,07 \text{ m s}^{-1} & \alpha &= 35^\circ \\ \eta_{\text{Luft}} &= 1,732 \cdot 10^{-6} \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1} & d_s &= 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ m} & a &= \frac{1,5}{5} = 0,3 & n &= 6 \end{aligned}$$

Die so berechnete Funktion der Sammeleffizienz $\varepsilon(d)$ ist in Abbildung 10 im Vergleich mit dem CASCC dargestellt.

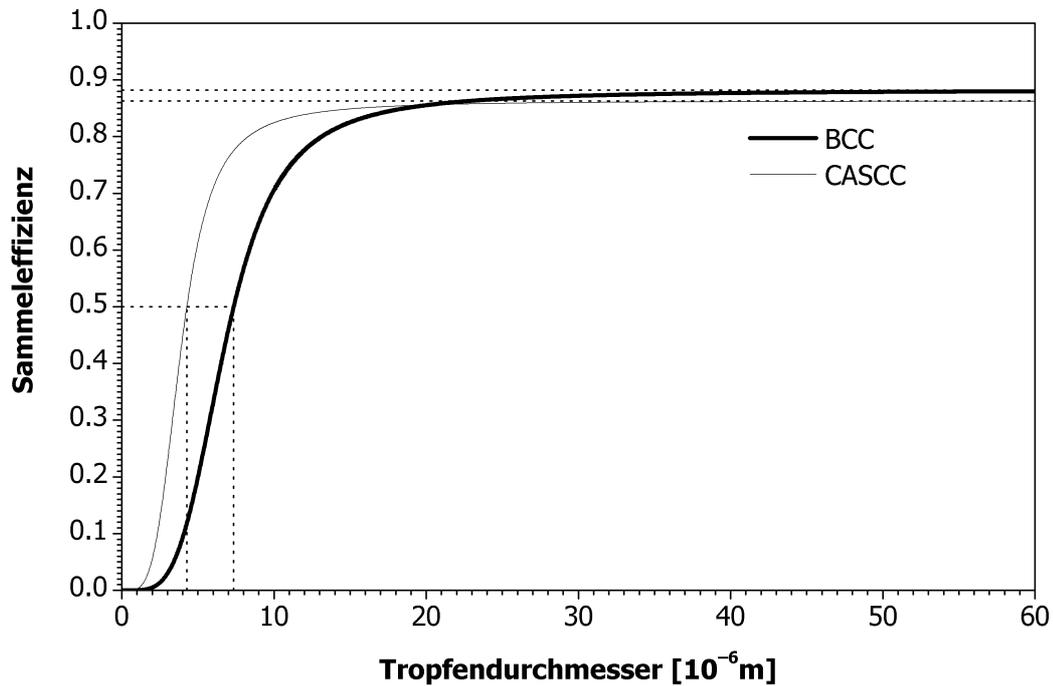


Abbildung 10: Sammeleffizienz des BCC-Nebelsammlers im Vergleich mit dem CASCC. Die gepunkteten Linien geben die Lage der jeweiligen cut size (50 %-Sammeleffizienz) und der theoretischen Sammeleffizienz (Asymptote der Grafen) an.

Für eine Sammeleffizienz von $\varepsilon = 50\%$ ergibt sich die 50 %-Diskriminierungsgröße (cut size). Sie liegt für den BCC bei den gegebenen Bedingungen bei $7,3 \mu\text{m}$ und damit über den von [Demoz *et al.* 1996] ermittelten $3,5 \mu\text{m}$ für den CASCC. Die maximal mögliche oder theoretische Sammeleffizienz liegt für den BCC bei $88,2\%$ (für $d \rightarrow \infty$) und ist damit etwas höher als die des CASCC mit 86% . Die wirkliche Sammeleffizienz $\varepsilon_{\text{wahr}}$ ist von der jeweiligen Tropfengrößenverteilung des Nebels abhängig. Sie berechnet sich gemäß (4) aus dem Integral über die durch die jeweilige Sammeleffizienz korrigierte Flüssigwassergehaltsverteilung $LWC(d)$.

$$\varepsilon_{\text{wahr}} = \frac{\int_0^{\infty} \varepsilon(d) LWC(d) dd}{\int_0^{\infty} LWC(d) dd} \quad (4)$$

Nach dem Übergang zu diskreten Werten (in den 40 gemessenen Klassen) ergibt sich (5).

$$\varepsilon_{\text{wahr}} = \frac{\sum_{i=1}^{i=40} \varepsilon(d_i) LWC(d_i)}{\sum_{i=1}^{i=40} LWC(d_i)} \quad (5)$$

Verwendet man das mittlere gemessene Spektrum (siehe Kapitel 3.4.1) ergibt sich mit (5) eine tatsächliche Sammeleffizienz von 78,5 %.

Während der Messung von interstitiellem Aerosol wurde der Sammler um ein zusätzliches Modul zur Beprobung dieses Aerosols erweitert. Die durch dessen Einsatz veränderten Sammeleigenschaften können [Grießbaum 2002] entnommen werden.

2.2.3 Messung der Nebelwasser-Deposition

2.2.3.1 Berechnungsverfahren

Der Eintrag von Nebeltropfen in ein Ökosystem beruht vor allem auf zwei physikalischen Prozessen. Zum einen spielt die gravitativ verursachte Sedimentation der Tropfen eine Rolle und zum anderen ist der turbulente, durch die Umgebungsluft getragene Austausch zwischen Oberfläche (Vegetation) und Atmosphäre ursächlich. Im Gegensatz zum Eintrag der meisten Gase und kleinster Partikel spielt laut [Friedlander 2000] die Diffusion im Partikelgrößenbereich von über 1 μm keine Rolle.

Sedimentation

Der sedimentative Anteil der Deposition lässt sich nach [Beswick *et al.* 1991] über die Sedimentationsgeschwindigkeit v_s nach Stokes gemäß (11) errechnen.

$$v_s = \frac{g d^2 (\rho_{\text{Wasser}} - \rho_{\text{Luft}})}{18 \eta_{\text{Luft}}} \quad (6)$$

mit g Erdbeschleunigung [m s^{-2}] d Tropfendurchmesser [m]
 η Dynamische Viskosität [$\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$] ρ Dichte [kg m^{-3}]

Für die Erdbeschleunigung wurde der Normwert von $9,81 \text{ m s}^{-2}$, für die Dichte des Wassers 1000 kg m^{-3} , für die Dichte von Luft $1,293 \text{ kg m}^{-3}$ und für den Tropfendurchmesser der mittlere Klassendurchmesser (vergleiche Tabelle 7) verwendet sowie die Viskosität nach (7) berechnet.

$$\eta = \eta_0 \sqrt{\frac{T}{T_0}} \cdot \frac{1 + \frac{C}{T_0}}{1 + \frac{C}{T}} \quad (7)$$

mit η_0 Viskosität bei T_0 und 101325 Pa (für Luft: $1,708 \cdot 10^{-5} \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$)
 T aktuelle Temperatur [K] T_0 Normtemperatur (273,15 K)
 C Temperaturkorrekturfaktor für Luft (106,8 K)

Die mittleren Sedimentationsgeschwindigkeiten im Bereich des verwendeten Tropfenspektrums können Tabelle 6 entnommen werden. Sie schwanken zwischen $0,07 \text{ cm s}^{-1}$ (Durchmesser $1,5 \mu\text{m}$) und 7 cm s^{-1} (Durchmesser $50 \mu\text{m}$).

Die sedimentative oder gravitative Deposition D von Nebelwasser wird schließlich durch Multiplikation der Sedimentationsgeschwindigkeit $v_{s,i}$ mit dem Flüssigwassergehalt LWC_i der jeweiligen Klasse i berechnet (8).

$$D = \sum_i v_{s,i} \cdot LWC_i \quad (8)$$

Tabelle 6: Mittlere Sedimentationsgeschwindigkeiten v_s der Nebeltropfen in den 40 vom FM-100 gemessenen Größenklassen in Abhängigkeit vom mittleren Durchmesser d .

d [m]	v_s [m s ⁻¹]	d [m]	v_s [m s ⁻¹]	d [m]	v_s [m s ⁻¹]	d [m]	v_s [m s ⁻¹]
$1,5 \cdot 10^{-6}$	$7,1 \cdot 10^{-5}$	$1,1 \cdot 10^{-5}$	$3,8 \cdot 10^{-3}$	$2,1 \cdot 10^{-5}$	$1,4 \cdot 10^{-2}$	$3,6 \cdot 10^{-5}$	$4,0 \cdot 10^{-2}$
$2,0 \cdot 10^{-6}$	$1,3 \cdot 10^{-4}$	$1,2 \cdot 10^{-5}$	$4,5 \cdot 10^{-3}$	$2,2 \cdot 10^{-5}$	$1,6 \cdot 10^{-2}$	$3,7 \cdot 10^{-5}$	$4,4 \cdot 10^{-2}$
$3,0 \cdot 10^{-6}$	$2,8 \cdot 10^{-4}$	$1,3 \cdot 10^{-5}$	$5,3 \cdot 10^{-3}$	$2,4 \cdot 10^{-5}$	$1,8 \cdot 10^{-2}$	$3,9 \cdot 10^{-5}$	$4,7 \cdot 10^{-2}$
$4,0 \cdot 10^{-6}$	$5,1 \cdot 10^{-4}$	$1,4 \cdot 10^{-5}$	$6,2 \cdot 10^{-3}$	$2,5 \cdot 10^{-5}$	$2,0 \cdot 10^{-2}$	$4,0 \cdot 10^{-5}$	$5,1 \cdot 10^{-2}$
$5,0 \cdot 10^{-6}$	$7,9 \cdot 10^{-4}$	$1,5 \cdot 10^{-5}$	$7,1 \cdot 10^{-3}$	$2,7 \cdot 10^{-5}$	$2,3 \cdot 10^{-2}$	$4,2 \cdot 10^{-5}$	$5,5 \cdot 10^{-2}$
$6,0 \cdot 10^{-6}$	$1,1 \cdot 10^{-3}$	$1,6 \cdot 10^{-5}$	$8,1 \cdot 10^{-3}$	$2,8 \cdot 10^{-5}$	$2,5 \cdot 10^{-2}$	$4,3 \cdot 10^{-5}$	$5,9 \cdot 10^{-2}$
$7,0 \cdot 10^{-6}$	$1,5 \cdot 10^{-3}$	$1,7 \cdot 10^{-5}$	$9,1 \cdot 10^{-3}$	$3,0 \cdot 10^{-5}$	$2,8 \cdot 10^{-2}$	$4,5 \cdot 10^{-5}$	$6,3 \cdot 10^{-2}$
$8,0 \cdot 10^{-6}$	$2,0 \cdot 10^{-3}$	$1,8 \cdot 10^{-5}$	$1,0 \cdot 10^{-2}$	$3,1 \cdot 10^{-5}$	$3,1 \cdot 10^{-2}$	$4,6 \cdot 10^{-5}$	$6,8 \cdot 10^{-2}$
$9,0 \cdot 10^{-6}$	$2,6 \cdot 10^{-3}$	$1,9 \cdot 10^{-5}$	$1,1 \cdot 10^{-2}$	$3,3 \cdot 10^{-5}$	$3,4 \cdot 10^{-2}$	$4,8 \cdot 10^{-5}$	$7,2 \cdot 10^{-2}$
$1,0 \cdot 10^{-5}$	$3,2 \cdot 10^{-3}$	$2,0 \cdot 10^{-5}$	$1,3 \cdot 10^{-2}$	$3,4 \cdot 10^{-5}$	$3,7 \cdot 10^{-2}$	$4,9 \cdot 10^{-5}$	$7,7 \cdot 10^{-2}$

Turbulenter Anteil

Der turbulente Anteil wird über das so genannte Eddy-Kovarianz-Verfahren¹ bestimmt. Dieses Verfahren eignet sich zur direkten Messung turbulenter Vertikalflüsse und wurde in den letzten Jahren zum Standard für die Messung dieser Flüsse von Luftbeimengungen wie Gasen (z.B. Kohlendioxid und Wasserdampf) und Energie (sensibler Wärmestrom). Am Waldstein wird dieses Verfahren seit 1996 für verschiedene Parameter angewandt. Messungen von Kohlendioxid CO₂ und Wasser H₂O wurden in den letzten Jahren durch die Bestimmung der turbulenten Flüsse von Ozon O₃ und Partikeln ergänzt. Die Erweiterung des Verfahrens durch so genannte Relaxed Eddy Accumulation (REA) erlaubt eine Anwendung auf die Messung weiterer Beimengungen wie z. B. Kohlenstoffisotopen [Wichura *et al.* 2001], flüchtige Kohlenwasserstoffe VOC oder Ammoniak NH₃.

Das Eddy-Kovarianz-Verfahren ist als mikrometeorologisches Quasi-Standard-Verfahren für die Ökosystemforschung mittlerweile in etlichen Lehrbüchern ausführlich beschrieben. Als Beispiele seien hier [Stull 1988], [Kaimal und Finnigan 1994] und [Foken 2003a] genannt. Daher soll hier das Verfahren nur kurz dargelegt werden. Für die Berechnung kam ein Programm von Herrn Dr. Werner Eugster² zum Einsatz, welches vom Autor freundlicherweise zur Verfügung gestellt und teilweise an die speziellen Parameter der vorliegenden Messreihen angepasst wurde. Dieses Programm „convertall“ [Geissbühler *et al.* 2000] läuft auf dem Betriebssystem Linux³ mit x86-Prozessoren und erlaubt die Berechnung der turbulenten Flüsse und anderer mikrometeorologischer Parameter. Es wurde die Version 11.08 für die Rechnungen genutzt.

Der aktuelle turbulente Fluss einer Luftbeimengung an einem Punkt im Raum errechnet sich, wie in (9) beschrieben, aus der vertikalen Windkomponente w und der Konzentration der Luftbeimengung x .

$$D = w \cdot x \quad (9)$$

¹ oft auch als Eddy-Korrelations-Verfahren bezeichnet (s. str. sind beide Verfahren nicht gleich – siehe [Foken 2003a])

² Adresse: PD Dr. W. Eugster, Geographisches Institut der Universität Bern, Hallerstr. 12, 3012 Bern, Schweiz. Neue Adresse seit 2003: PD Dr. W. Eugster, ETH Zentrum/LfW, Universitätsstr. 2, 8092 Zürich, Schweiz

³ Portierung auf andere Betriebssysteme und Prozessorarchitekturen möglich

Eine Summation der einzelnen Flüsse über einen Zeitraum bei hinreichend zeitlicher Auflösung⁴ ergibt dann den Gesamtfluss an diesem Punkt. Um aus den punktuellen Einzelwerten in einer Höhe den Oberflächenfluss für ein ganzes Gebiet errechnen zu können⁵, müssen bei der Verwendung des Eddy-Kovarianz-Verfahrens bestimmte Voraussetzungen erfüllt sein [Stull 1988], [Foken 2003a]. Dazu zählen Stationarität⁶ (zeitliche Invarianz) der vertikalen Windkomponente w und der Luftbeimengung x sowie die horizontale Homogenität⁷ der Unterlage (Vegetation, Relief etc.). Bei Messungen unter natürlichen Bedingungen können diese Voraussetzungen oft nur partiell erfüllt werden. Ausführliche Untersuchungen zu einem gewählten Standort sind daher vor der Anwendung des Eddy-Kovarianz-Verfahrens notwendig. [Mangold 1999] konnte für den Standort Weidenbrunnen vor allem für die Messung des Vertikalwindes w , welcher für die Flussmessungen entscheidend ist, keine signifikante Beeinträchtigung durch das Relief am Waldstein und andere Faktoren feststellen. Die Stationarität wird für die Messungen während der Datenverarbeitung überprüft. Näheres dazu findet sich in Kapitel 2.2.3.4.

Nach den diversen Vereinfachungen und Annahmen (Stationarität von w) ergibt sich für den Fluss, dass dieser gleich der Kovarianz aus Vertikalwind w und der Konzentration der Luftbeimengung x ist [Foken 2003a]. Für die Berechnung des Nebelwasserflusses als Kovarianz aus Vertikalwind w und Flüssigwassergehalt LWC ergibt sich der in (10) dargestellte Zusammenhang.

$$\overline{w' LWC'} = \frac{1}{N-1} \left[\sum_{i=0}^{N-1} (w_i \cdot LWC_i) - \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} w_i \sum_{i=0}^{N-1} LWC_i \right] \quad (10)$$

mit	N	Anzahl der Datensätze	$\overline{w' LWC'}$	Nebelwasserfluss [$\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$]
	i	Datensatznummer	w_i	vertikaler Wind [m s^{-1}]
	LWC_i	Flüssigwassergehalt [kg m^{-3}]		

Formel (10) findet Anwendung sowohl für die Berechnung des Gesamtflusses als auch für den Fluss in den einzelnen Messkanälen (Tropfengrößen). Verwendet werden dabei nicht die originalen Datensätze. Die Messdaten des Windes in den drei Raumrichtungen u , v und w werden für die Bildung der 5-min- oder 30-min-Flüsse zweimal rotiert [Aubinet *et al.* 2000]⁸. Zuerst wird das Windfeld um die vertikale z -Achse in den Wind rotiert, bis der Mittelwert der Horizontalkomponente v Null wird. Anschließend rotiert man noch um die y' -Achse⁹ bis der mittlere Vertikalwind w gleich Null wird. Diese Rotationen korrigieren neben dem eventuell schiefen Aufbau des Ultraschallanemometers auch die mögliche Neigung des Windfeldes aufgrund der Hangneigung.

Für die weitere Charaktisierung und Qualitätskontrolle der Daten sind noch einige zusätzliche Parameter zu bestimmen. Diese werden vom verwendeten Programm automatisch mit berechnet und ausgegeben. Ein Parameter zur Turbulenz-Charakterisierung ist die so genannte Schubspannungsgeschwindigkeit u_* . Diese beschreibt die Unterschiede des Horizontalwindes in verschiedenen Höhen (logarithmisches Windprofil) und wird durch das Programm gemäß (11) berechnet. Zu beachten ist, dass die bereits rotierten Daten zu verwenden sind (s. o.). Die Formel errechnet für positive Impulsflüsse, welche bei instationären oder inhomogenen Bedingungen auftreten können, negative u_* , was für die weitere Auswertung hilfreich ist.

⁴ üblicherweise 10 bis 20 Hz.

⁵ Der Übergang von zeitlichen Messungen ist aufgrund der Taylorschen Hypothese [Stull 1988] unter bestimmten Voraussetzungen möglich.

⁶ Damit fallen in den Bewegungsgleichungen alle partiellen Ableitungen nach der Zeit weg.

⁷ Dies ermöglicht den Übergang von zeitlichen zu räumlichen Messergebnissen.

⁸ Ursprünglich von [Tanner und Thurtell 1969] vorgeschlagen.

⁹ Nach der ersten Rotation wird das neue Koordinatensystem durch ' gekennzeichnet.

$$u_* = - \frac{\overline{u'w'}}{\sqrt{|\overline{u'w'}|}} \quad (11)$$

mit $\overline{u'w'}$ Kovarianz aus den Windkomponenten u und w (Impulsfluss) [$\text{m}^2 \text{s}^{-2}$]

Bei der Bestimmung der Stabilität der Atmosphäre wird der Stabilitätsparameter ζ genutzt. Dieser berechnet sich gemäß (6) aus der aerodynamischen Höhe z_0 , die sich aus der Differenz von Messhöhe b (31,5 m) und Verschiebungshöhe¹ d_0 (12,5 m) errechnet, und der Obukhov-Länge L . Die Obukhov-Länge errechnet sich im Programm gemäß Formel (13). Die Anpassung² gegenüber [Stull 1988] ergibt sich aus der Zulassung negativer Schubspannungsgeschwindigkeiten in (11).

$$\zeta = \frac{z_0}{L} = \frac{b - d_0}{L} \quad (12)$$

$$L = - \frac{|u_*^3| \cdot T_{\text{sonic}}}{g \kappa w' T'_{\text{sonic}}} \quad (13)$$

mit g Erdbeschleunigung ($9,80665 \text{ m s}^{-2}$) T_{sonic} Schalltemperatur [K]
 κ von-Kármán-Konstante (0,4) u_* siehe (12) [m s^{-1}]

2.2.3.2 Messinstrumentation

Für die direkte Messung der Nebelwasserdeposition kam ein System aus einem Ultraschallanemometer Young 81000³ und einem schnellen Tropfenspektrometer FM-100 von Droplet Measurement Technologies⁴ zum Einsatz (siehe Abbildungen 11 und 12).

Das gesamte System war auf dem Messturm am Weidenbrunnen in einer Höhe von 30 m⁵ an einem 2 m nach außen überstehenden Ausleger angebracht. Der Ausleger konnte zur Wartung zum Turm hin eingeklapppt werden. Das System aus FM-100 und Ultraschallanemometer kann über einen Antennenrotor komplett gedreht⁶ werden. Das wurde genutzt, um das System alle halbe Stunde in den mittleren Wind der vorangegangenen 30 min zu drehen und so ein optimales Anströmen für das FM-100 zu gewährleisten. Dabei wurde auf volle 5° gerundet. Gesteuert wurde der Antennenrotor durch eine Stubben-Euromess-Steuerplatine, an die eine Windfahne angeschlossen war, welche in Höhe des Auslegers ca. 2,5 m vom FM-100 entfernt montiert wurde. Die Zeit zum Nachführen des Systems beträgt maximal 1 min (komplette 360°), bei den meisten Korrekturen⁷ war sie unter 3 s.

Das Nebeltropfenspektrometer FM-100 war zum Schutz der diversen elektronischen Anschlüsse in einer Blechbox befestigt. Die Anschlüsse an der Rückseite (Stromzufuhr, Datenkabel und Schlauch zur Ansaugpumpe) wurden so geführt, dass sie beim Drehen die Messung nicht behindern konnten. Die Ansaugpumpe war aus Gewichtsgründen und um das Windfeld nicht zusätzlich zu verändern auf der obersten Plattform des Turmes befestigt. Sie wurde separat durch die Steuerplatine geschaltet.

¹ Nach [Garratt 1992] ist die Verschiebungshöhe gleich 0,66-mal die Bestandeshöhe (ca. 20 m).

² [Stull 1988]: Verwendung von u_*^3 statt $|u_*^3|$

³ R.M. Young Company, 2801 Aero Park Drive, Traverse City, MI 48686, USA.

⁴ Droplet Measurement Technologies Inc., 5710 Flatiron Parkway, Boulder, CO 80301, USA

⁵ Unterkante des Auslegers; der FM-100 befand sich in einer Höhe von 31 m, das Ultraschallanemometer auf 31,5 m.

⁶ Drehbereich insgesamt 450° (von -45° bis +405°).

⁷ 90 % der Fälle war der Drehwinkel kleiner oder gleich 15°.



Abbildung 11: Das Nebeltropfenspektrometer FM-100 in der Ansicht von hinten im eingebauten Zustand. Quelle: eigenes Foto.

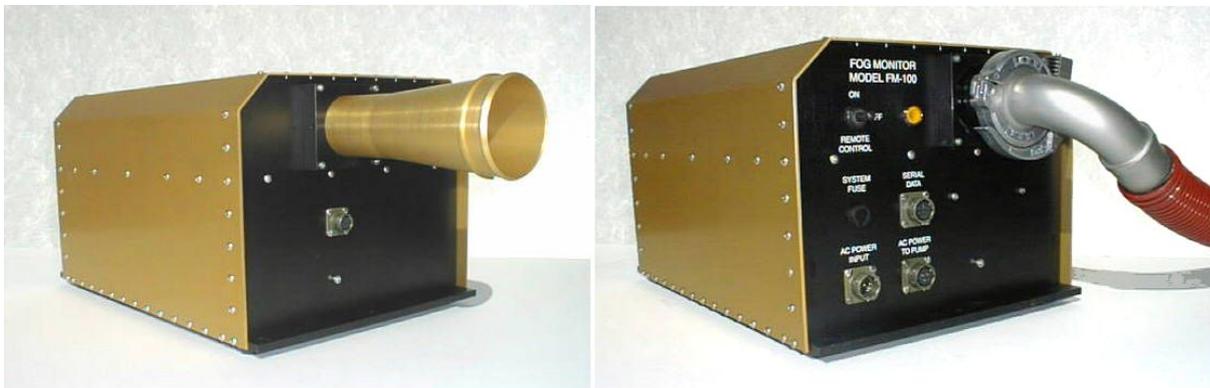


Abbildung 12: Front- und Rückansicht (rechts) des Tropfenspektrometers FM-100 von Droplet Measurement Technologies (DMT). Quelle: [DMT 1999].

Auf der Oberseite der Blechbox war an einem Stück Rohr ein Young Ultraschallanemometer 81000 befestigt. Der Abstand zwischen dem Ultraschallanemometer und dem FM-100-Einlass betrug vertikal 60 cm und horizontal 0 cm.

Das Tropfenspektrometer FM-100¹ der Firma Droplet Measurement Technologies (DMT) ist ein neuartiges Gerät zur schnellen Erfassung von Tropfengrößenspektren. Es kann im Bereich von 2,0 bis 50 μm Durchmesser die Anzahl der Nebeltropfen bestimmen [DMT 2000]. Der Größenbereich wird in 10, 20, 30 oder 40 Klassen unterteilt. Für die Feldmessungen am Waldstein wurden 40 Klassen verwendet. Tabelle 7 listet die entsprechenden Klassen mit ihren minimalen, maximalen und mittleren Tropfendurchmessern auf.

¹ FM: fog monitor (engl., svw. Nebelanzeiger)

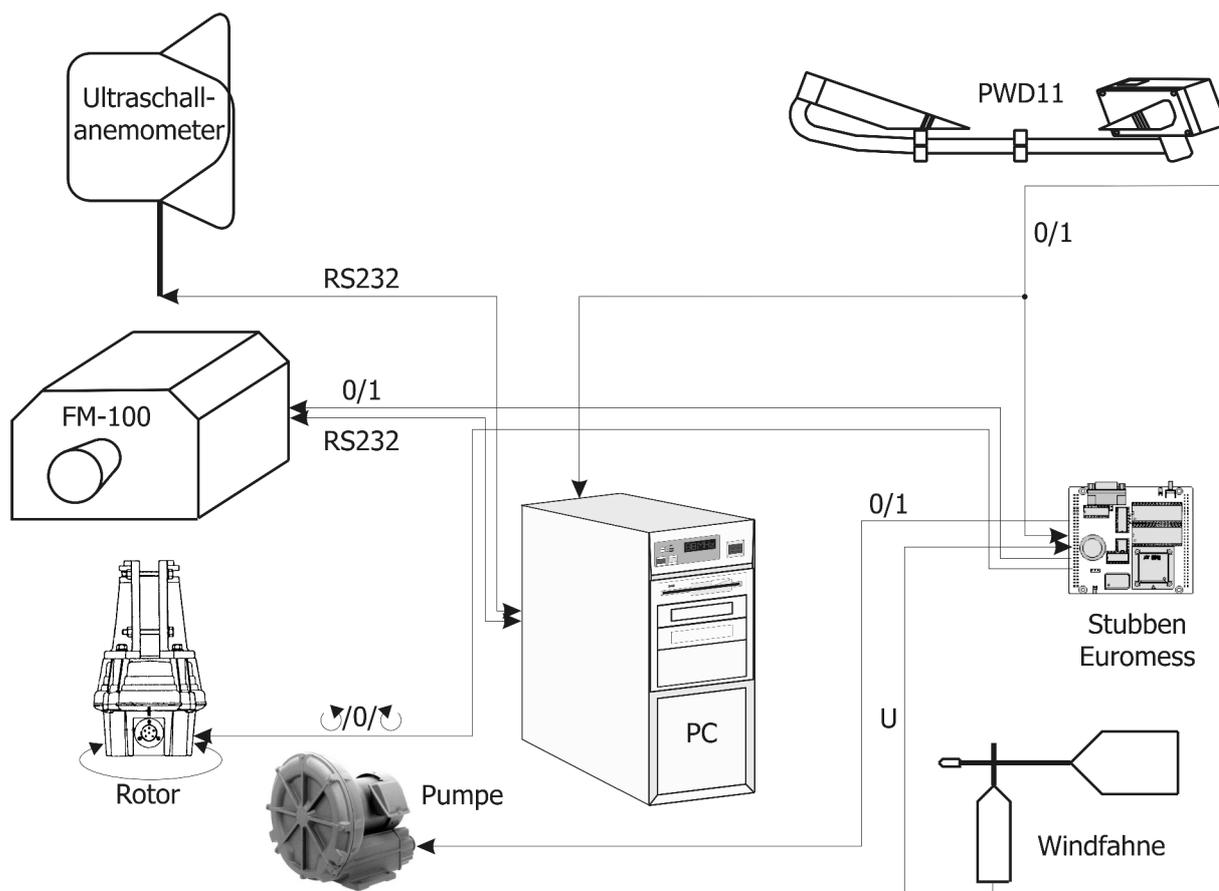


Abbildung 13: Schaltungschema des Depositionssystems am Waldstein. Die Linien zwischen den Geräten geben die Kabelführung an, die Beschriftung die Art der übertragenen Daten (RS 232 = serielle Daten, U = Spannungswert, 0/1 = aus/an, Rotor-Drehrichtung)

Tabelle 7: Verwendete Größenklassen für die Messungen mit dem Tropfenspektrometer FM-100. Der OPC-Grenzwert ist der intern im FM-100 genutzte Wert (wird über eine vom Hersteller gelieferte Software berechnet). Das Klassenmittel ist der Durchmesser, der für weitere Berechnungen (LWC, Flüsse etc.) als Klassenwert verwendet wurde. Minimum und Maximum beziehen sich auf den Tropfendurchmesser.

Klasse	OPC-Grenzwert ²	Minimum [μm]	Maximum [μm]	Klassenmittel [μm]
1	17	0	1,5	1,5
2	46	1,5	2,5	2
3	77	2,5	3,5	3
4	102	3,5	4,5	4
5	128	4,5	5,5	5
6	157	5,5	6,5	6
7	178	6,5	7,5	7
8	198	7,5	8,5	8
9	241	8,5	9,5	9
10	285	9,5	10,5	10
11	332	10,5	11,5	11
12	381	11,5	12,5	12
13	434	12,5	13,5	13
14	489	13,5	14,5	14

² Rohwert (Analog/Digital) der Intensität des rückgestreuten Lichts

Klasse	OPC-Grenzwert	Minimum [μm]	Maximum [μm]	Klassenmittel [μm]
15	554	14,5	15,5	15
16	613	15,5	16,5	16
17	675	16,5	17,5	17
18	739	17,5	18,5	18
19	805	18,5	19,5	19
20	866	19,5	20,5	20
21	943	20,5	21,5	21
22	1064	21,5	23	22,25
23	1191	23	24,5	23,75
24	1324	24,5	26	25,25
25	1464	26	27,5	26,75
26	1609	27,5	29	28,25
27	1749	29	30,5	29,75
28	1909	30,5	32	31,25
29	2075	32	33,5	32,75
30	2247	33,5	35	34,25
31	2426	35	36,5	35,75
32	2610	36,5	38	37,25
33	2801	38	39,5	38,75
34	2980	39,5	41	40,25
35	3157	41	42,5	41,75
36	3337	42,5	44	43,25
37	3521	44	45,5	44,75
38	3709	45,5	47	46,25
39	3900	47	48,5	47,75
40	4096	48,5	50	49,25

Das Messprinzip des FM-100 beruht auf der Streuung von Laserlicht an den Tropfen in der Messstrecke. Die Intensität des zurück gestreuten Lichts wird über zwei Photodioden erfasst und ausgewertet. Pro Messung werden vom FM-100 insgesamt 54 Parameter ausgegeben. Neben den 40 Tropfenzahlen in den diversen Größenklassen werden 8 interne Messdaten (Grundlinie Signal, Grundlinie Maske, Umgebungstemperatur, Laser-Stromstärke, Laser-Leistung, Statischer Staurohr-Luftdruck, Dynamischer Staurohr-Luftdruck und Gerätetemperatur), die Anzahl nicht gemessener Tropfen¹, mittlere Aufenthaltsdauer der Tropfen in der Messzone, die Anzahl der Überläufe des FIFO-Speichers, ein Status² und die Anzahl der Überläufe des A/D-Wandlers ausgegeben. Schließlich wird zur Kontrolle noch eine Prüfsumme gesendet. Aus Umgebungstemperatur, statischem und dynamischem Druck wird im Nachhinein der Luftfluss durch das Gerät und darüber das Probevolumen V_{Probe} nach [DMT 2000] errechnet (14).

$$p_{\text{dyn}} = 0,00243067 \cdot (A/D_6 - 2047,5) \quad \text{Dynamischer Druck [hPa]}$$

$$p_{\text{stat}} = 1,01022 \cdot (A/D_5 - 2252,25) \quad \text{Statischer Druck [hPa]}$$

$$T_{\text{mess}} = \frac{4}{819} A/D_2 - 150 \quad \text{Gemessene Temperatur [°C]}$$

$$M = \sqrt{2 \frac{c_v}{R} \left[\left(\frac{p_{\text{dyn}}}{p_{\text{stat}}} \right)^{\frac{R}{c_p}} - 1 \right]} \quad \text{Machzahl [1]}$$

¹ eigentlich zwei Werte: 1. Wert: Tropfen nicht in der Messzone, 2. Wert: beim FM-100 nicht verwendet

² zeigt an, ob das FM-100 seine Konfiguration zurück gesetzt hat

$$T_{\text{Luft}} = \frac{T_{\text{mess}}}{\frac{c_p}{c_v} - 1 + M^2 \frac{c_v}{2}} \quad \text{Lufttemperatur [}^\circ\text{C]}$$

$$v_{\text{Ansaug}} = M \cdot 20,06 \sqrt{T_{\text{Luft}}} \quad \text{Ansauggeschwindigkeit [m s}^{-1}\text{]}$$

$$V_{\text{Probe}} = \Delta t \cdot v_{\text{Ansaug}} \cdot A_{\text{Probe}} \quad (14)$$

mit A/D_i Analog/Digital-Wert i
 c spezifische Wärmekapazität ($v = \text{konstantes Volumen, } p = \text{konstanter Druck}$)
 $c_v = 718 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ $c_p = 1005 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$
 R Spezifische Gaskonstante $R = 286,5 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$
 A_{Probe} Messfläche (sample area) $A_{\text{Probe}} = 3,5 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2$

Aufgrund des teilweisen Ausfalls einer Analog-zu-Digital-Wandlereinheit musste die Ansauggeschwindigkeit oft substituiert werden. Dafür waren im Auswerteprogramm bestimmte Schwellenwerte für die Substitution vorzugeben¹. Weitere technische Daten des FM-100 kann man der Tabelle 8 entnehmen.

Tabelle 8: Kenngrößen zum Tropfenspektrometer FM-100

Parameter	Wert	
Versorgungsspannung	230 V	
Leistungsaufnahme	Hornheizung	100 W
	Laserheizung	40 W
	Fensterheizung	40 W
	Optischer Block	40 W
Messfläche („sample area“)	0,35 mm ²	
Pumpenleistung	400 W	
Mittlere Ansauggeschwindigkeit	ca. 14 m s ⁻¹	

Zum gesamten System (siehe Schema in Abbildung 13) gehörten neben den eigentlichen Messgeräten FM-100 und Ultraschallanemometer auch noch das Sichtweitenmessgerät PWD-11, mit dem die Messung gesteuert wurde. Bei Sichtweiten von unter 1700 m wurde mit der Datenerfassung begonnen, das Depositionssystem in den Wind gerichtet, das FM-100 und die Ansaugpumpe gestartet und der 30-min-Rhythmus für die Windausrichtung initialisiert.

Während der Vergleichsmessungen und vorexperimentellen Phase 2000 (siehe Kapitel 3.1) wurde das System mit einer Aufzeichnungsrate von 8,3 Hz betrieben. Eine Optimierung des Ausleseprogramms erlaubte für die Zeit des Hauptexperiments 2001/2002 eine Verbesserung auf 12,5 Hz (siehe auch Kapitel 2.2.4.3).

¹ Für Geschwindigkeiten unter 13 m s⁻¹ und über 15 m s⁻¹ wurde mit dem Mittelwert 14 m s⁻¹ ersetzt.

2.2.3.3 Datenerfassung

Zur Erfassung der Daten musste ein komplett neues System kreiert werden, da die vom Hersteller des FM-100 mitgelieferte Software für Turbulenz-Messungen mit zeitlichen Auflösungen besser als 1 Hz nicht geeignet war. Aufgrund der hohen anfallenden Datenmengen bei einer gewünschten Aufzeichnungsrate von mindestens 6 Hz (dies war eine Schätzung) in 40 Tropfenklassen, drei Windkanälen und bis zu fünf weiteren Datenkanälen können klassische Datenlogger nur bei in-situ--Umrechnung der Daten in Flüsse verwendet werden. Das schließt aber einen Großteil der nötigen Qualitätskontrolle im Nachhinein aus. Daher wurde ein PC mit ausreichend großem Massenspeicher (Festplatte) für die Datenakquisition verwendet. Die Daten des FM-100 und des Ultraschallanemometers wurden über die serielle Schnittstelle abgefragt. Zur Überbrückung der ca. 40 m von Messgerät zum PC in der Schutzhütte am Weidenbrunnen wurde ein Lichtleiter-System von Wiesemann & Theis eingesetzt, durch welches auch eine galvano-optische Entkopplung des PCs von den Messgeräten realisiert wurde. Das Schema des Aufbaus ist in Abbildung 13 dargestellt.

Die selbst entwickelte Software „Acquisio“ läuft aus Gründen der Echtzeit-Sicherheit unter MS DOS 7 (Windows 98). Das Aufzeichnungsformat ist binär und im Wesentlichen von der Ausgabe der Messgeräte vorgegeben. Zusätzlich wurde die Uhrzeit der jeweiligen Messung mit einer Genauigkeit von 1 ms gespeichert. Die Daten wurden meist wöchentlich auf CD-ROM gespeichert und archiviert. Nach der ersten Messperiode 2000 konnte durch einige Optimierungen die Erfassungsrate von 8,3 Hz bei 40 FM-100-Kanälen auf 12,5 Hz verbessert werden. In Tabelle 9 findet sich eine Übersicht des verwendeten Datenformats.

Tabelle 9: Datenstruktur in den Rohdateien der Aufzeichnung

Variable	Position	Datentyp ¹	Inhalt
MSTimer	1 ... 8	QUADWORD ²	Zeit seit 1.1.-4713 12:00 UTC (Julianisches Datum) in ms [MEZ]
FM100	9 ... 204		Daten des FM-100
cabinChan[0 ... 7]	9 ... 24	8× WORD ³	A/D-Werte des FM-100 (u.a. statischer und dynamischer Staudruck und Temperatur zur Flussmessung)
rejDoF	25 ... 28	DWORDS ⁴	Anzahl der nicht gemessenen Partikel mit zu schlechter Signalqualität (Depth-of-Field-Kriterium)
rejAvgTransit	29 ... 32	DWORDS ⁷	im FM-100 ungenutzt
AvgTransit	33 ... 34	WORD ⁶	Rohdatum der Partikelbreiten
FIFOfull	35 ... 36	WORD ⁶	Anzahl der FIFO-Pufferüberläufe
resetFlag	37 ... 38	WORD ⁶	BIT0: Anzeige, ob FM-100 zurück gesetzt wurde
ADCOverflow	39 ... 42	DWORDS ⁷	A/D-Wandler-Überläufe

¹ Wenn nicht anders angegeben „little endian“

² 8-byte-Integer ohne Vorzeichen

³ 2-byte-Integer ohne Vorzeichen

⁴ 4-byte-Integer ohne Vorzeichen, die Einzelworte sind gedreht (swapped)

Variable	Position	Datentyp	Inhalt
OPCChan[0 ... 39]	43 ... 202	40× DWORDs ⁷	Anzahl der in den 40 Größenklassen gemessenen Partikel
checkSum	203 ... 304	WORD ⁶	ASCII-Checksumme der FM-100-Daten
Young	205 ... 224		Daten des Young-81000-Ultraschallanemometers
Header	205 ... 206	WORD ⁶	immer xAB xCD
ID	207	CHAR ¹	Kennung des Young („A“)
ErrorCode	208	BYTE ²	Fehlercode der Messung (0 = OK, andere nicht dokumentiert)
Wind[0 ... 2]	209 ... 214	3× INTs ³	Windvektorkomponenten (u, v, w) in cm s ⁻¹
Temperature	215 ... 216	WORDS ⁴	Schall-Temperatur in 10 ⁻² K
vin[0 ... 3]	217 ... 224	4× WORDs ²	A/D-Wandlerwerte in mV

2.2.3.4 Datenverarbeitung und Qualitätskontrolle

Die Qualitätskontrolle ist die Grundlage für die Weiterverwendung der gemessenen Turbulenzdaten. Dabei sind die Datenverarbeitung (Auswertung) und ihre Kontrolle eng verwoben. Neben einer visuellen Kontrolle der Daten, mit deren Hilfe man bestimmte möglicherweise fehlerhafte Muster erkennen kann, ist eine rechnerische Kontrolle unumgänglich.

Der erste Schritt umfasste die Auswertung der Gerätefehlercodes. Während der Messungen wurde vom Ultraschallanemometer zu jedem Messwert ein solcher Fehlercode ausgegeben. War dieser Wert ungleich Null, wurde der Datensatz komplett verworfen. Außerdem wurde bei der Auswertung der Daten deutlich, dass das anfangs eingesetzte Young 81000 Ultraschallanemometer plötzlich das Vorzeichen des Wertes des Vertikalwindes änderte und somit diese Daten problematisch auszuwerten sind. Ursache für das Fehlverhalten war nach Auskunft des Herstellers eine fehlerhafte Firmware in dem Gerät. Daher wurden die Daten bis zum 17. April 2001 8:35 Uhr (MEZ) komplett für die Turbulenzmessungen verworfen. Das ab dem 17. April 2001 eingesetzte Gerät lief dann unter einer neueren Firmware-Version und zeigte das oben genannte Verhalten nicht mehr.

Im nächsten Schritt wurden mit dem vorgefilterten Datensatz die Flüsse (Kovarianzen) berechnet. Dazu wurden zuerst die Rohdaten von Ultraschallanemometer und Tropfenspektrometer in physikalische Einheiten umgewandelt (Wind, Flüssigwassergehalt je Kanal etc.). Anschließend wurde mit dem Datensatz eine Kreuzkorrelation zwischen der Vertikal-komponente des Windes w und dem Flüssigwassergehalt LWC gerechnet, welche der Ermittlung des so genannten time lag dient. Das time lag ist die zeitliche Verzögerung zwischen der Messung des Windvektors und der Luftbeimengung (hier: LWC) aufgrund der räumlichen Trennung der jeweiligen Messgeräte. Durch die Korrektur der Daten (Versatz der Zeitreihen um dieses time lag) werden die jeweils zusammengehörigen Daten ermittelt. Das time lag ist die Zeitdifferenz, bei der die Kreuzkorrelation den höchsten Korrelationskoeffizienten aufweist. Das time lag ist vom Abstand der Messgeräte, der Windrichtung (bei horizontalem Versatz der Messgeräte) und

¹ einzelnes ASCII-Zeichen

² 1-byte-Integer ohne Vorzeichen

³ 2-byte-Integer mit Vorzeichen, „big endian“ (swapped)

⁴ 2-byte-Integer ohne Vorzeichen, „big endian“ (swapped)

von der Windgeschwindigkeit abhängig. Die Bestimmung ergab größtenteils time lags von 0 oder 80 ms (null oder ein Zeitschritt). Die weitere Auswertung erfolgte dann mit den Daten der um das time lag korrigierten Datenreihe. Auf die Ermittlung des time lag erfolgte eine Rotation des Windfeldes in Richtung des mittleren Windvektors ([Tanner und Thurtell 1969]). Zur Berechnung wurde das Programm „convertall“ verwendet.

Zur Qualitätskontrolle wurden aus den Rohdaten die 5-min- und 30-min-Varianzen der Vertikalkomponente des Windes w und des Flüssigwassergehaltes LWC miteinander verglichen. Weicht der Mittelwert von der 5-min-Varianzen um mehr als 30 % (für w) bzw. mehr als 70 % (LWC) von der 30-min-Varianz ab, so wird der Datensatz verworfen. Dieses auf sowjetische Quellen zurückzuführende Verfahren wird in [Foken und Wichura 1996] beschrieben und ermöglicht eine einfache und effektive Art der Datenkontrolle. Zusätzlich kann noch mit Hilfe der Schubspannungsgeschwindigkeit die bodennahe Atmosphäre als ausgeprägt turbulent oder weniger turbulent gekennzeichnet werden und als Qualitätskriterium herangezogen werden. Der Grenzwert wurde für diese Arbeit auf $0,1 \text{ m s}^{-1}$ festgelegt. Dabei charakterisieren gemessene Schubspannungsgeschwindigkeiten oberhalb des Grenzwertes die Atmosphäre als turbulent durchmischt und Datensätze, deren u_* kleiner als $0,1 \text{ m s}^{-1}$ war, wurden verworfen.

2.2.4 Berechnung von Tropfengrößenverteilung und Flüssigwassergehalt

Die Rohdaten des Tropfenspektrometers FM-100 mussten noch zur Bestimmung von volumenbezogenen Messgrößen nachbereitet werden. Dazu wurde gemäß der Formel (14) das Probevolumen errechnet. Aus ihm lassen sich dann die Anzahlkonzentrationen nach (15), die Flüssigwassergehalte der einzelnen Kanäle nach (16) und der Gesamt-Flüssigwassergehalt nach (17) errechnen.

$$N_i = \frac{n_i}{V_{\text{Probe}}} \quad (15)$$

$$LWC_i = \frac{n_i \cdot \rho_{\text{Wasser}} \cdot \frac{\pi}{6} d_i^3}{V_{\text{Probe}}} \quad (16)$$

$$LWC = \sum_i LWC_i \quad (17)$$

mit	N	Anzahlkonzentration	n	Tropfenzahl [1]
	LWC	Flüssigwassergehalt [kg m^{-3}]	ρ_{Wasser}	Wasserdichte (1000 kg m^{-3})
	d_i	mittlere Klassendurchmesser [m]		
	V_{Probe}	Probevolumen [m^3]	i	Klasse

2.2.5 Regenwassersammler

Der Regenwassersammler ist ein Eigenbau der Universität Bayreuth und wurde der Abteilung Klimatologie für verschiedene Experimente vom Lehrstuhl für Umweltchemie und Ökotoxikologie zur Verfügung gestellt. Der Sammler wurde am Waldstein im Pflanzgarten aufgestellt. Die rechteckige Auffangfläche des Sammlers besteht aus Edelstahl und konnte im Winter zum Schmelzen gesammelten Niederschlags beheizt werden. Auch der Innenraum des Sammlers ist mit einer Heizung versehen. Als Sammelgefäß wurde ein Polyethylen-Kanister verwendet, der bei der Probenahme gegen einen anderen ausgetauscht wurde. Dieser Kanister wurde dann bis zum nächsten Wechsel mit doppelt deionisiertem Wasser gereinigt. Für die vorliegende Arbeit wurden die Proben wöchentlich genommen. Als Schutz vor der Ablagerung

nicht wässriger Luftbestandteile im Sammler ist dieser mit einer Schutzhaube versehen, die, über einen Niederschlagssensor gesteuert, bei Regen oder Schnee geöffnet und nach Ende der Ereignisse wieder geschlossen wird. Daher bezeichnet man solche Sammler in der Literatur oft als „wet only“-Sammler (Nasssammler).

2.2.6 Chemische Analytik

In den Regen- und Nebelwasserproben wurden die elektrische Leitfähigkeit, der pH-Wert und die wichtigsten anorganischen Ionen bestimmt. Bei diesen handelt es sich um die Kationen Ammonium NH_4^+ , Natrium Na^+ , Magnesium Mg^{2+} , Kalium K^+ sowie Calcium Ca^{2+} und die Anionen Chlorid Cl^- , Nitrat NO_3^- , Sulfat SO_4^{2-} und Phosphat PO_4^{3-} .

Die Analysen wurden von der Zentralen Analytik des BITÖK durchgeführt. In Tabelle 10 sind die angewandten Methoden und die jeweiligen Gütemaße der Analytik angegeben.

Tabelle 10: Verwendete analytische Verfahren für die Quantifizierung der gemessenen chemischen Parameter und deren Bestimmungsgrenzen [Moser 2003]. Bei der Messung von Nitrat und Sulfat im Regenwasser wurde aufgrund der geringeren Konzentrationen ein Verfahren mit verbesserter Bestimmungsgrenze verwendet.

Parameter	Verfahren / Messgerät	Bestimmungsgrenze in mg l^{-1} ($\mu\text{mol l}^{-1}$)
elektrische Leitfähigkeit λ	Leitfähigkeitselektrode / WTW Lf 90	
pH-Wert	pH-Elektrode / WTW pH 96	
Natrium Na^+	ICP-AES ¹ / GBC/Integra XMP	0,2 (8,7)
Magnesium Mg^{2+}	ICP-AES ¹ / GBC/Integra XMP	0,05 (2,1)
Kalium K^+	ICP-AES ¹ / GBC/Integra XMP	0,25 (6,4)
Calcium Ca^{2+}	ICP-AES ¹ / GBC/Integra XMP	0,2 (5,0)
Ammonium NH_4^+	FIA ² / Lachat	0,05 (3,1)
Chlorid Cl^-	IC ³ / Dionex/DX 500	0,27 (7,6)
Nitrat NO_3^-	IC ³ / Dionex/DX 500	Nebel: 0,34 (5,5) Regen: 0,038 (0,61)
Sulfat SO_4^{2-}	IC ³ / Dionex/DX 500	Nebel: 0,32 (3,3) Regen: 0,034 (0,35)
Phosphat PO_4^{3-}	IC ³ / Dionex/DX 500	0,28 (2,9)

Bei der Messung des pH-Wertes in Regenproben wurde zur Erhöhung der Ionenstärke Kaliumnitrat-Lösung (KNO_3) zugegeben. Die angegebenen Konzentrationen an H^+ -Ionen berechnen sich aus dem gemessenen pH-Wert nach (18):

$$c_{\text{H}^+} = 10^{-\text{pH}} \quad (18)$$

Die chemische Zusammensetzung des Nebels lässt sich auf den Flüssigwassergehalt der Luft normieren. Diese Daten werden bei der Herkunftsanalyse verwendet. Für den Vergleich von gemessenen Konzentrationen mit der elektrischen Leitfähigkeit wurde die theoretische

¹ inductively coupled plasma - atomic emission spectroscopy (induktiv gekoppeltes Plasma – Atomemissionspektroskopie)

² flow injection analysis (Fließinjektionsanalyse)

³ ion chromatography (Ionenchromatographie)

Leitfähigkeit aus den spezifischen Leitfähigkeiten der einzelnen Ionen und deren Konzentration nach (19) berechnet. Dabei werden für die spezifischen Leitfähigkeiten die in Tabelle 11 dargestellten Werte genutzt.

$$\lambda_{\text{ber}} = \sum_{\text{Ion}} \lambda_{\text{spez, Ion}} \cdot c_{\text{eq, Ion}} \quad (19)$$

mit λ_{ber} berechnete (theoretische) Leitfähigkeit [$\mu\text{S cm}^{-1}$]
 $\lambda_{\text{spez, Ion}}$ spezifische Leitfähigkeit des Ions [$\mu\text{S cm}^{-1} \mu\text{eq}^{-1}$]
 $c_{\text{eq, Ion}}$ Äquivalentkonzentration des Ions [$\mu\text{eq l}^{-1}$]

Tabelle 11: Spezifische Leitfähigkeiten in $\mu\text{S cm}^{-1} \mu\text{eq}^{-1}$ l für die gemessenen Ionen. Quelle: [D'Ans und Lax 1992].

Ion	H ⁺	Na ⁺	K ⁺	NH ₄ ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	PO ₄ ³⁻
Spezifische Leitfähigkeit	0,3497	0,0501	0,0735	0,0735	0,053	0,0595	0,0763	0,0714	0,08	0,069

Um die gemessenen Konzentrationen auf die umgebene Luft zu beziehen, berechnet man die Belastung der Luft über den Flüssigwassergehalt. Damit erhält man eine nebelgetragene Belastung der Luft je Volumen. Die Berechnung erfolgt nach (20):

$$c_{\text{Luft}} = \frac{c_{\text{Nebel}}}{\varrho_{\text{Wasser}}} \cdot LWC \quad (20)$$

mit c_{Luft} Luftbelastung [kg m^{-3}]
 c_{Nebel} Konzentration im Nebel [kg m^{-3}]
 ϱ_{Wasser} Dichte von Wasser [kg m^{-3}]
 LWC Flüssigwassergehalt der Luft [kg m^{-3}]

2.2.7 Berechnung des nebelgebundenen Spurenstoffeintrags

Die Berechnung des Eintrags von Inhaltsstoffen des Nebelwassers in das Waldökosystem am Waldstein erfolgte Ereignis bezogen nach Ansatz (21).

$$D_x = c_x \cdot v_d \cdot \Delta t \quad (21)$$

mit D_x Gesamtdeposition der Spezies x während der Messperiode [kg m^{-2}]
 c_x Gemessene Konzentration der Spezies x im Ereignis [kg m^{-3}]
 v_d mittlere Depositionsgeschwindigkeit des Nebelwassers während des Ereignisses [m s^{-1}]
 Δt Andauer des Ereignis [s].

Die Deposition von Ionen lässt sich also als Produkt aus der deponierten Nebelwasser-Menge und der darin enthaltenen Spurenstoff-Konzentration darstellen. Da die Nebelwasser-Deposition aber tropfengrößenabhängig ist [Kowalski *et al.* 1997], gilt dieser Ansatz nur unter der Annahme, dass die Konzentration der Inhaltsstoffe in allen Tropfengrößen-Fractionen gleich groß ist (oder sich ausgleicht). Da eine tropfengrößenabhängige Sammlung von Nebelwasser für die vorliegende Arbeit nicht möglich war, wurde diese Vereinfachung verwendet, um überhaupt Aussagen zum nebelgebundenen Eintrag von Ionen und Vergleiche mit regengebundenem Eintrag machen zu können. In den bisherigen Untersuchungen, die sich mit der unterschiedlichen Chemie in verschiedenen großen Tropfen beschäftigt haben [Beswick *et al.* 1991], [Römpf 1999], wurden signifikant größere Konzentrationen in kleineren Nebeltropfen im Vergleich mit größeren gefunden. Eine weitere Diskussion mit Ergebnissen findet sich in Kapitel 3.5.4.

3 Messergebnisse

3.1 Messzeitraum

Zum Testen und Sammeln erster Erfahrungen mit dem neuen System wurde von August bis Dezember 2000 ein Gerätevergleich mit einem ähnlichen System der Universität Bern am Waldstein durchgeführt. Verwertbare Daten sind für das System der Universität Bayreuth in der Zeit vom 18. September bis zum Abbau am 5. Dezember erfasst worden.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden in einer Hauptuntersuchungsperiode vom 1. April 2001 bis zum 31. März 2002 möglichst vollständig alle Parameter erfasst. Diese beinhalten die Messung der Nebelwasserdeposition, der chemischen Zusammensetzung der Nebelwasserproben sowie die Erfassung der Sichtweite und aller relevanten meteorologischen Größen. Dieser Messzeitraum wurde so gewählt, dass ein ganzes Jahr abgedeckt wird, um eventuelle saisonale Einflüsse auf die Messungen quantifizieren zu können.

Aufgrund eines Gerätefehlers beim Ultraschallanemometer am Anfang des Messzeitraums und von Problemen mit der Nebelwasser-Probenaufbereitung am Ende der Messungen ist der Zeitraum nicht komplett mit allen gewünschten Parametern abgedeckt. In Tabelle 12 sind die Messzeiträume aufgeführt.

Tabelle 12: Beginn, Ende und Länge der verwendeten Datenreihen für die verschiedenen Parameter am Waldstein 2001/2002.

Parameter	Beginn	Ende	Dauer	Auflösung
Meteorologische Daten	1.4.2001	31.3.2002	365 d	10 min
Turbulente Nebelwasserflüsse	17.4.2001	31.3.2002	348 d	30 min (bei Nebel)
Gravitative Nebelwasserflüsse	2.4.2001	31.3.2002	364 d	30 min (bei Nebel)
Flüssigwassergehalt der Luft	2.4.2001	31.3.2002	364 d	30 min (bei Nebel)
Nebelwassersammlung	1.4.2001	28.2.2002	334 d	Ereignis
Nebelwasserchemie	1.4.2001	24.2.2002	330 d	Ereignis
wet-only-Niederschlag (chemische Analysen)	2.4.2001	25.2.2002	330 d	ca. wöchentlich
Bestandesniederschlag	27.3.2001	25.3.2001	364 d	14-tägig

3.2 Meteorologische Daten

3.2.1 Lufttemperatur

Den Temperaturverlauf für die beiden Messperioden kann man den Abbildungen 14, 15 und 16 entnehmen. Das Jahr 2000 war mit einem Jahresmittelwert von $+6,8\text{ °C}$ um $1,5\text{ K}$ wärmer als das Temperaturnormal (1971-2000), 2001 mit $+6,1\text{ °C}$ etwas kühler als 2000. Das Jahr 2002 war das seit Beginn der Messungen am Waldstein (1993) wärmste Jahr mit $+7,1\text{ °C}$ und wich um $+1,8\text{ K}$ vom Temperaturnormal ab. Die für das für Mitteleuropa typischen saisonalen Unterschiede zwischen warmem Sommer und kaltem Winter sind deutlich ausgeprägt.

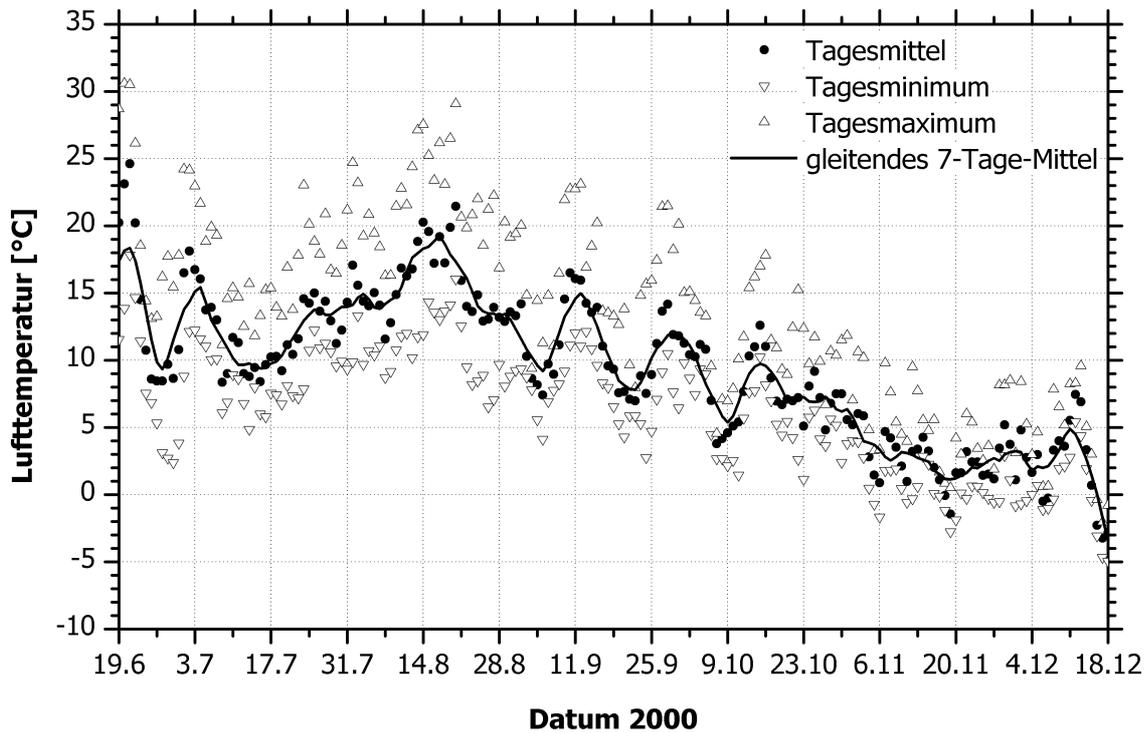


Abbildung 14: Temperaturverlauf während des Experiments „Gerätevergleich“ 2000. Messort: Waldstein, Pflanzgarten (2 m Messhöhe). Quelle: BITÖK-Datenbank.

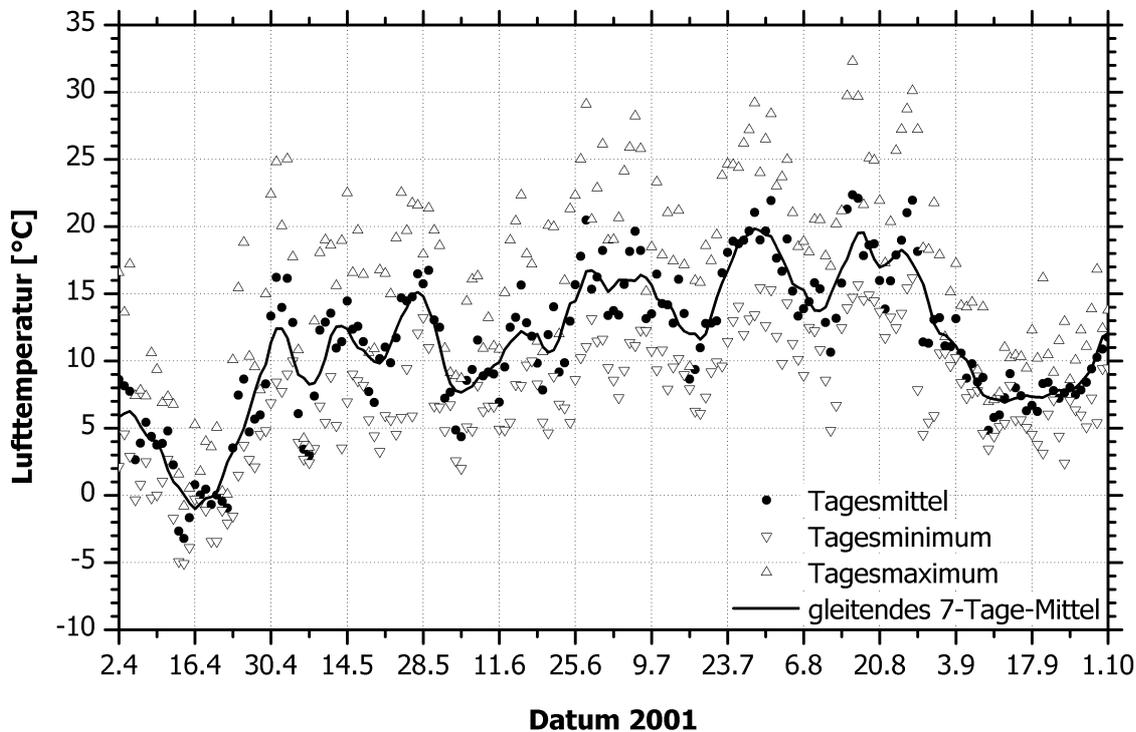


Abbildung 15: Temperaturverlauf während der ersten Hälfte des Hauptexperiments 2001/2002. Messort: Waldstein, Pflanzgarten (2 m Messhöhe). Quelle: BITÖK-Datenbank.

Die Extremwerte der Temperatur lagen während des Gerätevergleichs bei $-2,8^{\circ}\text{C}$ (19.11.) bzw. $+30,6^{\circ}\text{C}$ (20.6.). Während der Hauptuntersuchungsperiode 2001/2002 lag das absolute Minimum bei $-16,2^{\circ}\text{C}$ (am 14.12.2001) und die maximale Lufttemperatur bei $+32,3^{\circ}\text{C}$ (am 15.8.2001).

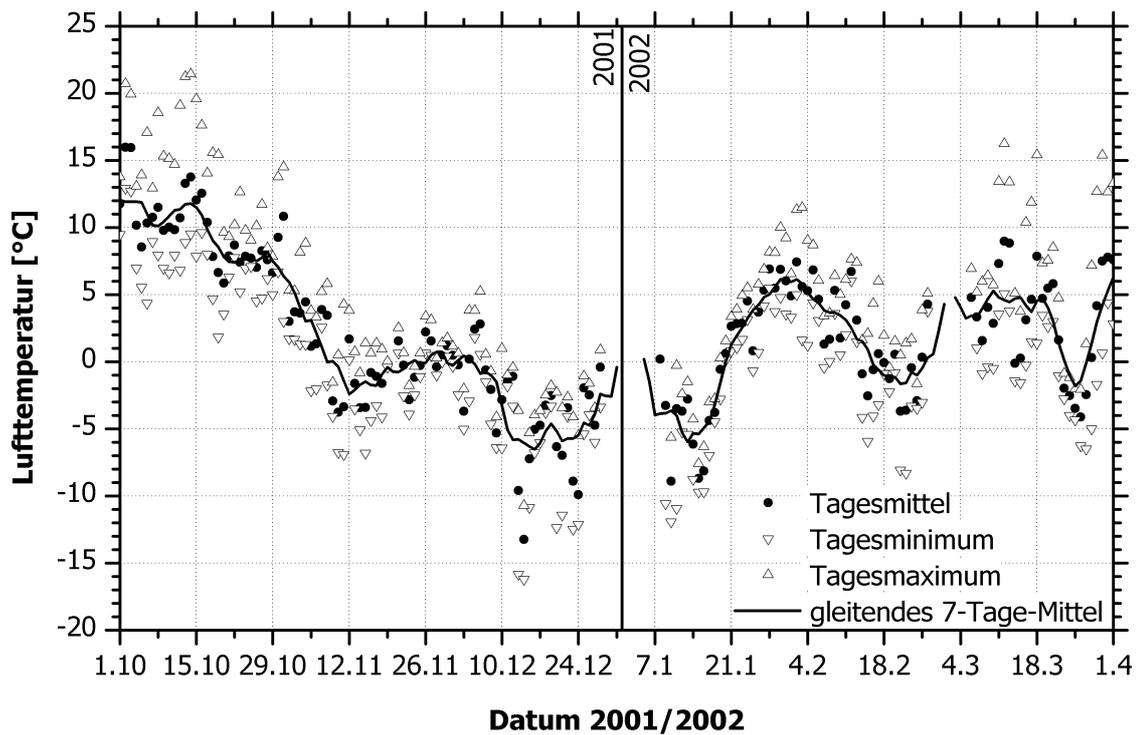


Abbildung 16: Temperaturverlauf während der zweiten Hälfte des Hauptexperiments 2001/2002. Messort: Waldstein, Pflanzgarten (2 m Messhöhe). Quelle: BITÖK-Datenbank.

3.2.2 Relative Luftfeuchtigkeit

Bei Nebel ist die Umgebungsluft meist mit Wasser gesättigt und die relative Luftfeuchte bei 100 %. Daher ist die Messung der Luftfeuchte ein weiteres Maß bei der meteorologischen Charakterisierung in Hinblick auf Nebel. Der saisonale Verlauf dieser Messgröße ist in den Abbildungen 17, 18 und 19 dargestellt. Die relative Luftfeuchtigkeit besitzt außerdem einen deutlichen Tagesgang, der dem der Temperatur entgegengesetzt ist.

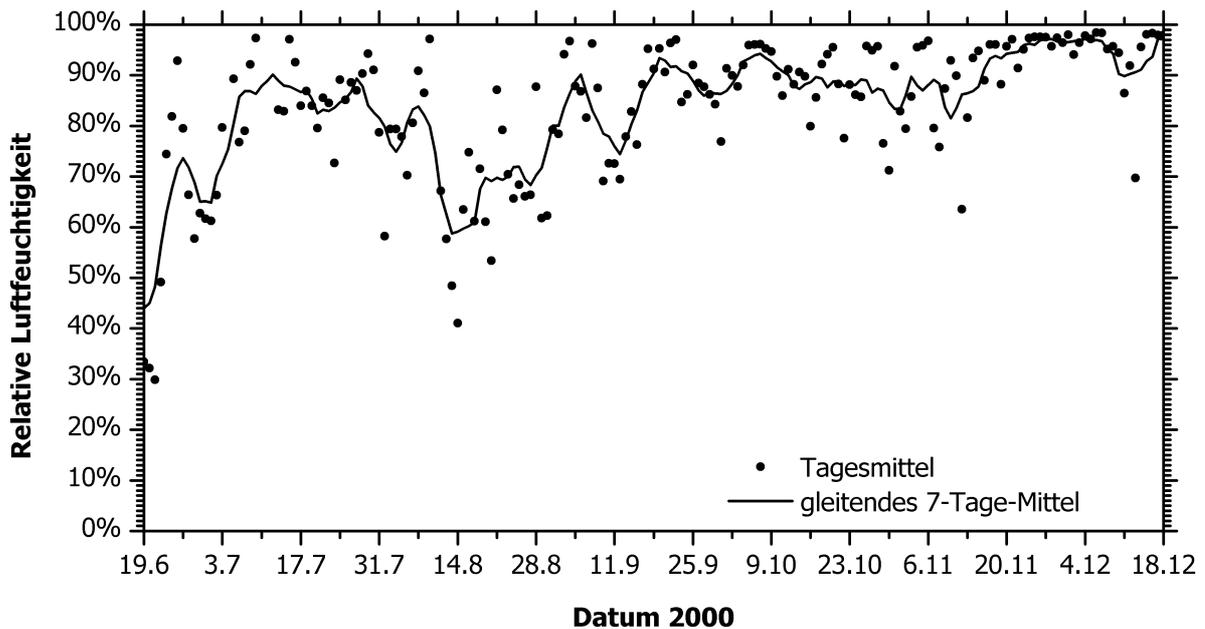


Abbildung 17: Gang der relativen Luftfeuchte während des Gerätevergleichs 2000. Messort: Waldstein, Weidenbrunnen-Turm (Messhöhe: 25 m über Grund). Quelle: BITÖK-Datenbank.

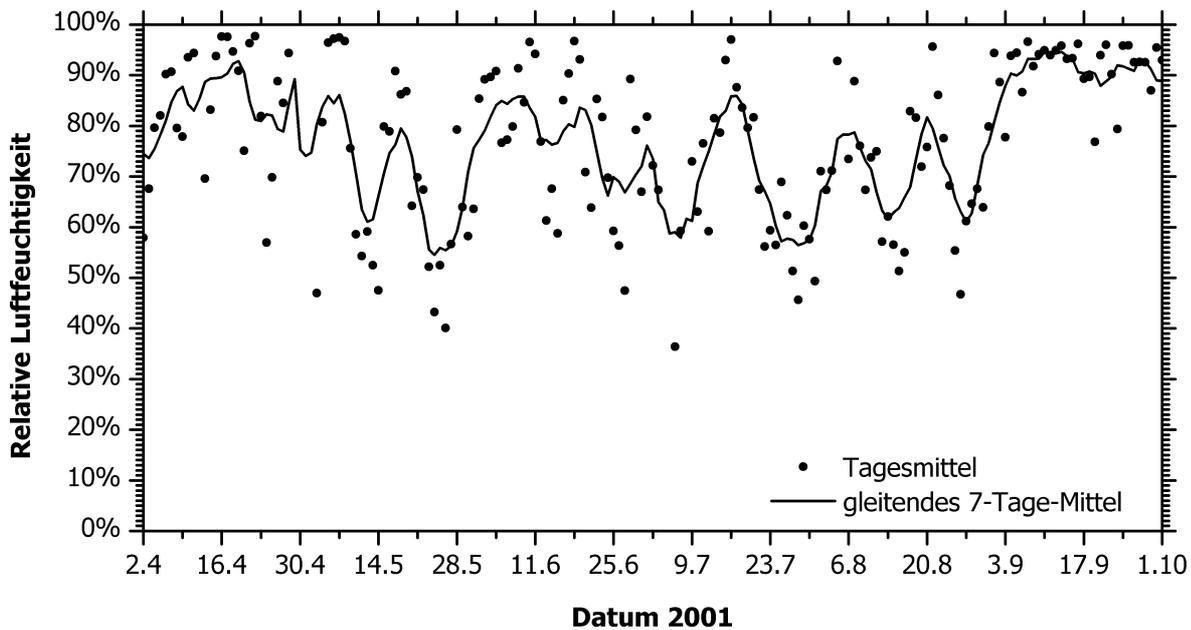


Abbildung 18: Gang der relativen Luftfeuchte während der ersten Hälfte des Hauptuntersuchungszeitraums 2001/2002. Messort: Waldstein, Weidenbrunnen-Turm (Messhöhe: 25 m über Grund). Quelle: BITÖK-Datenbank.

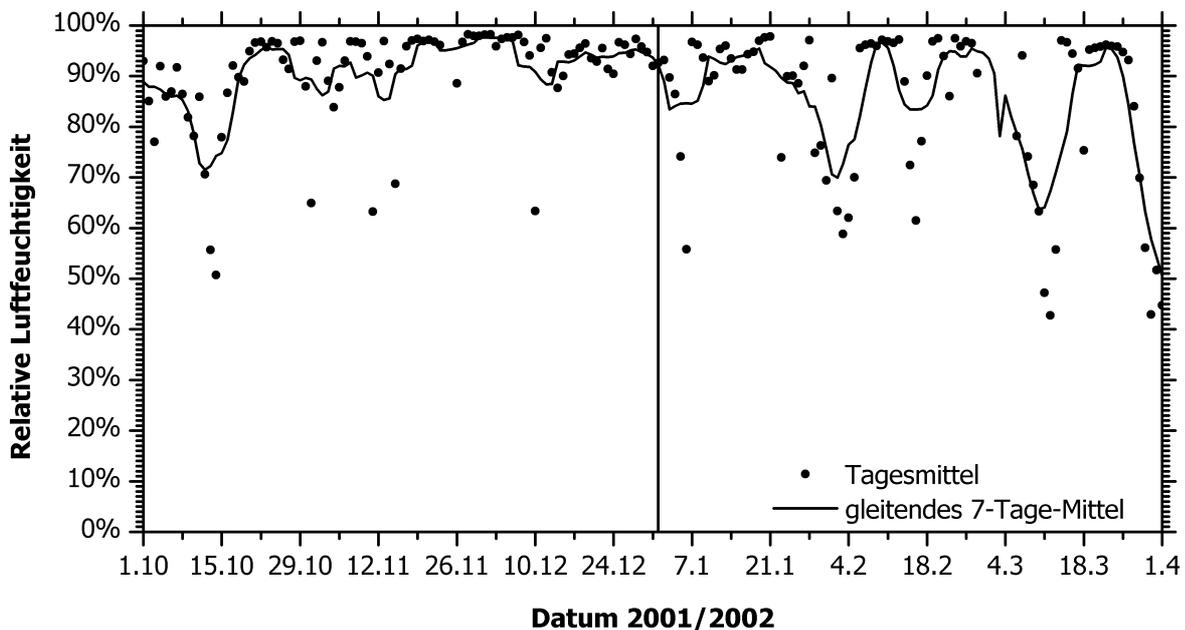


Abbildung 19: Gang der relativen Luftfeuchte während des Hauptuntersuchungszeitraums 2001/2002. Messort: Waldstein, Weidenbrunnen-Turm (Messhöhe: 25 m über Grund). Quelle: BITÖK-Datenbank.

3.2.3 Niederschlag

Der Niederschlag wird vor allem wegen der Heterogenität seiner Verteilung an verschiedenen Punkten der Waldstein-Messflächen gemessen. Für die vorliegende Arbeit wurden zwei Messstellen verwendet: die Messung im Pflanzgarten wurde für die Berechnung der wet-only-Deposition verwendet, für den Vergleich der Wasserdeposition durch Regen und Nebel ist der Niederschlag auf dem Weidenbrunnen-Messturm (in 31 m Höhe) maßgebend. In den

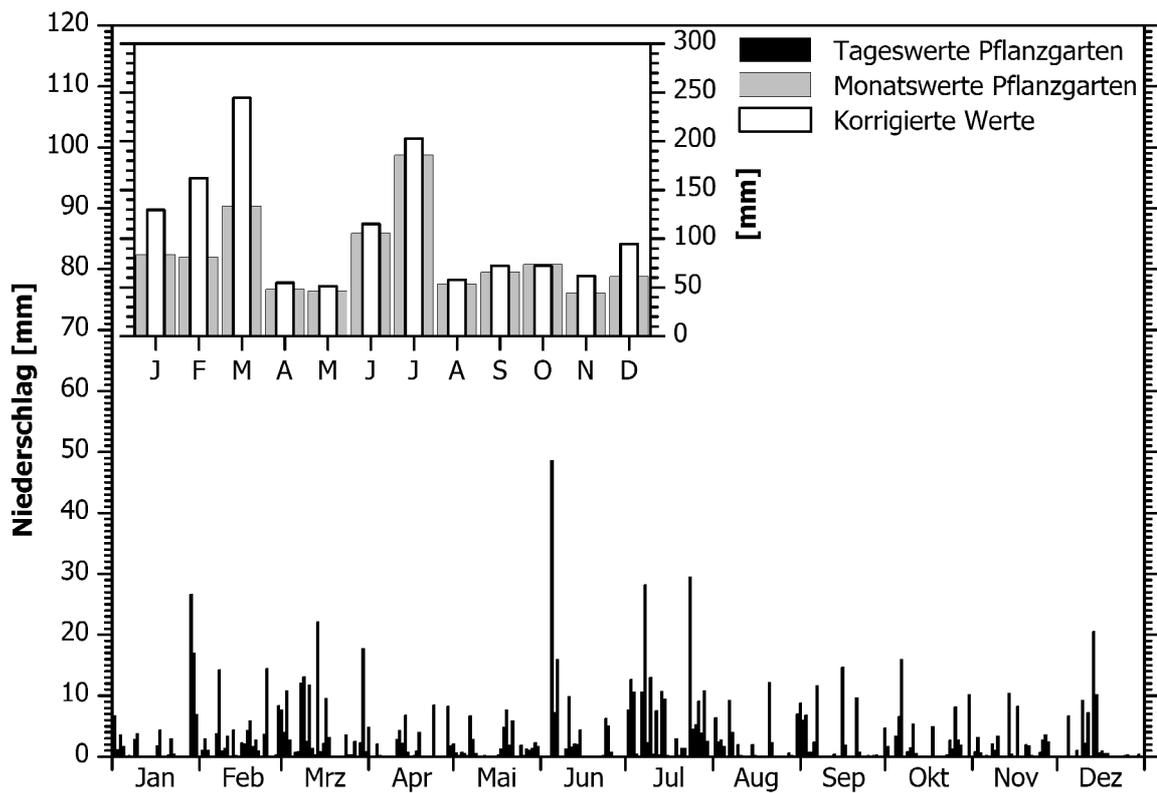


Abbildung 20: Niederschlag am Waldstein 2000. Messort: Pflanzgarten. Dargestellt sind die Tages- und Monatssummen (kleines Diagramm, Korrektur nach [Rebmann et al. 2004]). Quelle: BITÖK-Datenbank.

Abbildungen 20, 21 und 22 sind die Niederschläge für die Jahre 2000, 2001 bzw. 2002 am Pflanzgarten dargestellt.

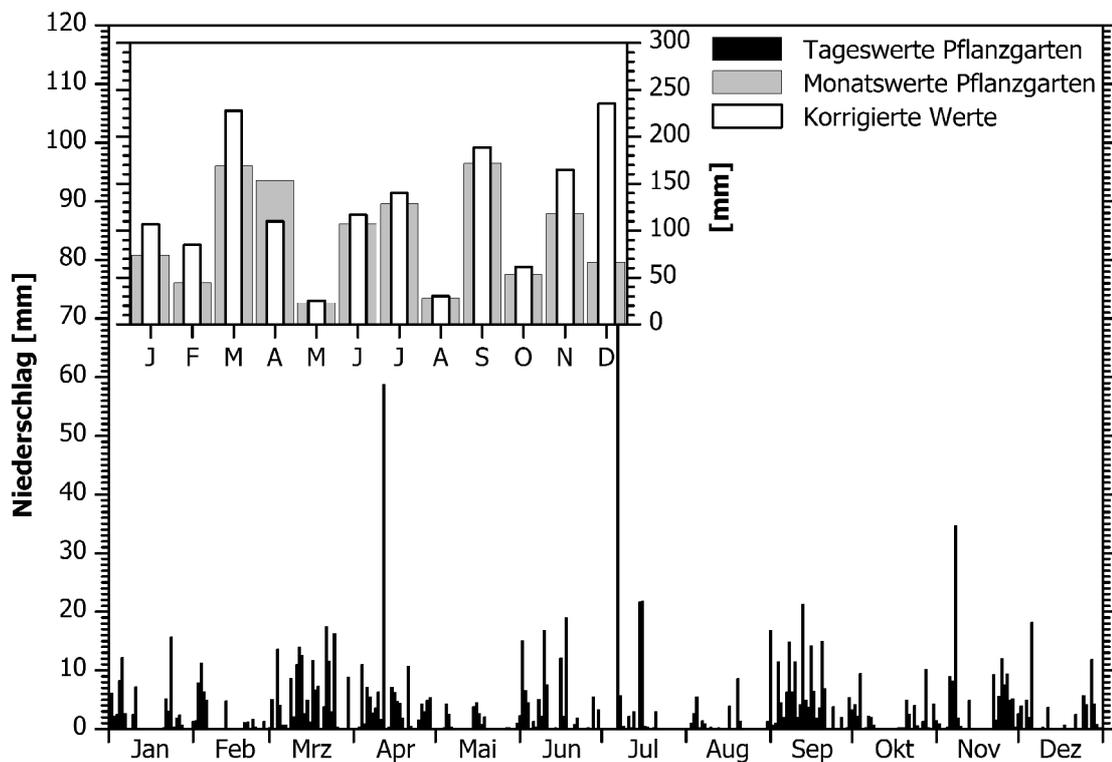


Abbildung 21: Niederschlag am Waldstein 2001. Erklärung siehe Abbildung 20.

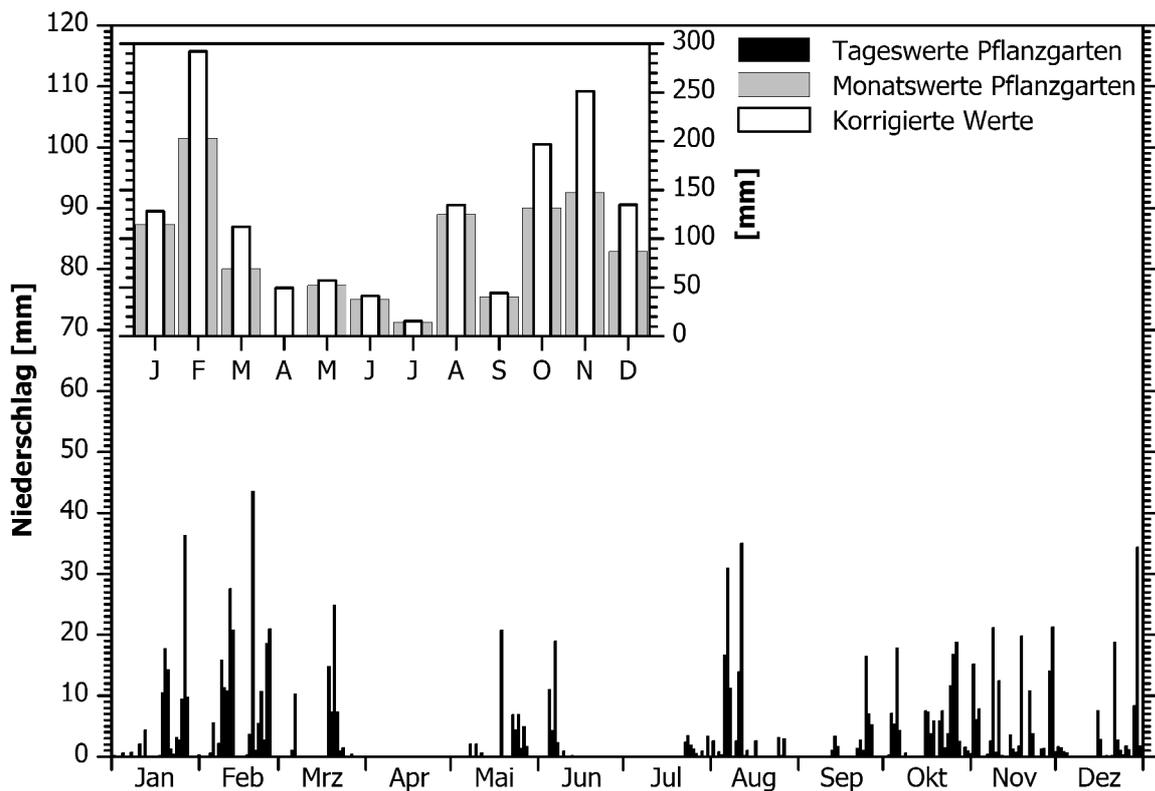


Abbildung 22: Niederschlag am Waldstein 2002. Erklärung siehe Abbildung 20.

Für den Zeitraum des Vergleichsexperiments vom 28. Juni bis 5. Dezember 2000 fielen im Pflanzgarten 430 mm Niederschlag, an der Spitze des Weidenbrunnen-Turms wurden 307,5 mm gemessen. Im zweiten Teil dieses Experiments ab 18. September fielen 136 bzw. 125 mm Regen.

Während des Hauptuntersuchungszeitraums (1. April 2001 bis 31. März 2002) wurden im Pflanzgarten bei fehlenden Daten für den März 2002 insgesamt 1174 mm aufgezeichnet, im Weidenbrunnen dagegen 1239 mm. In [Rebmann *et al.* 2004] wird für die automatisch gemessenen Daten eine Korrektur aus [Foken 2003b] auf diese Daten angewandt, um die für automatische Messungen problematischen Winterniederschläge zu korrigieren. Dadurch erhält man einen Niederschlag von 1414 mm für den Waldstein. Der Unterschied tritt hier vor allem im Dezember auf. In den letzten Tagen waren sehr heftige Schneefälle, die von den direkten Messungen am Waldstein nur ungenügend erfasst wurden.

Die relativ großen Unterschiede zwischen Pflanzgarten und Weidenbrunnen in den Messungen 2000 traten vor allem im Juli auf. Dazu ist zu bemerken, dass zu diesem Zeitpunkt der auf dem Messturm eingesetzte Schiffsregensammler noch in der Erprobung war und daher noch keine qualitativ hohen Daten lieferte. Ansonsten sind die Abweichungen im Gesamtzeitraum eher als gering zu bewerten. Allgemein kann man die Jahre 2000 bis 2002 als durchschnittliche bis leicht überdurchschnittliche Jahre bezüglich des gefallenen Niederschlags bezeichnen (982 mm, 1134 mm und ca. 1030 mm für 2000, 2001 bzw. 2002). Der Winter 2001/2002 muss aber als ausgesprochen niederschlagsreich bezeichnet werden. Besonders Januar und Februar liegen deutlich über den mittleren Werten für diese Jahreszeit.

3.2.4 Wind

In Abbildung 23 ist die Windrichtungsverteilung für den Hauptmesszeitraum 2001/2002 dargestellt. Vorherrschend am Waldstein sind westliche Windrichtungen. Die Ausrichtung des Lehstenbach-Tales ist an der Kanalisierung von Winden in Richtungen aus Südost erkennbar.

Westliche Winde (SW, W, NW) machen ca. 58 % der Messwerte aus, südöstliche (S, SE, E) ca. 27% und die restlichen (N, NE) ca. 15 %. Typische Windgeschwindigkeiten liegen bei 1 bis 5 m s^{-1} , der Median ist $2,88 \text{ m s}^{-1}$.

Während der Nebelereignisse ist die Windrichtungsverteilung etwas verändert. Die westlichen Richtungen (SW, W, NW) sind mit 68 % noch prägender, die südöstlichen (S, SE, E) mit 16 % weniger vertreten als im Gesamtzeitraum, N und NE etwa gleich bedeutend (16 %). Die Windgeschwindigkeiten sind ähnlich wie im Gesamtzeitraum verteilt, deren Median liegt bei $2,90 \text{ m s}^{-1}$.

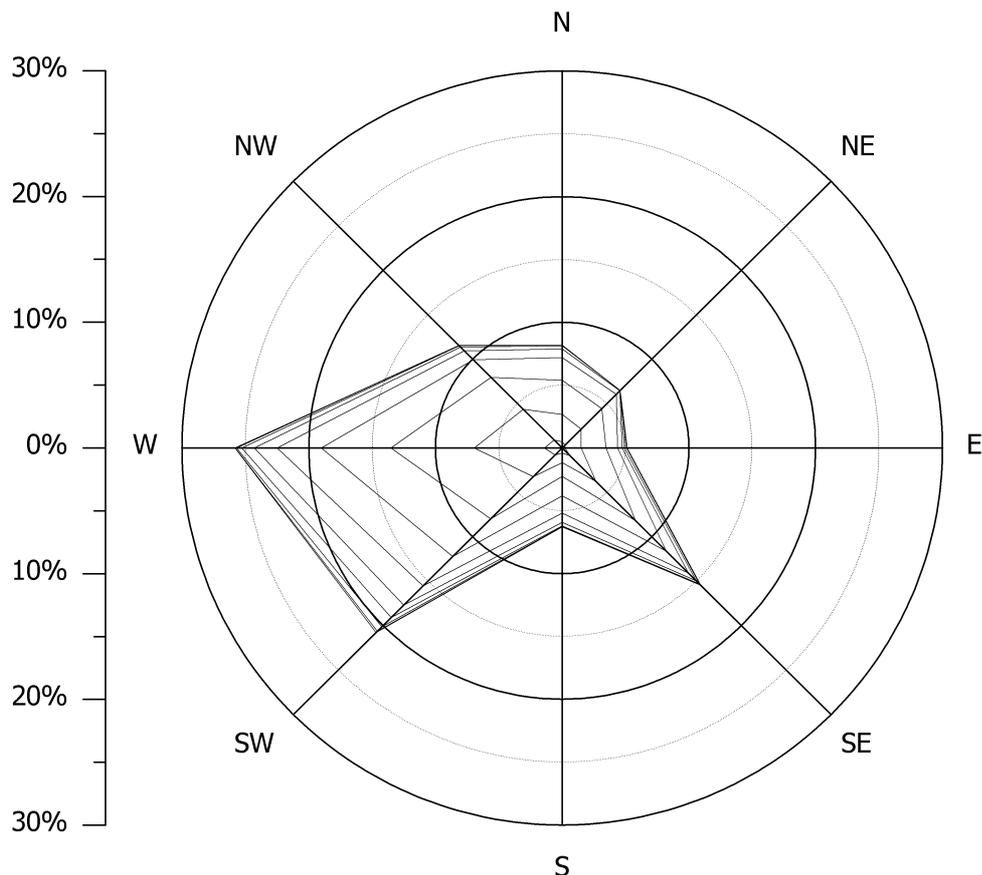


Abbildung 23: Windrichtungsverteilung am Waldstein während des Hauptmesszeitraums 2001/2002 (1.4.2001 bis 31.3.2002). Messort: Waldstein, Weidenbrunnen-Turm (Messhöhe: 32 m über Grund). Dargestellt sind die Häufigkeiten der Hauptwindrichtungen, kumuliert über die gemessenen Windgeschwindigkeiten in 1 m s^{-1} -Klassen (innerstes Achteck entspricht der Häufigkeitsverteilung bei Windgeschwindigkeiten bis 1 m s^{-1} usw., letztes Achteck umfasst alle Geschwindigkeiten bis zum Maximum von 12 m s^{-1}). Quelle: BITÖK-Datenbank.

3.2.5 Sichtweite

Die Messung der Sichtweite erlaubt eine allgemein-meteorologische Charakterisierung von Nebel. Man erhält so eine Übersicht über Häufigkeit und Dichte von Nebel. Die Sichtweite wurde von Ende 1996 bis August 2000 am Messcontainer im Pflanzgarten gemessen, danach wurde die Anlage zum Messturm Weidenbrunnen verlegt, um die räumliche Nähe zu den sonstigen Nebelmessungen zu gewährleisten. Die sich aus der Sichtweite ergebende monatliche Nebelstatistik ist in Abbildung 24 dargestellt.

Man erkennt deutlich ausgeprägte saisonale Unterschiede in der Häufigkeit des Auftretens von Nebel. Während der Sommermonate sind Nebelereignisse viel seltener als im Spätherbst, Winter und Frühjahr. Der Monat mit der größten Nebelwahrscheinlichkeit ist dabei der November mit

fast 38 % Nebel, der mit der geringsten der August mit ca. 7 % (Mittel der Jahre 1997 bis 2002). Im Jahresmittel ist der Waldstein knapp 20 % der Zeit im Nebel. Die bisher beobachtete Variabilität liegt dabei im Bereich von 14 % bis 25 %. Inwiefern bei den beobachteten interannuellen Unterschieden das Umsetzen des Messgeräts¹ eine Rolle spielt, lässt sich aus der aktuellen Zeitreihe nicht ableiten. Die Anzahl der Nebeltage ist als eine der ganz wenigen den Nebel beschreibenden Größen auch für etliche andere Stationen weltweit eine gute Vergleichsgrundlage. Am Waldstein wurden seit 1997 im Mittel 200 Nebeltage im Jahr bestimmt. Diese Zahl schwankt zwischen 164 (für 1999) und 233 (für 2001). Beim Vergleich mit den in [Enders 1996] angegebenen Vergleichsstationen in Bayern (siehe Tabelle 13) kann der Waldstein als sehr nebelreich eingeordnet werden und ist als typischer Vertreter der deutschen Mittelgebirgslagen anzusehen. Bei der so genannten Nebelbelastung, der mittleren Andauer von Nebel an Nebeltagen, ergibt sich für den Waldstein ein Wert von 7,9 Stunden. Die in [Enders 1996] angegebenen Vergleichswerte für Stationen in Bayern liegen bei 7,1 (Passau), 7,8 (Regensburg) und 10,8 Stunden (Zugspitze).

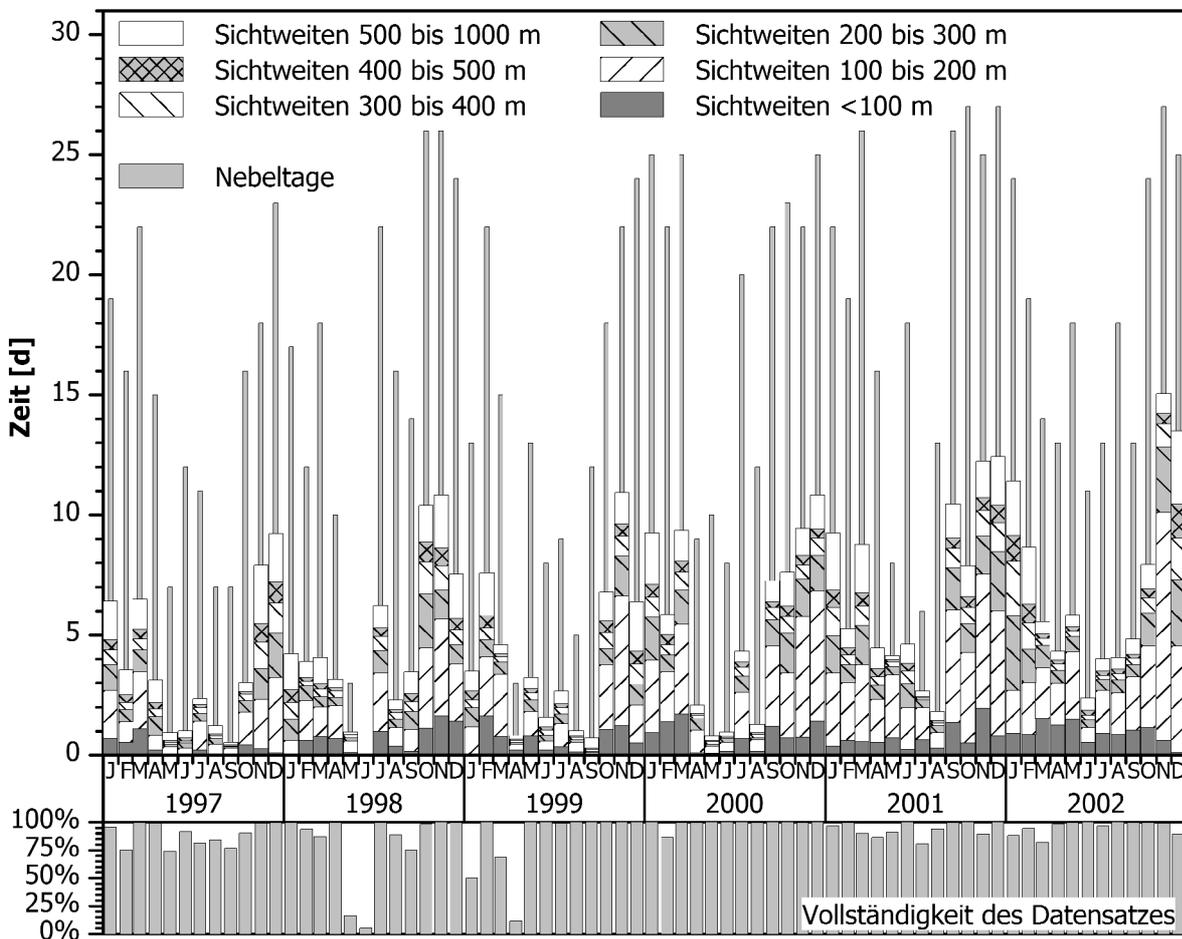


Abbildung 24: Anzahl der monatlichen Nebeltage (Tage mit Nebel, Säulen im Hintergrund) und die monatliche Verteilung der Sichtweitenklassen (gestapelte Säulen) für alle Nebelereignisse für die Jahre 1997 bis 2002 am Waldstein, sowie die jeweilige Vollständigkeit des Datensatzes (gemessen an den möglichen 10-min-Werten).

¹ Das Sichtweitenmessgerät wurde beim Wechsel des Messortes im August 2000 um ca. 40m höher gesetzt.

Tabelle 13: Mittlere monatliche und jährliche Zahl der Nebeltage an Stationen in Bayern für 1961 bis 1990. Quellen: ¹ = [Enders 1996], ² = [Böer & Vesecký 1973] und eigene Daten (für Station Waldstein, nur 1997 bis 2002).

Station	Höhe	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr
Bamberg ¹	239	4,2	3,3	2,4	2,8	2,7	2,4	2,5	4,3	7,9	9,3	5,2	2,8	49,8
Bayreuth ¹	330	2,8	3,0	3,5	2,7	2,0	1,1	1,3	3,5	6,4	8,4	4,4	2,1	41,2
Cham ¹	420	3,8	3,8	3,0	1,9	1,5	1,6	1,5	2,6	5,6	8,7	6,1	3,9	44,0
Cheb ²	471	6,7	8,3	5,9	4,3	5,1	3,0	4,6	6,8	9,4	11,9	6,9	8,0	81,1
Coburg ¹	337	5,6	4,0	2,2	1,1	1,3	1,2	1,3	2,3	4,0	6,2	5,8	5,1	40,1
Fichtelberg/ Erzgebirge ²	1214	27,3	24,8	25,4	22,6	22,3	21,2	23,9	23,8	23,2	24,8	26,6	27,6	293
Fichtelberg/ Oberfranken ¹	705	13,9	11,3	9,9	6,9	4,3	3,5	3,6	4,5	7,1	13,4	13,9	13,9	106,2
Garmisch- Partenkirchen ¹	719	1,8	1,4	1,0	0,3	0,3	0,1	0,1	0,5	0,9	2,4	2,0	2,3	13,1
Großer Falkenstein ¹	1307	22,2	20,1	22,1	18,9	18,0	17,8	16,6	16,4	18,1	18,9	22,3	22,3	233,7
Hof ¹	474	4,7	5,7	5,7	4,4	4,1	3,6	3,1	4,8	7,6	8,1	4,9	3,9	60,6
Hohenpeißen- berg ¹	977	17,2	15,6	15,3	15,0	13,0	12,4	11,1	11,7	10,8	15,3	16,3	17,1	170,8
Kempten ¹	705	4,6	2,6	1,8	1,2	1,2	1,0	1,2	1,6	3,9	5,5	3,6	4,1	32,3
München- Riem ¹	527	9,6	7,7	3,3	2,2	1,6	1,2	0,8	1,9	5,3	10,6	9,3	9,2	62,7
Nördlingen ¹	425	5,6	6,4	5,0	2,6	1,7	1,2	1,1	2,5	6,5	10,1	7,3	5,7	55,7
Nürnberg- Flughafen ¹	310	4,3	3,3	2,2	2,1	2,0	2,1	1,4	2,9	5,2	8,2	4,6	3,3	41,6
Oberstdorf ¹	810	2,0	1,6	1,1	0,4	0,7	0,5	0,5	0,8	1,9	2,8	2,3	2,0	16,6
Passau ¹	409	13,3	10,6	9,0	5,8	7,1	6,9	6,6	10,0	15,5	17,8	15,2	13,2	131,0
Regensburg ¹	376	9,4	6,4	4,7	2,3	2,9	2,5	1,8	3,5	6,8	12,3	9,7	8,3	70,6
Weiden/ Opf. ¹	438	3,5	3,3	2,4	1,9	2,1	2,1	1,3	3,2	4,7	7,3	4,8	3,8	40,4
Weihen- stephan ¹	467	7,4	5,6	2,8	1,4	0,9	1,0	0,9	1,8	5,9	9,6	7,2	6,5	51,0
Wendelstein ¹	1832	19,0	17,7	20,6	20,3	21,2	22,1	20,2	20,4	20,0	16,1	17,8	18,6	234,0
Würzburg ¹	268	4,7	4,0	3,0	1,6	1,5	1,8	1,5	2,9	6,9	10,0	5,8	4,6	48,3
Zugspitze ¹	2960	21,3	19,1	23,1	24,8	27,1	28,0	28,0	27,4	22,2	17,4	19,5	19,5	277,4
Waldstein	800	20,0	18,3	20,0	11,0	9,8	9,5	13,5	11,8	15,7	22,3	23,3	24,7	200,0

3.3 Nebelwasser-Sammelergbnisse

Über die zeitlich aufgelösten Sammelmengen und ihre Zuordnung zu Nebelereignissen lassen sich der eingesetzte Nebelsammler BCC und die Nebelereignisse charakterisieren. Für die 256 Proben des Hauptmesszeitraums 2001/2002 wurden minimal 18 ml und im Median 249 ml gesammelt. Acht Mal war die Flasche übergelaufen (> 1075 ml). Die Sammelmengen für jedes Ereignis sind im Anhang (siehe Seite A1 ff.) aufgeführt.

3.4 Nebelcharakterisierung mit dem FM-100

3.4.1 Tropfengrößen-Verteilung

Die Tropfengrößenverteilung wurde aus den gemessenen Tropfenzahlen des FM-100 bestimmt. Dabei wurde aus der Tropfenzahl über die Messzeit und den mittleren Luftfluss die Anzahlgrößenverteilung und daraus die Massengrößenverteilung, die Größenverteilung des Flüssigwassergehaltes, errechnet. Diese Daten wurden im Zuge der Flussmessungen als 5-min- und 30-min-Werte aggregiert. Die Mediane aller gemessenen Tropfenanzahl- bzw.. Flüssigwasserkonzentrationen sind der Abbildung 25 zu entnehmen. Weitere Statistiken können dem Anhang (siehe Seite A31 ff.) entnommen werden. Für die Anzahlgrößenverteilung erkennt man Maxima d_{\max} im Bereich von 2 bis 9 μm (Spitzen bei 2, 6 und 9 μm). Für die Flüssigwassergehalte ist die Verteilung jedoch unimodal. Die Tropfengröße des Maximums d_{\max} beim LWC ist 12 μm .

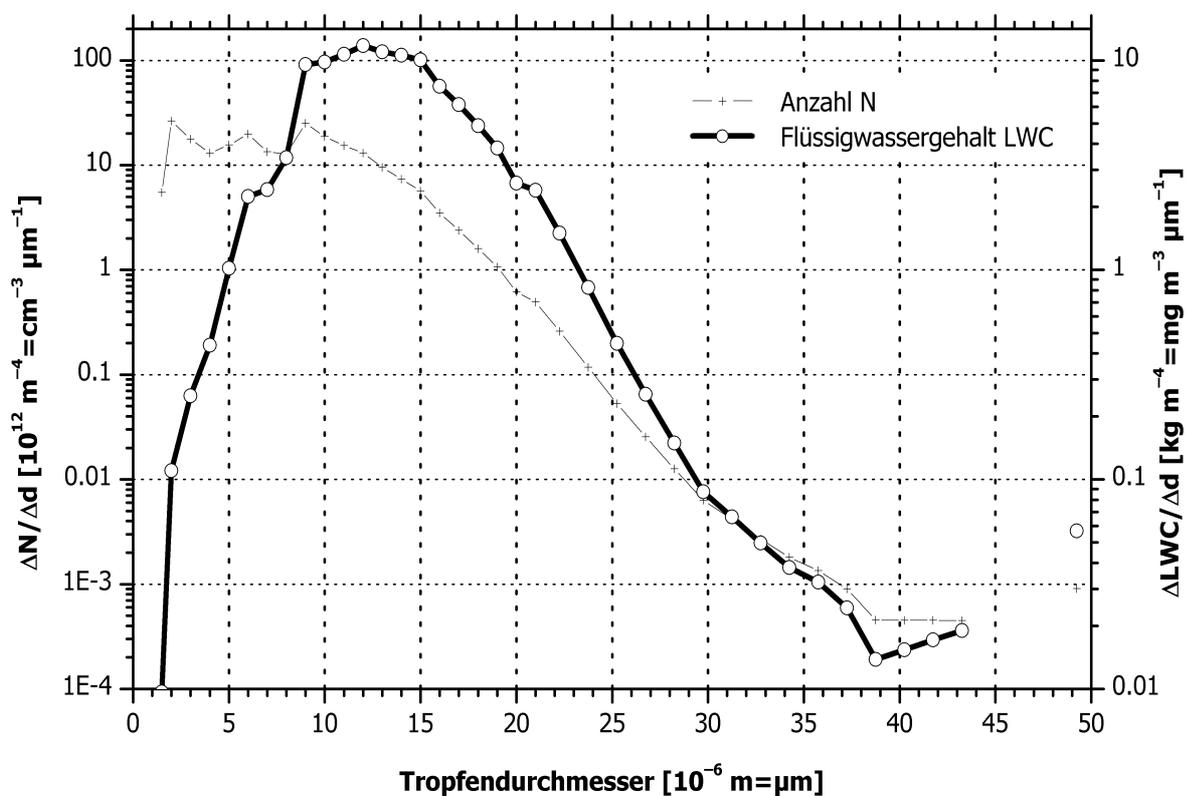


Abbildung 25: Mediane Tropfengrößenverteilung des Nebelwassers am Waldstein 2001/2002. Datengrundlage: ausgewertete 5-min-Werte des FM-100. Dargestellt sind Anzahl- und Massengrößenverteilung (LWC).

Betrachtet man alle gemessenen Tropfengrößenverteilungen, ergibt sich natürlich eine Streuung um die mediane Verteilung. In den Abbildungen 26 und 27 sind die Häufigkeiten der Verteilungen bezogen auf ihr Verteilungsmaximum dargestellt. Für die Anzahlgrößenverteilung erkennt man zwei typische Verteilungen mit Maxima d_{\max} bei 2 und 9 μm . Bei der Massengrößenverteilung spielt ein mögliches Artefakt in der größten Klasse (48,5 bis 50 μm , Mittel 49,25 μm) eine Rolle. Dort werden alle Tropfen größer 48,5 μm gemessen und bei Verteilungen, deren Maximum über 50 μm liegt, wird dieses dem Durchmesser 49,25 μm zugeordnet. Daher sind in dem Diagramm alle Klassen und die Klassen 1 bis 39 getrennt abgebildet. Die so gewonnene Verteilung hat Maxima d_{\max} bei 9, 12 und 15 μm .

Betrachtet man den in Abbildung 28 dargestellten Zusammenhang zwischen dem Maximum d_{\max} der Massengrößenverteilungen und dem gesamten Flüssigwassergehalt, so erhält man einen weiteren Überblick über die Streuung dieser Verteilungen. In den drei Modi (d_{\max} in Ch9, Ch12 und Ch15, entsprechend 9, 12 bzw. 15 μm) der Verteilungen sind hohe Gesamtflüssigwasser-

gehalte ($LWC \approx 250 \text{ mg m}^{-3}$) besonders bei einem d_{max} von $15 \mu\text{m}$ (Kanal 15) und niedrige ($LWC \leq 75 \text{ mg m}^{-3}$) vor allem bei einem d_{max} von $9 \mu\text{m}$ (Kanal 9) zu beobachten. Der dritte Modus bei einem d_{max} von $12 \mu\text{m}$ (Ch 12) liefert häufiger mittlere Flüssigwassergehalte ($LWC \approx 150 \text{ mg m}^{-3}$).

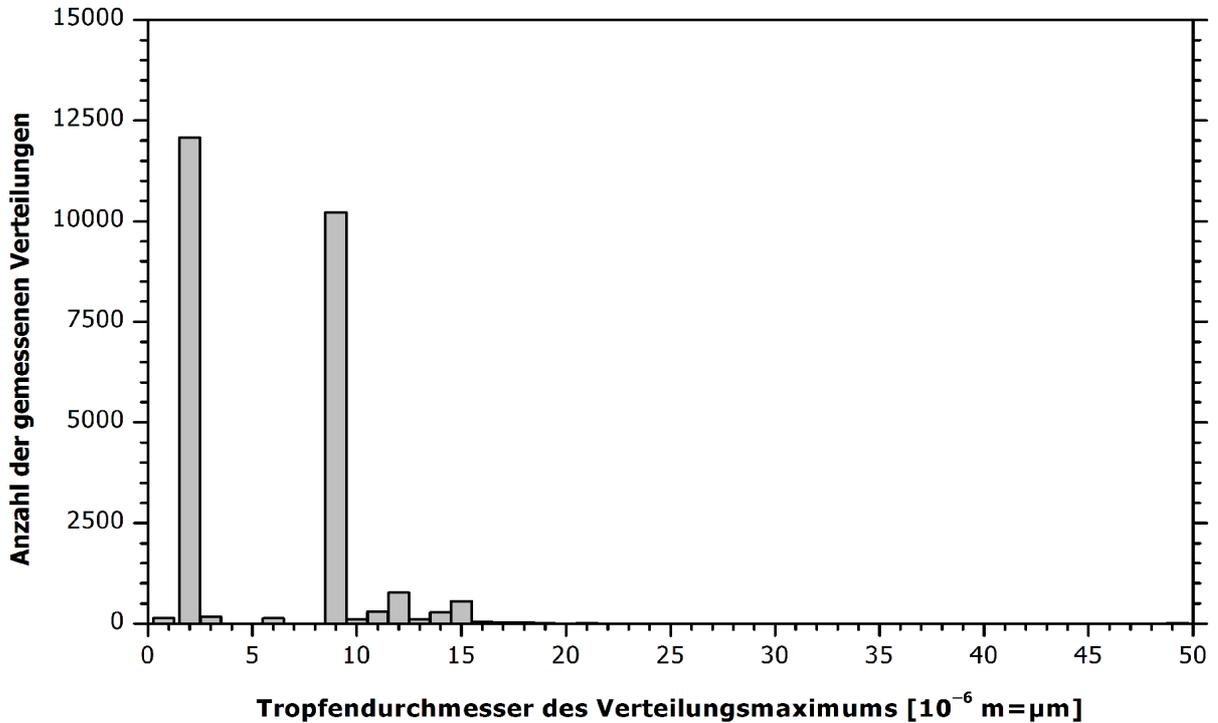


Abbildung 26: Verteilung der Maxima der Anzahlgrößenverteilungen der Nebeltropfen am Waldstein auf Grundlage der gemessenen 5-min-Werte.

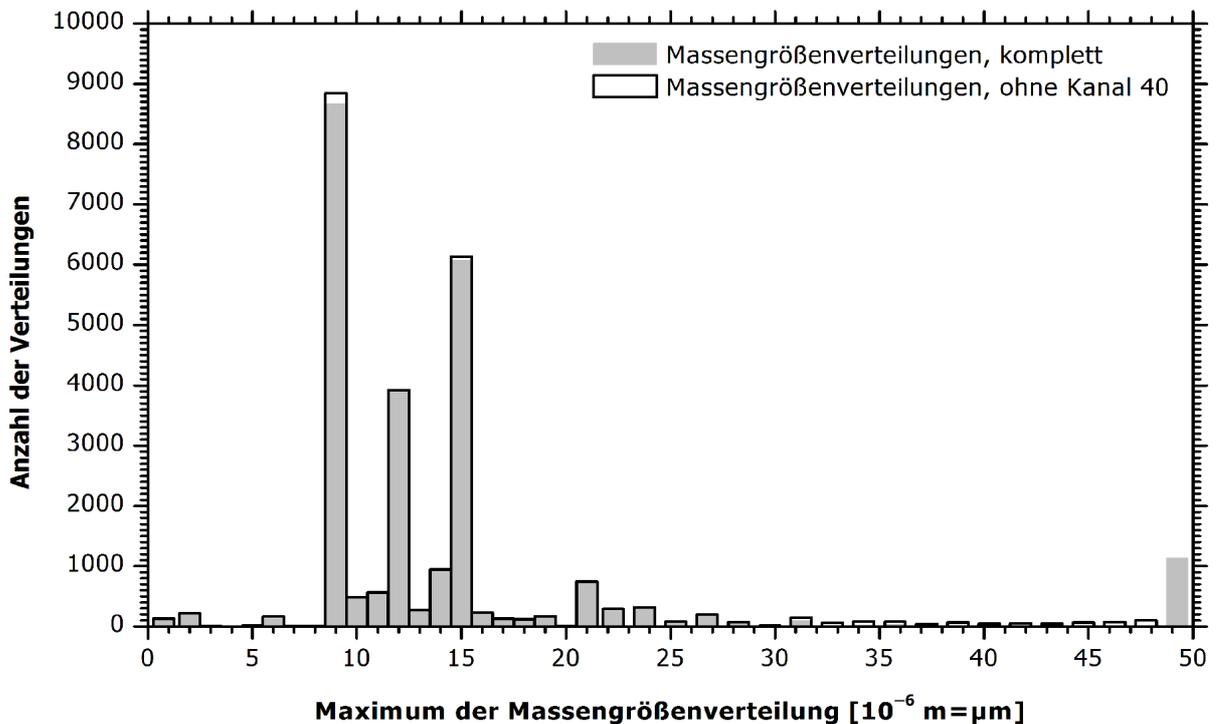


Abbildung 27: Verteilung der Maxima der Massengrößenverteilungen der Nebeltropfen am Waldstein auf Grundlage der gemessenen 5-min-Werte. Erläuterung siehe Text.

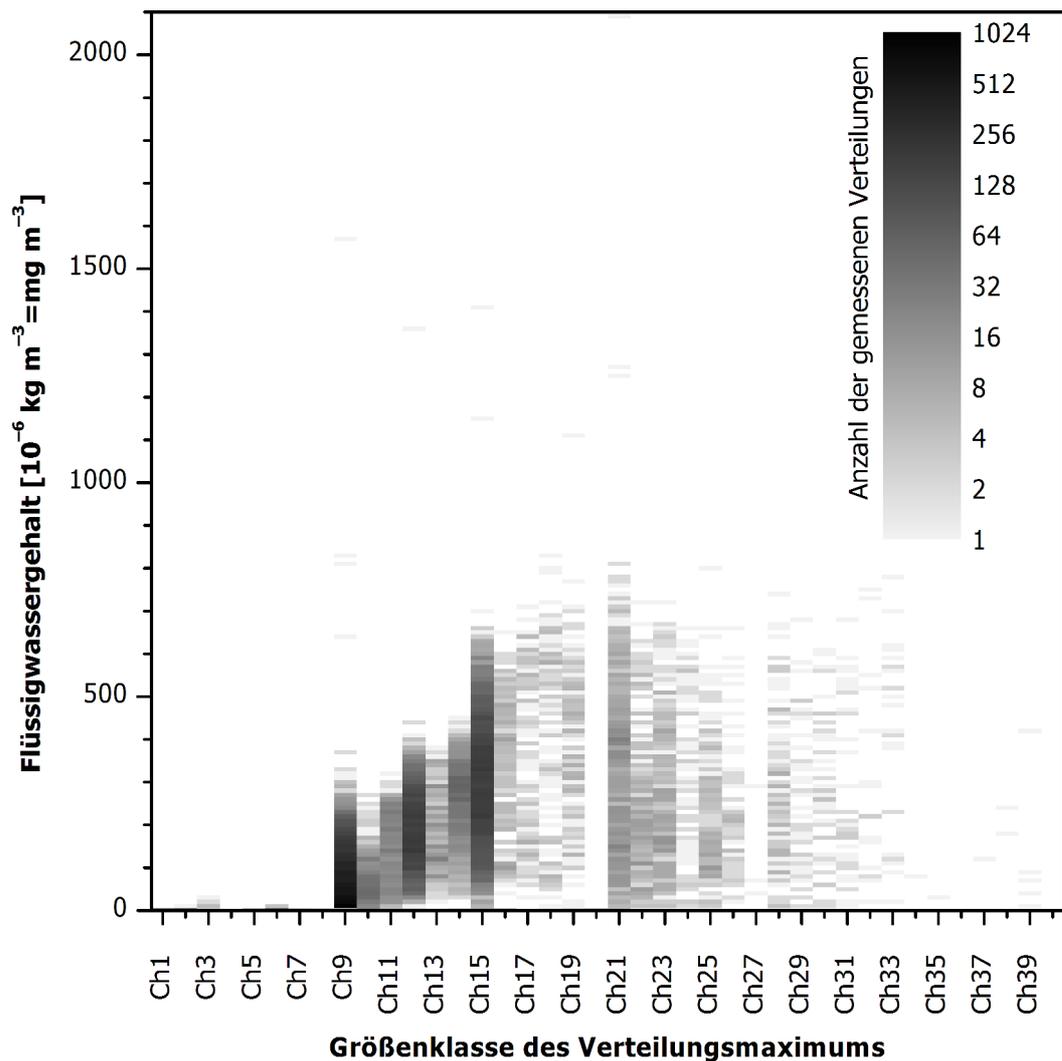


Abbildung 28: Anzahl der Verteilungen (logarithmische Schwarz-Weiß-Skala) mit einem bestimmten Massenverteilungsmaximum (x -Achse, als Größenklasse) und einem gemessenen Gesamtflüssigwassergehalt (y -Achse, in 10-mg m^{-3} -Klassen). Datengrundlage: 5-min-Werte am Waldstein ohne Kanal 40.

Die Anzahl der Nebeltropfen beträgt während der Ereignisse (auf Basis der 30-min-Werte) bis zu 3649 cm^{-3} . Der Median liegt bei 255 cm^{-3} . Für den Einsatz eines Forward Scattering Spectrometer Probe (FSSP), einem häufig eingesetzten Tropfenspektrometer, liegt die Grenze fehlerfreier Messung laut [Kowalski 1996] bei einer Anzahlkonzentration bei 600 cm^{-3} . Dieser Wert wird nur von ca. 0,7 % aller Werte überschritten.

3.4.2 Flüssigwassergehalt

Der absolute Flüssigwassergehalt LWC errechnet sich aus den gemessenen Tropfengrößenzahlen des FM-100. In der Abbildung 29 ist die Verteilung der gemessenen Flüssigwassergehalte dargestellt. Die zugehörigen statistischen Kenngrößen sind in Tabelle 14 zu finden. Der Datensatz kann nicht als normalverteilt angesehen werden. Der zeitliche Verlauf des LWC während der Hauptmessperiode 2001/2002 kann den Abbildungen 30 bis 33 entnommen werden.

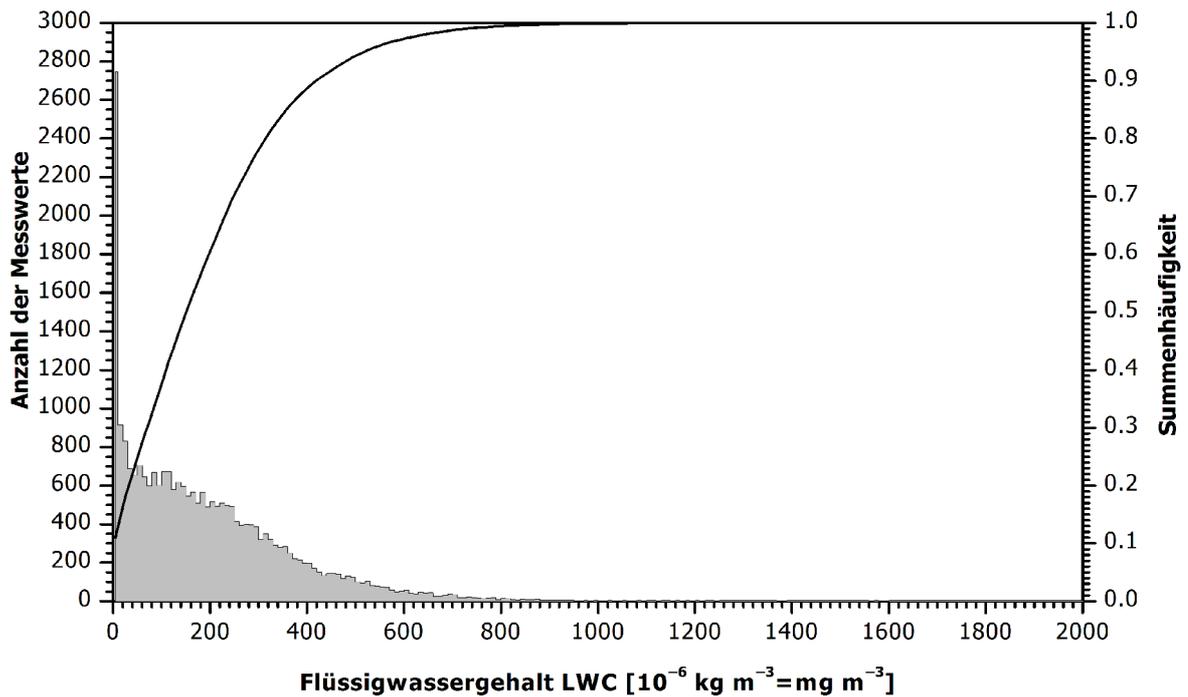


Abbildung 29: Häufigkeitsverteilung der gemessenen Flüssigwassergehalte am Waldstein. Graue Säulen: absolute Häufigkeit des Messwertes, Linie: kumulierte (Summen-) Häufigkeit der Werte. Datengrundlage: 5-min-Messwerte 2001/2002 von der Station Weidenbrunnen, Waldstein.

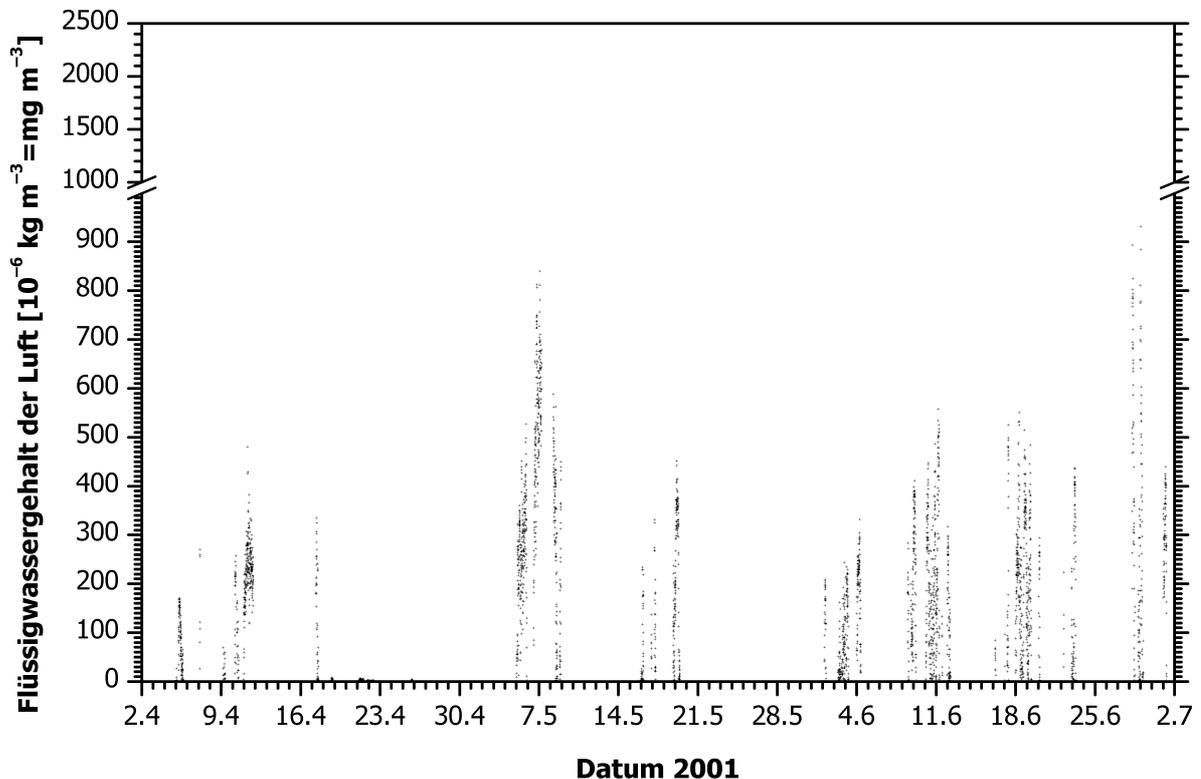


Abbildung 30: Flüssigwassergehalte der Luft während der Nebelereignisse vom 2.4.2001 bis zum 2.7.2001. Datengrundlage: 5-min-Werte des FM-100.

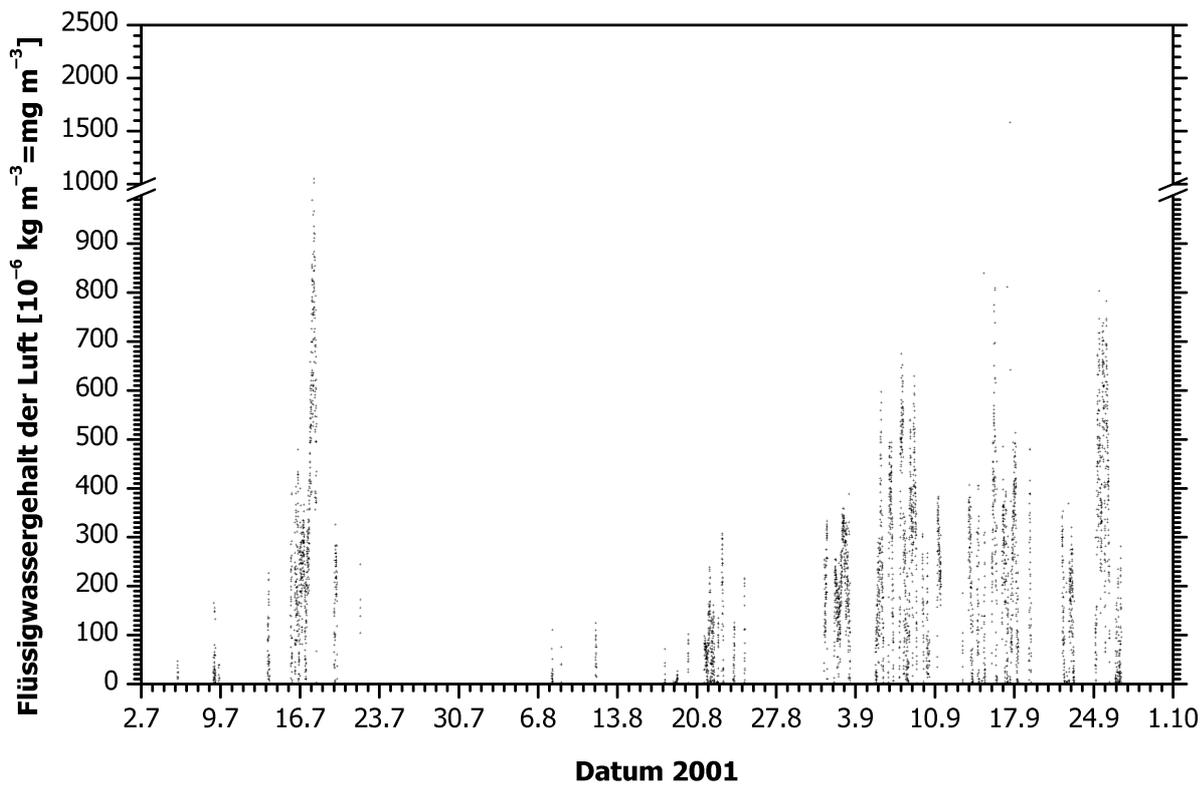


Abbildung 31: Flüssigwassergehalte der Luft während der Nebelereignisse vom 2.7.2001 bis zum 1.10.2001. Datengrundlage: 5-min-Werte des FM-100.

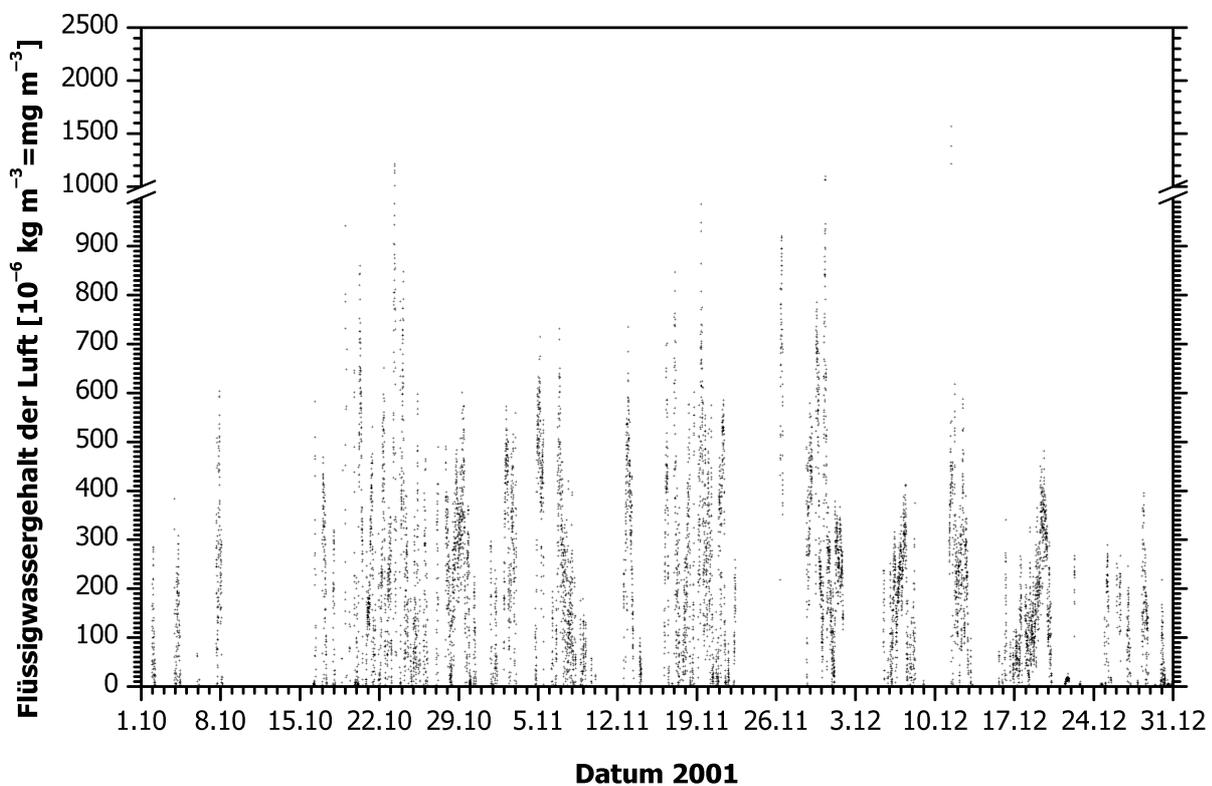


Abbildung 32: Flüssigwassergehalte der Luft während der Nebelereignisse vom 1.10.2001 bis zum 31.12.2001. Datengrundlage: 5-min-Werte des FM-100.

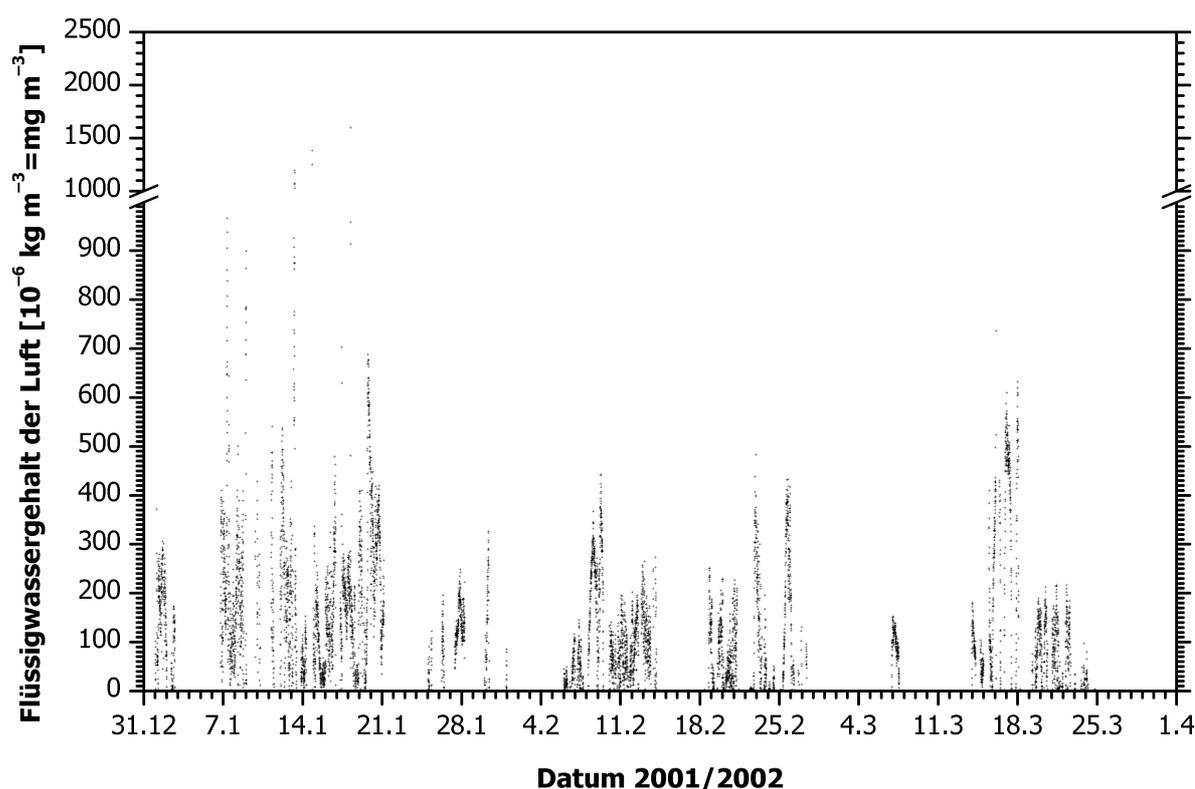


Abbildung 33: Flüssigwassergehalte der Luft während der Nebelereignisse vom 31.12.2001 bis zum 1.4.2002. Datengrundlage: 5-min-Werte des FM-100.

Tabelle 14: Statistische Kenngrößen zum Flüssigwassergehalt der Luft während Nebels am Waldstein 2001/2002. Datengrundlage 24996 5-min-Messwerte des FM-100.

Perzentil	0 %	5 %	25 %	50 %	75 %	95 %	100 %
LWC [mg m^{-3}]	0,0	1,4	56,0	155,9	284,8	523,0	2639

Bezogen auf die beprobten Nebelereignisse wurden Flüssigwassergehalte für 226 der Nebelereignisse als Mittelwerte der gemessenen 30-min-Werte berechnet. Die komplette Übersicht findet sich im Anhang (siehe A31 ff.). In Tabelle 15 sind die dazu gehörigen statistischen Kenngrößen zu finden.

Tabelle 15: Statistische Kenngrößen der mittleren Flüssigwassergehalte während 226 Nebelereignissen am Waldstein 2001/2002. Datengrundlage: 30-min-Messwerte des FM-100.

Perzentil	0 %	5 %	25 %	50 %	75 %	95 %	100 %
LWC [mg m^{-3}]	0,1	40,0	107,9	181,1	278,4	429,5	707,6

3.5 Nebelwassereintrag

3.5.1 Qualitätskontrolle

Nach der Rohdatenkontrolle (siehe Kapitel 2.2.3.4) wurden die Kovarianzen und diversen statistischen und mikrometeorologischen Parameter berechnet. Aufgrund der 30-minütlich angepassten Ausrichtung der Nebeldepositions-Apparatur wurden bei den Einzelwerten jeweils das time lag berechnet und die Werte entsprechend verwendet. Die ermittelten time lags sind in Abbildung 34 dargestellt. 78 % der Messungen von FM-100 und Ultraschallanemometer liegen höchstens einen Zeitschritt (80 ms) auseinander. Eine Abweichung von mehr als 9 Zeitschritten weisen ca. 6 % der Messungen auf.

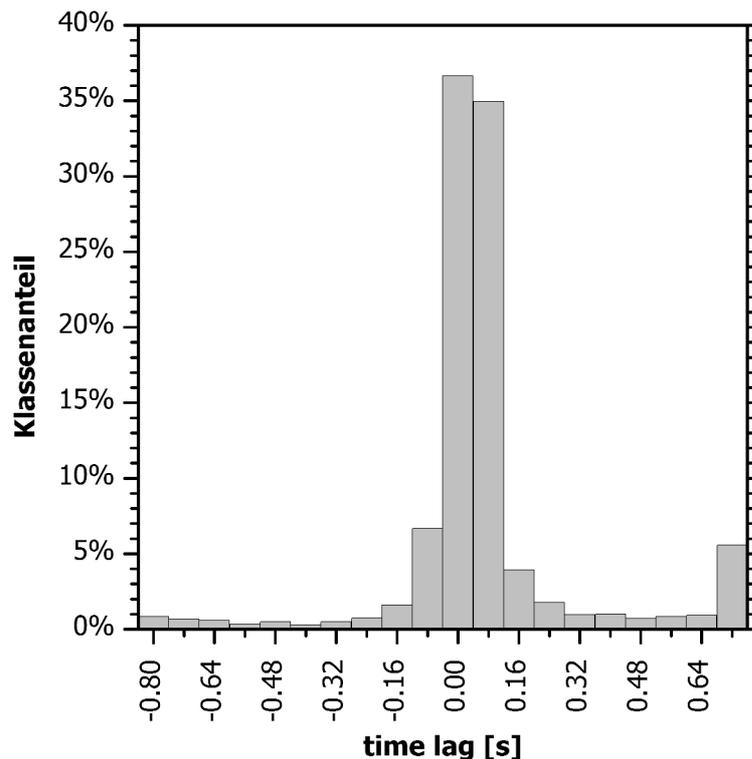


Abbildung 34: Verteilung der time lags für alle Messungen des Young 81000/FM-100-Systems. Datengrundlage: Alle Messungen (30-min-Werte) 2001/2002.

Als Nächstes erfolgte der Stationaritätstest nach [Foken und Wichura 1996]. Dabei werden die Varianzen der 5- und der 30-min-Werte für die Vertikalkomponente des Windes w sowie den Flüssigwassergehalt LWC verglichen. Bei Abweichungen von über 30 % für w bzw. 70 % für LWC wurde der Datensatz für den jeweiligen 30-min-Wert verworfen. Der Abbildung 35 kann man die Häufigkeiten der verschiedenen Abweichungen entnehmen. Für w waren bei 5,6 % der Datensätze instationäre Bedingungen zu verzeichnen. Bei der Messung des LWC mussten so 4,3 % der Datensätze als instationär betrachtet werden. Insgesamt wurden so 92,4 % als stationär betrachtet und weiter verwendet.

Die Betrachtung der Schubspannungsgeschwindigkeit u_* ergab bei einem Grenzwert von 0,1 keine signifikante Änderung¹ des berechneten Flusses und wurde in der weiteren Betrachtung nicht weiter berücksichtigt.

Aufgrund der beobachteten häufig deutlich größeren Flüssigwassergehalte in Kanal 40 gegenüber dem nächstkleineren Kanal 39 ergab sich eine Unsicherheit in den Werten jenes Kanals. Daher wurden die Flüsse für den Kanal 40 verworfen.

¹ Der Gesamteintrag im Zeitraum sank um 0,07 mm.

Da beim Anschalten des Systems immer eine gewisse Zeit vergeht bis die Pumpe auf Vollast läuft und die ersten Werte bei einer solchen Situation immer höhere Konzentrationen zeigten, wurden diese Datensätze verworfen. Als Kriterium, um eine automatische Auslese zu realisieren, wurde bei einer zeitlichen Differenz der aufeinander folgenden 30-min-Werte von über 30 min der Datensatz verworfen.

Schließlich wurde noch bei insgesamt vier 30-min-Werten eine gegenüber den vorhergehenden und nachfolgenden Werten deutlich erhöhte Konzentration festgestellt. Dies ließ sich höchstwahrscheinlich auf kurzzeitige Ausfälle der Pumpe zurückführen. Daher wurden die Datensätze für den 11.12.2001 10:30, den 10.1.2002 20:30¹, den 18.1.2002 6:00 und den 28.1.2002 7:00 verworfen.

Tabelle 16: Veränderungen der turbulenten Gesamtdeposition 2001/2002 durch Anwendung der verschiedenen Qualitätskontrollen.

Filter	Gesamtdeposition
Rohdaten	107,7 mm
Stationaritätstest nach [Foken und Wichura 1996]	105,7 mm
ohne Kanal 40	104,7 mm
Anlaufwerte	103,6 mm
Ausfallbereinigung	103,4 mm

In der Tabelle 16 sind die durch die einzelnen Schritte der Qualitätskontrolle veränderten Daten am Beispiel der turbulenten Gesamtdeposition für die Zeit des Hauptexperiments 2001/2002 aufgeführt. Insgesamt verringerte sich die gemessene Deposition um -3,1 % vom Rohdatensatz zum qualitätskontrollierten Datensatz.

¹ Dieser Wert erfüllte auch den Stationaritätstest nicht.

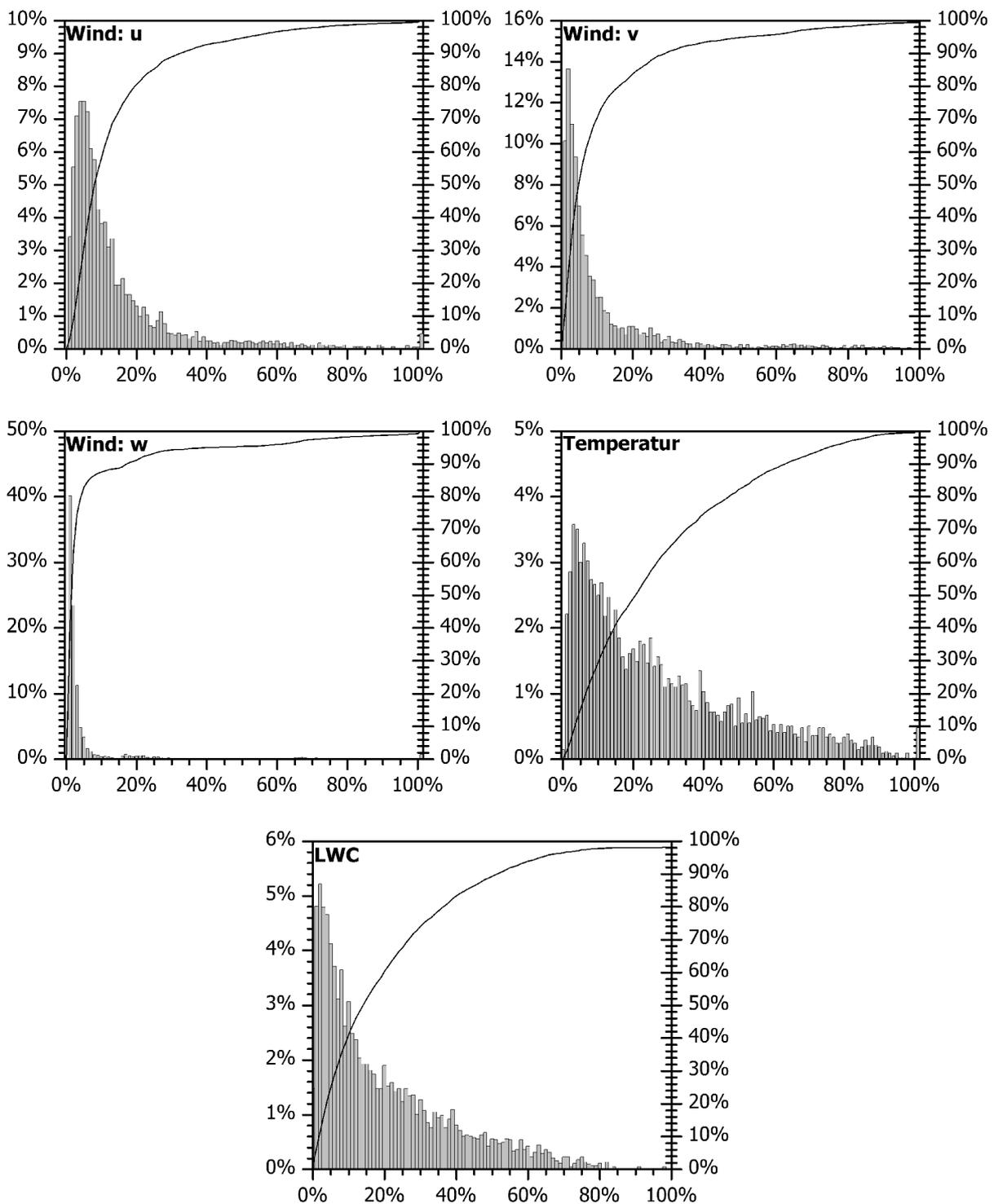


Abbildung 35: Vergleich der 5-min- und 30-min-Varianzen von Wind (u , v , w), Temperatur und Flüssigwassergehalt (LWC) zum Test der Stationarität nach [Foken und Wichura 1996]. Die Säulen stellen die jeweilige Klassenhäufigkeit (linke y-Achse), die Linien die kumulierten Häufigkeiten (rechte y-Achse) dar. Auf der Abszisse ist die Differenz zwischen beiden Werten, normiert auf den 30-min-Wert, abgebildet.

3.5.2 Saisonale Verteilung und Gesamtfluss

Aufgrund des Defekts des zuerst eingesetzten Ultraschallanemometers und des im Nachhinein festgestellten Fehlers in der Firmware dieses Anemometers werden hier die turbulenten Flussdaten für den Zeitraum ab dem 17. April 2001, 8:35 Uhr und die sedimentativen Flussdaten ab dem 2. April 2001, 12:30 Uhr dargestellt. Das Ende des Aufzeichnungszeitraums ist der Abbautermin am 2. April 2002, 9:13 Uhr. Damit beträgt der Gesamtaufzeichnungszeitraum 350 bzw. 365 Tage.

In Abbildung 36 ist die monatliche Summe der turbulenten Nebelwassereinträge¹ für den Untersuchungszeitraum dargestellt.

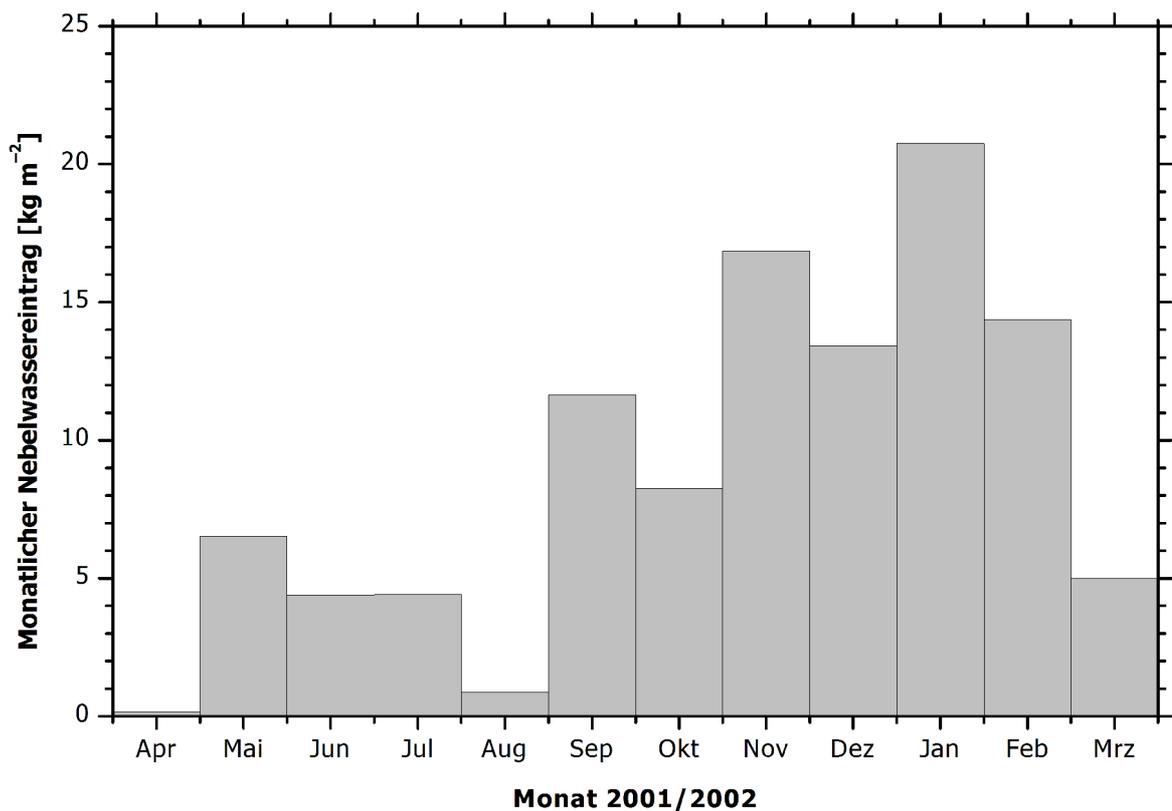


Abbildung 36: Monatlicher turbulenter Nebelwassereintrag am Standort Weidenbrunnen, Waldstein für 2001/2002. Alle Monatsflüsse sind Einträge in das Ökosystem. Datengrundlage: Messwerte vom 17.4.2001 bis zum 31.3.2002.

Betrachtet man die sedimentativen Einträge (siehe Abbildung 37), so ist deren Anteil am Gesamteintrag auf monatlicher Basis zwischen 5,3 % (Februar 2002) und 20,4 % (Oktober 2001). Dabei wurde der April aufgrund seiner unterschiedlichen Datengrundlage nicht berücksichtigt. Im Gesamtzeitraum ist der Anteil des durch Sedimentation eingetragenen Nebelwassers 13,7 %.

Der gesamte turbulente Eintrag von Nebelwasser in das Ökosystem am Waldstein beträgt für den Messzeitraum 2001/2002 103,4 mm. Auf den Zeitraum eines Jahres (April 2001 bis März 2002) hochgerechnet ergibt das eine feuchte Deposition von 108 mm durch turbulente Flüsse. Die Sedimentation ist im Vergleich zur Turbulenz deutlich geringer. Sie beträgt im Messzeitraum 2001/2002 16,9 mm also 17 mm pro Jahr. Damit ergibt sich ein nebelgebundener Gesamteintrag von 125 mm Wasser für den Zeitraum 2001/2002 (1.4.2001 bis 31.3.2002). Dies sind 8,1 % des Gesamtniederschlags aus Regen, Schnee und Nebel oder 8,8 % des mit dem Schiffsregensammler am Weidenbrunnen gemessenen Niederschlags.

¹ „Eintrag“ ist ein negativer Fluss, also ins Ökosystem gerichtet. Auf das entsprechenden Vorzeichen ist zu achten.

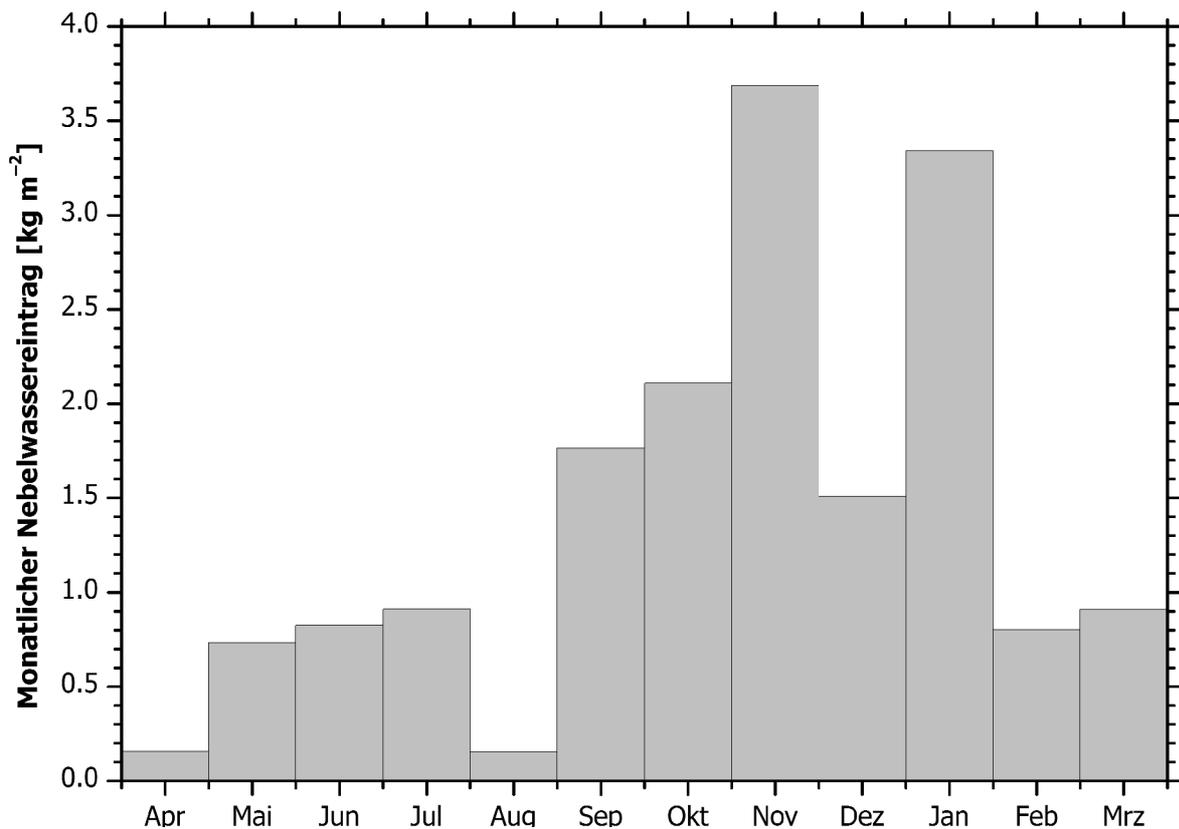


Abbildung 37: Monatlicher sedimentativer Nebelwassereintrag am Standort Weidenbrunnen, Waldstein für 2001/2002. Datengrundlage: Messwerte vom 2.4.2001 bis 2.4.2002

3.5.3 Einzelereignis-Flüsse

Für insgesamt 217 der Ereignisse im Hauptuntersuchungszeitraum 2001/2002 konnten Nebelwasserflüsse gemessen werden. Dazu wurden auf Basis der 30-min-Werte die Flüsse während des jeweiligen Ereignissen integriert und die jeweiligen sedimentativen Flüsse addiert. In den Abbildungen 38 bis 42 sind die so berechneten Flüsse dargestellt. Die Flüsse je Ereignis bewegen sich im Rahmen von $-1,86 \text{ kg m}^{-2}$ (Deposition) bis zu $+0,02 \text{ kg m}^{-2}$ (Emission). Dabei ist natürlich darauf zu achten, dass die Ereignisse unterschiedlich lang andauerten. Beim Übergang zu einer zeitlich normierten Betrachtung erhält man z. B. täglich aufgelöste Flussdaten. Die höchste Tagesdeposition wurde am 20.1.2003 gemessen. Der Eintrag an diesem Tag betrug 3,24 mm. Der Median des Nebelniederschlags beträgt an Nebeltagen¹ $0,286 \text{ mm d}^{-1}$.

¹ Hier: Tage, an denen Flüsse gemessen wurden. Das sind 195 im Untersuchungszeitraum.

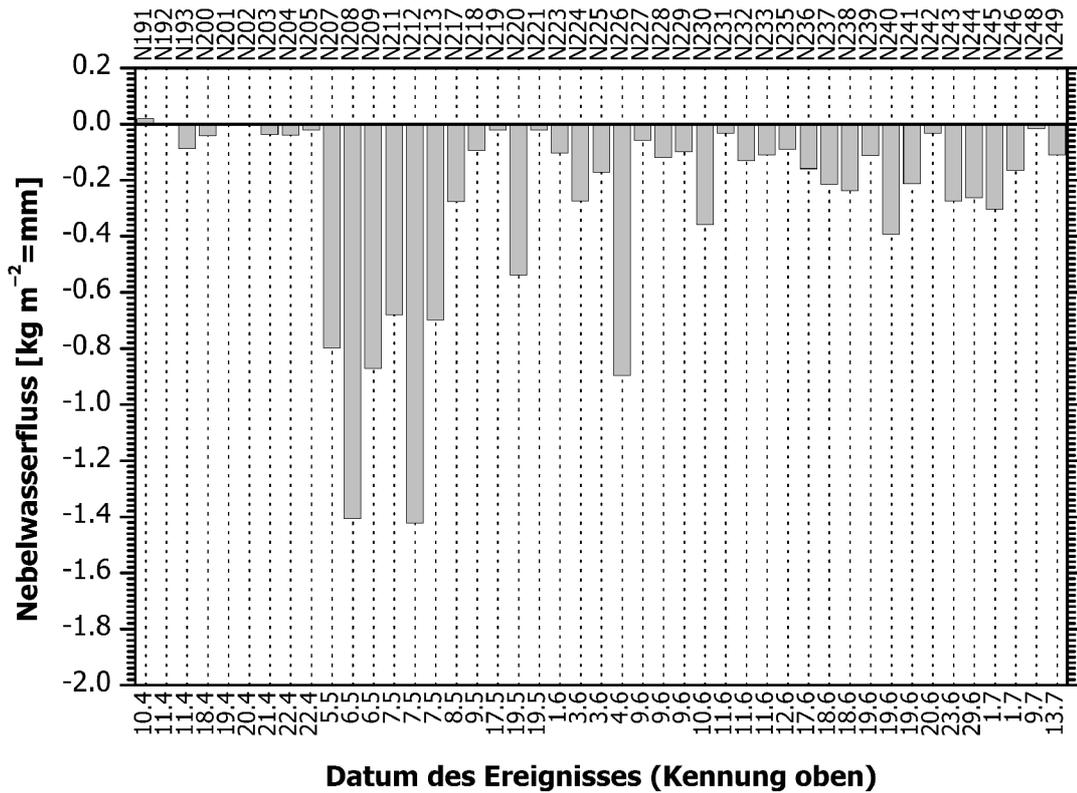


Abbildung 38: Nebelwasserfluss (turbulent und gravitativ) am Waldstein während der Nebelereignisse 2001/2002: Nebelereignisse N191 bis N249. Positive Flüsse bedeuten Emission, negative Deposition. Datengrundlage: 30-min-Messwerte des Nebeldepositionssetups am Weidenbrunnen, Waldstein.

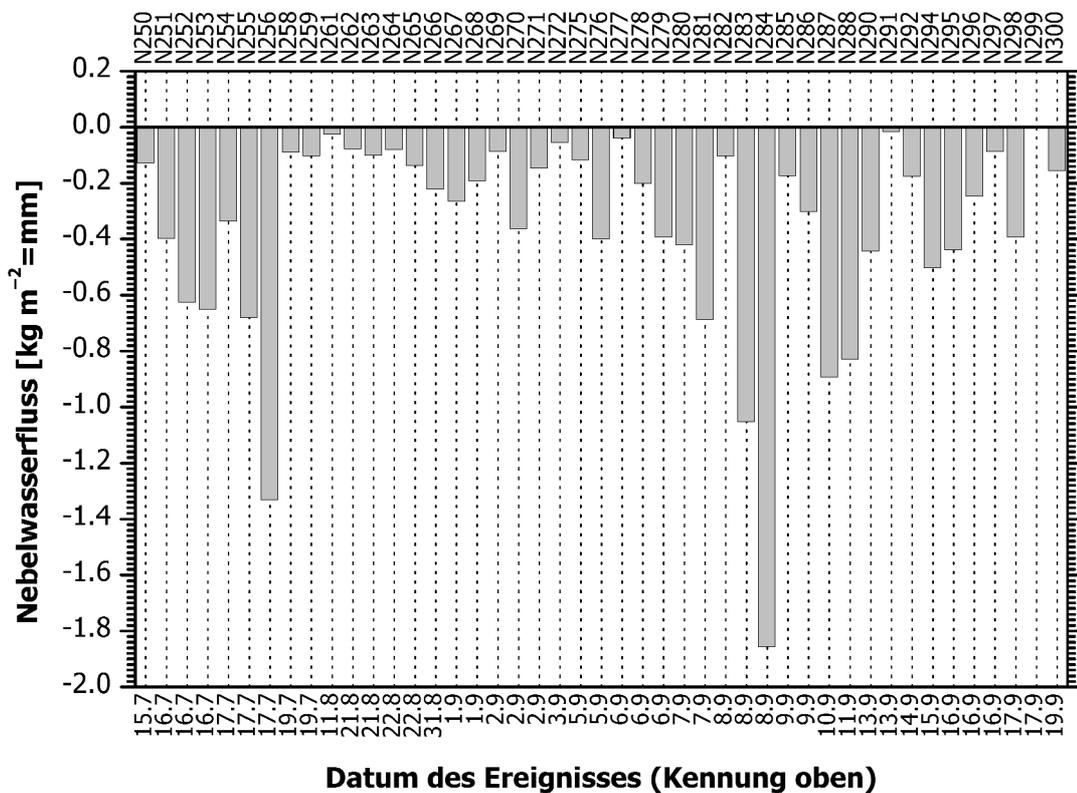


Abbildung 39: Nebelwasserfluss (turbulent und gravitativ) am Waldstein während der Nebelereignisse 2001/2002: Nebelereignisse N250 bis N300. Positive Flüsse bedeuten Emission, negative Deposition. Datengrundlage: 30-min-Messwerte des Nebeldepositionssetups am Weidenbrunnen, Waldstein.

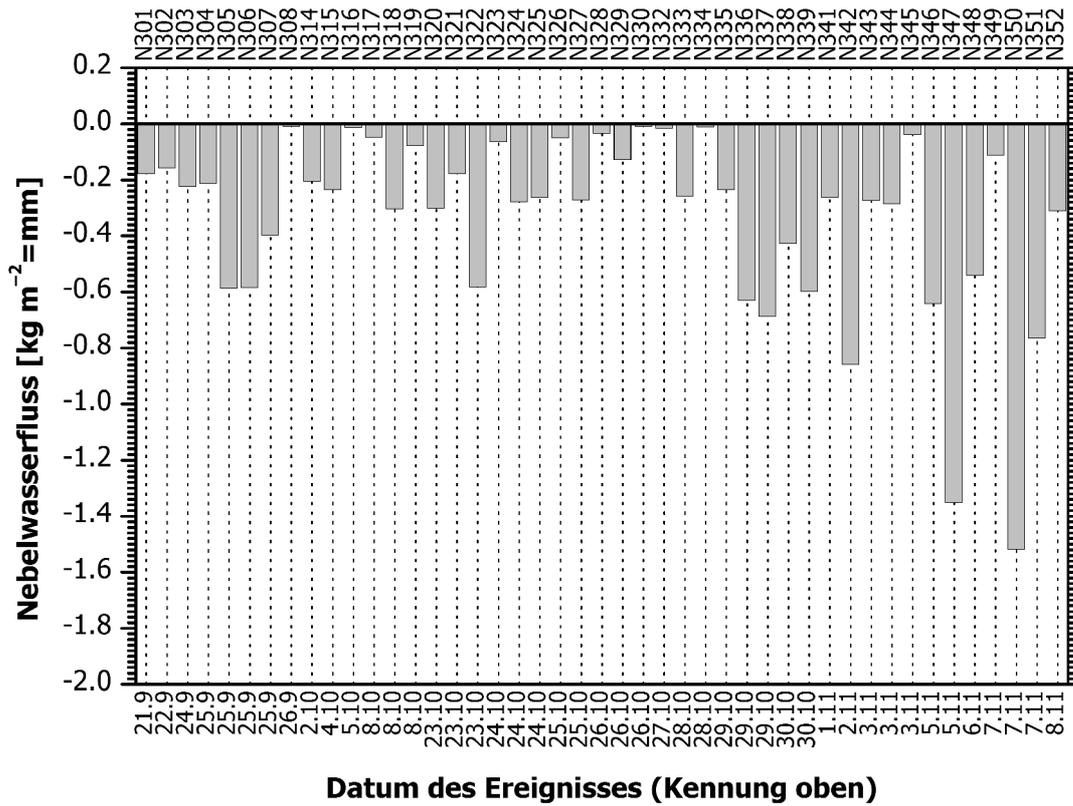


Abbildung 40: Nebelwasserfluss (turbulent und gravitativ) am Waldstein während der Nebelereignisse 2001/2002: Nebelereignisse N301 bis N352. Positive Flüsse bedeuten Emission, negative Deposition. Datengrundlage: 30-min-Messwerte des Nebeldepositionssetups am Weidenbrunnen, Waldstein.

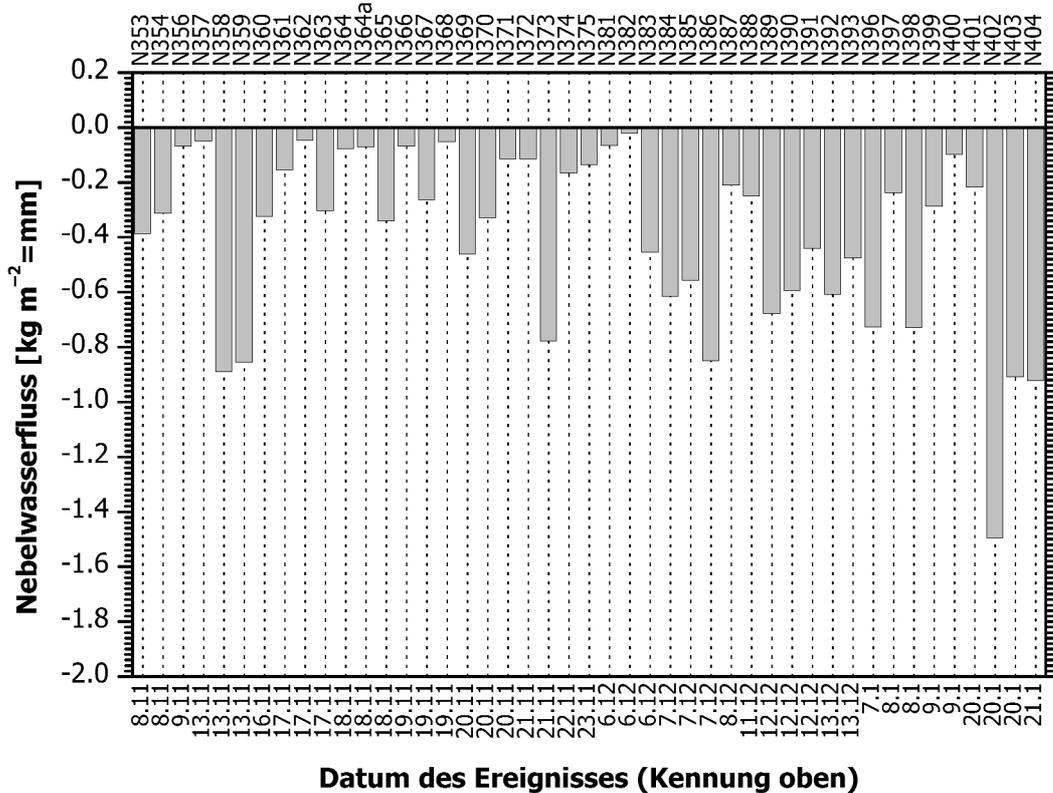


Abbildung 41: Nebelwasserfluss am Waldstein während der Nebelereignisse 2001/2002: Nebelereignisse N353 bis N404. Positive Flüsse bedeuten Emission, negative Deposition. Datengrundlage: 30-min-Messwerte des Nebeldepositionssetups am Weidenbrunnen, Waldstein.

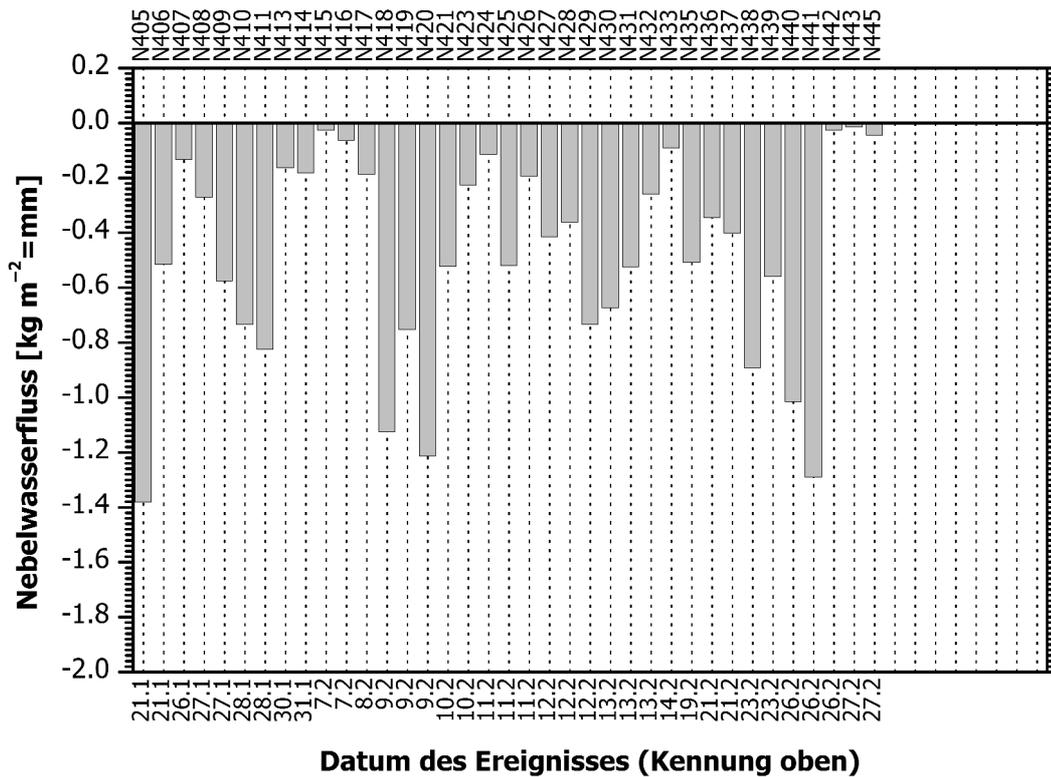


Abbildung 42: Nebelwasserfluss am Waldstein während der Nebelereignisse 2001/2002: Nebelereignisse N405 bis N445. Positive Flüsse bedeuten Emission, negative Deposition. Datengrundlage: 30-min-Messwerte des Nebeldepositionssetups am Weidenbrunnen, Waldstein.

3.5.4 Abhängigkeit des Nebelwasserflusses von der Tropfengröße

Die Abhängigkeit des turbulenten Flusses von Nebelwasser von der Tropfengröße für den Gesamtzeitraum des Hauptexperiments 2001/2002 ist in Abbildung 43 zu sehen. Für die Größenklassen 1 bis 7 sind die Flüsse aus dem Ökosystem heraus gerichtet, für die anderen Größenklassen in das Ökosystem. Das heißt, dass Tropfen mit einem Durchmesser kleiner $7,5 \mu\text{m}$ Nebelwasser aus dem Waldbestand netto emittiert werden, während die größeren Tropfen deponieren.

Der größte Anteil am Gesamtfluss kommt aus der Klasse um den Tropfendurchmesser $15 \mu\text{m}$. In der Abbildung 43 ist auch der berechnete Fluss für Kanal 40 dargestellt, der für die Ermittlung des Gesamtflusses aus den oben genannten Gründen nicht herangezogen wurde. Er ist größer als die Flüsse vorangehender Größenklassen. Aufgrund des wahrscheinlich nach oben nicht klar begrenzten Tropfendurchmessers in dieser Klasse werden hier wohl alle Tropfen oberhalb $50 \mu\text{m}$ mit gemessen. In Abbildung 44 ist der tropfengrößenabhängige Anteil der 30-min-Werte mit Emission von Nebelwasser am Gesamtaufzeichnungszeitraum dargestellt. Den geringsten Anteil hat die Emission im Tropfengrößenkanal 19 ($18,5$ bis $19,5 \mu\text{m}$) mit $2,8 \%$, den höchsten in den ersten beiden Kanälen mit 61% .

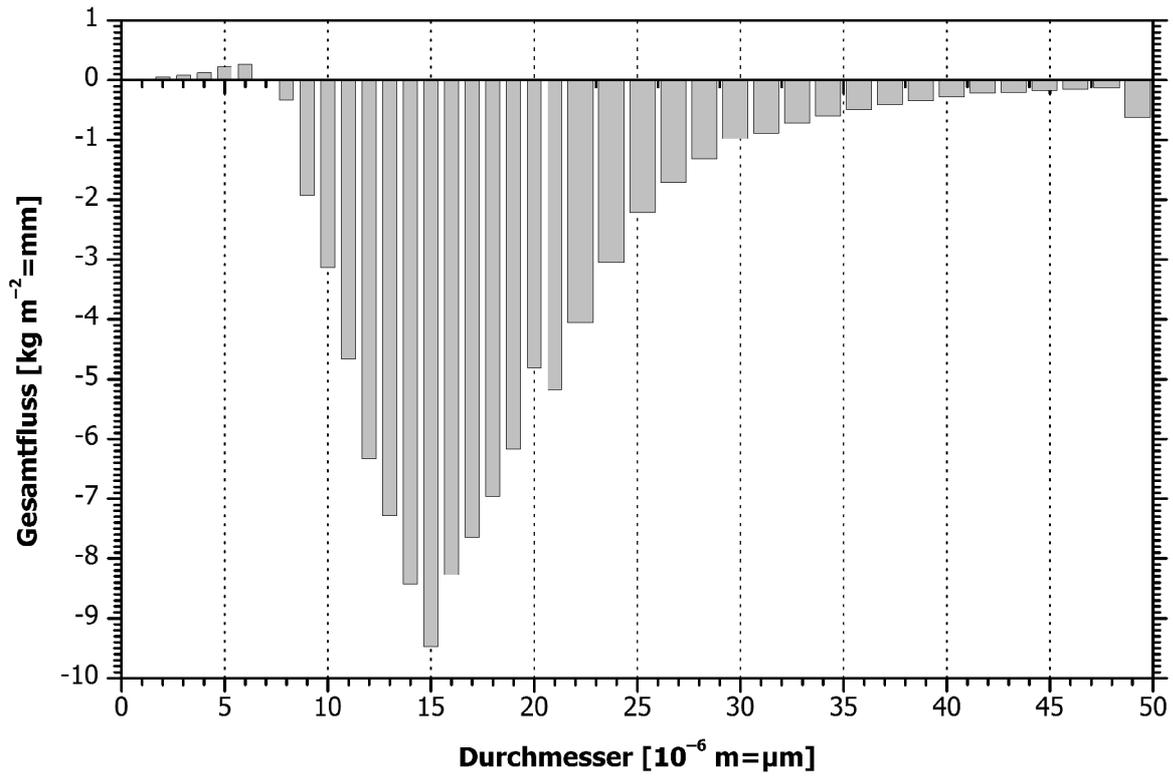


Abbildung 43: Abhängigkeit des turbulenten Gesamtflusses 2001/2002 von der Tropfengröße

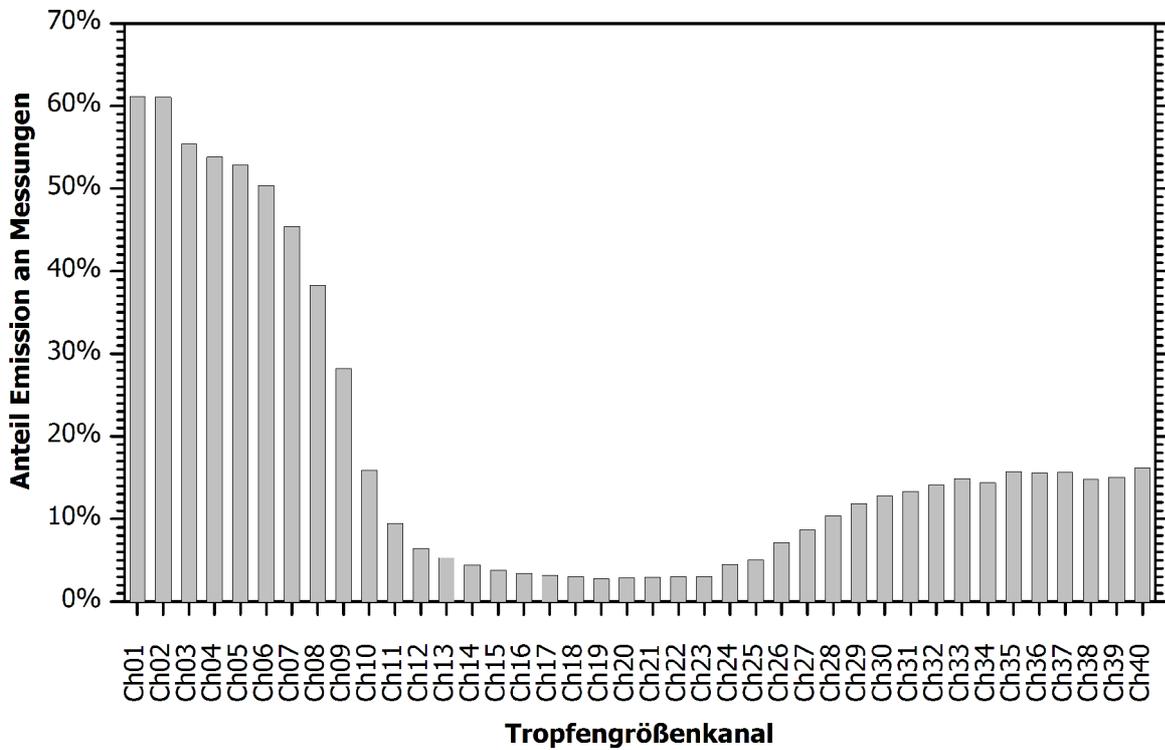


Abbildung 44: Anteil der 30-min-Werte mit Emission von Nebelwasser für die 40 Tropfengrößenklassen.

3.6 Chemische Zusammensetzung der Nebelproben

3.6.1 Allgemeines

Von Februar 2000 bis zum 18. März 2002 wurden auf dem Messturm Weidenbrunnen insgesamt 448 Proben gewonnen (N001 bis N448 und N364a sowie ein unbezeichneter Blindwert, N331 und N340 wurden übersprungen). Während der eigentlichen Messperiode von April 2001 bis März 2002 waren es 259 Proben. In Tabelle 17 ist eine Übersicht zu den gesammelten Proben dargestellt. Die Sammelmenge wurde bei allen Nebelwasserproben bestimmt. Eine genaue Übersicht über Probenbezeichnung, Probenahme etc. findet sich im Anhang (siehe A1 ff.).

Tabelle 17: Im Gesamtzeitraum genommene Proben und Anzahl der jeweils analysierten Proben. In Klammern die Zahlen für den eigentlichen Messzeitraum vom 1. April 2001 bis 18. März 2002

	Gesamt	pH-Wert	elektrische Leitfähigkeit	Ionen
Anzahl der Proben	447 (258)	429 (246)	431 (247)	431 (247)
Nebelwasser	418 (253)	407 (243)	409 (244)	409 (244)
Blindproben	22 (3)	22 (3)	22 (3)	22 (3)

Einige der Proben wurden in verschiedenen anderen Projekten ausgewertet, bei denen teilweise auch andere Parameter gemessen worden. So wurden in [Hottenroth 2001] zusätzlich Nitrophenole analysiert und die allgemeine Fremdstoffbelastung mittels Leuchtbakterien-Hemmtests erfasst (Februar bis Juli 2000, N001 bis N067). In [Thalmann 2001] wird ein Teil der chemischen Analysen vorgestellt (Juli bis Dezember 2000, N060 bis N119). [Grießbaum 2002] fokussiert auf interstitielles Aerosol für die Zeit von Oktober bis Dezember 2001 (N320 bis N377).

3.6.2 Konzentration der wichtigsten Ionen, pH-Wert und elektrische Leitfähigkeit

Die Messung der chemischen Zusammensetzung des Nebelwassers bildet die Grundlage für die allgemeine anorganisch-chemische Charakterisierung des Nebels und für die Berechnung des nebelgebundenen Eintrags von Nähr- und Spurenstoffen in das betrachtete Ökosystem. In Tabelle 18 sind die statistischen Grundgrößen der chemischen Konzentrationen der gemessenen Ionen, des pH-Wertes und der elektrischen Leitfähigkeit für den Gesamtzeitraum von 2000 bis März 2002, in Tabelle 19 für den Hauptmesszeitraum 2001/2002 aufgeführt.

Tabelle 18: Statistische Kenngrößen der chemischen Zusammensetzung der Nebelwasserproben vom Waldstein für den Zeitraum 2000 bis 2002: Minima, Maxima und Perzentile. Angegebene Parameter: pH-Wert (pH), elektrische Leitfähigkeit (λ) [$\mu\text{S cm}^{-1}$], Äquivalentkonzentrationen [$\mu\text{eq l}^{-1}$] der Ionen: Wasserstoff (H^+), Natrium (Na^+), Kalium (K^+), Ammonium (NH_4^+), Magnesium (Mg^{2+}), Calcium (Ca^{2+}) und Chlorid (Cl^-), Nitrat (NO_3^-), Phosphat (PO_4^{3-}) sowie Sulfat (SO_4^{2-}). < bedeutet: unter der Bestimmungsgrenze.

	pH	λ	H^+	Na^+	K^+	NH_4^+
Minimum	2,73	<	0,8	<	<	15,7
5 %-Perzentil	3,29	36	4,3	<	<	119,2
unteres Quartil	3,70	86	24,5	14,0	<	320,4
Median	4,14	168	72,4	43,5	10,4	620,9
oberes Quartil	4,61	302	199,5	117,9	20,4	1131

	pH	λ	H ⁺	Na ⁺	K ⁺	NH ₄ ⁺
95 %-Perzentil	5,37	592	512,9	456,7	46,8	2633
Maximum	6,09	1520	1862	1701	167,0	6320
	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	PO ₄ ³⁻
Minimum	<	<	<	17,9	14,3	<
5 %-Perzentil	<	<	7,9	84,8	86,6	<
unteres Quartil	6,0	17,2	20,7	230,6	182,2	<
Median	14,6	32,2	42,6	487,1	320,6	<
oberes Quartil	37,1	66,4	99,3	980,6	572,5	<
95 %-Perzentil	102,0	183,6	358,2	2064	1239	16,3
Maximum	419,7	568,9	1244	6209	3789	73,9

Tabelle 19: Statistische Kenngrößen der chemischen Zusammensetzung der Nebelwasserproben vom Waldstein für den Hauptmesszeitraum vom 1.4.2001 bis zum 18.3.2002. Erläuterungen siehe Tabelle 18.

	pH	λ	H ⁺	Na ⁺	K ⁺	NH ₄ ⁺
Minimum	2,98	<	0,8	<	<	15,7
5 %-Perzentil	3,30	30	3,6	<	<	103,3
unteres Quartil	3,77	81	20,2	14,3	<	304,3
Median	4,26	151	55,0	50,7	9,4	587,6
oberes Quartil	4,70	304	171,8	145,4	20,8	1042
95 %-Perzentil	5,44	556	500,0	536,8	45,7	2317
Maximum	6,09	1520	1047	1113	167,0	5932
	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	PO ₄ ³⁻
Minimum	<	<	<	17,9	14,3	<
5 %-Perzentil	<	<	1,2	75,2	81,3	<
unteres Quartil	6,6	15,6	22,2	206,0	179,8	<
Median	16,3	29,2	55,7	438,7	316,5	<
oberes Quartil	45,6	66,4	129,5	982,6	545,0	<
95 %-Perzentil	121,0	179,7	445,7	2209	1080	22,0
Maximum	247,7	504,0	1097	6209	2977	73,9

Die gemessenen Konzentrationen können nicht als normalverteilt angesehen werden. Die Tests auf Normalverteilung nach [Shapiro-Wilk 1965] ergeben, basierend auf einem Signifikanzniveau von 5 %, eine Ablehnung der These. Auch mit den logarithmierten Daten kann nur für Sulfat und Phosphat die Normalverteilung angenommen werden.

Tabelle 20: Statistische Kenngrößen der chemischen Zusammensetzung der Blindproben vom Waldstein für den Gesamtzeitraum 2000 bis 2002 ($n = 22$ Proben). Erläuterungen siehe Tabelle 18.

	pH	λ	H ⁺	Na ⁺	K ⁺	NH ₄ ⁺
Minimum	4,55	4	1,7	<	<	3,7
5 %-Perzentil	4,71	15	2,3	<	<	30,3
unteres Quartil	4,82	18	4,4	<	<	54,9
Median	5,12	24	7,7	13,9	<	78,2
oberes Quartil	5,36	34	15,2	30,5	5,0	131,8
95 %-Perzentil	5,64	58	19,5	71,4	42,3	285,4
Maximum	5,78	72	28,2	98,7	77,5	439,1

	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	PO ₄ ³⁻
Minimum	<	<	<	<	<	<
5 %-Perzentil	<	<	<	37,6	22,5	<
unteres Quartil	<	<	<	46,5	28,8	<
Median	3,1	15,4	4,4	67,2	48,3	<
oberes Quartil	9,1	36,1	22,2	122,9	87,6	<
95 %-Perzentil	23,9	101,9	53,1	202,1	160,1	<
Maximum	24,7	111,8	66,8	296,8	200,3	<

Die statistischen Kenngrößen für die chemische Zusammensetzung der insgesamt 22 gewonnenen Blindproben finden sich in Tabelle 20.

Die gemessenen Konzentrationen von Sulfat und Phosphat beziehen sich auf Totalkonzentrationen der jeweiligen Spezies H₂SO₄, HSO₄⁻ und SO₄²⁻ bzw. H₃PO₄, H₂PO₄⁻, HPO₄²⁻ und PO₄³⁻. Im gemessenen pH-Bereich von 2,7 bis 6,1 liegt Sulfat überwiegend als SO₄²⁻ vor, während Phosphat vor allem als H₂PO₄⁻ auftritt (siehe Abbildung 45).

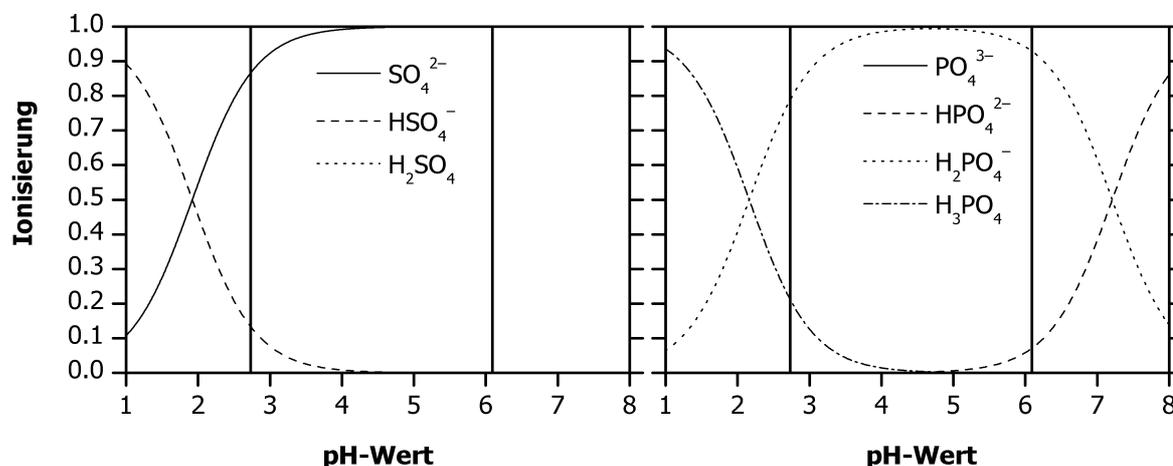


Abbildung 45: Die Stabilitätsdiagramme von Sulfat (links) und Phosphat (rechts). Die senkrechten Linien zeigen den gemessenen pH-Wert-Bereich.

Zur Überprüfung der Ergebnisse wurde aus den gemessenen Ionenkonzentrationen die Leitfähigkeit berechnet (siehe Kapitel 2.2.6). Diese lässt sich mit der gemessenen elektrischen Leitfähigkeit vergleichen. In Abbildung 46 ist dieser Vergleich aufgetragen.

Die Abbildungen 47 bis 55 zeigen die individuelle chemische Zusammensetzung der Nebelwasserproben für den Gesamtzeitraum, die Proben ab N190 bezeichnen die Nebelereignisse des Hauptmesszeitraums 2001/ 2002. Zusätzlich ist in den Abbildungen auch die Art der Probe (Nebelwasserprobe, Feldblindwert etc.) angegeben.

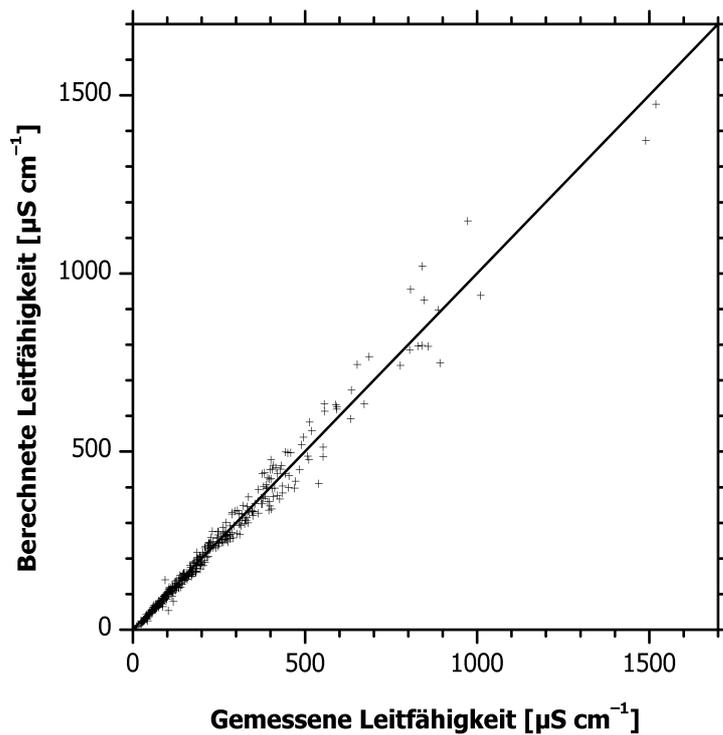


Abbildung 46: Vergleich der gemessenen elektrischen Leitfähigkeit mit der berechneten. Die Linie gibt das 1:1-Verhältnis an.

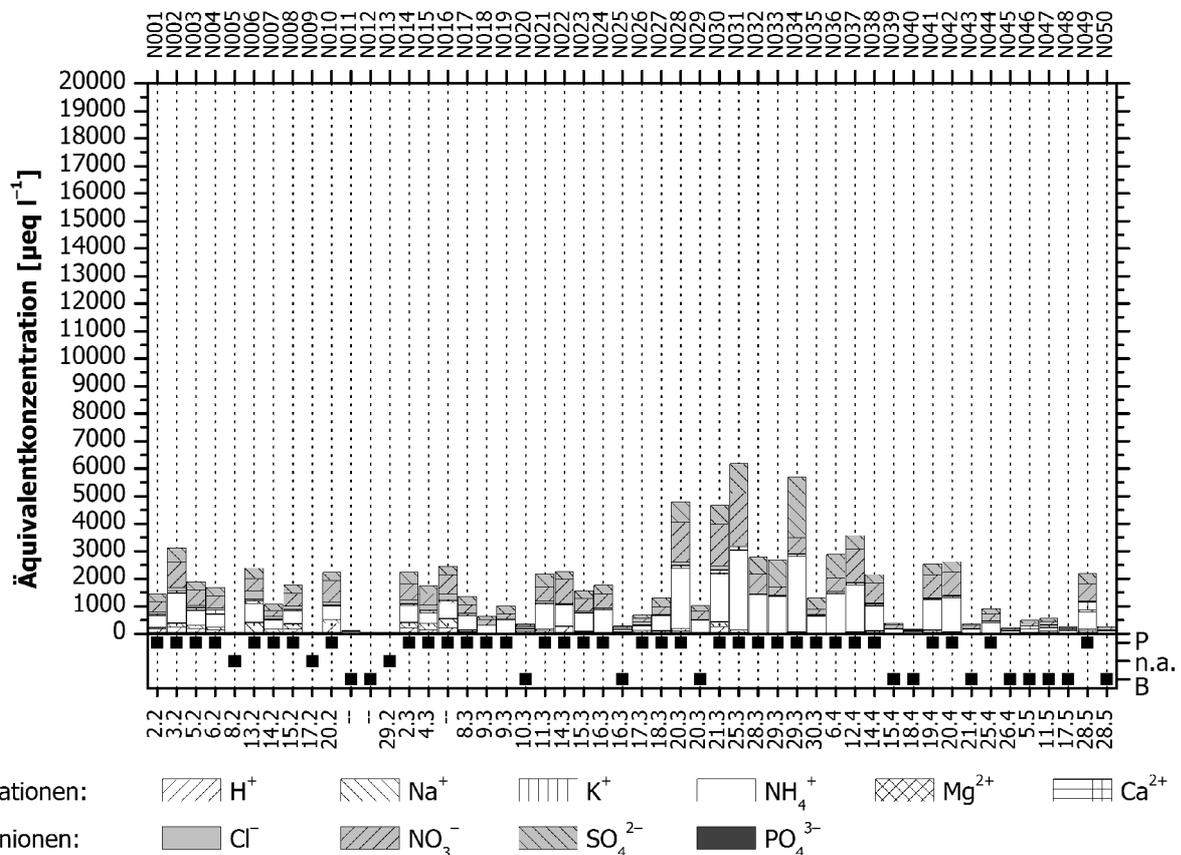


Abbildung 47: Chemische Zusammensetzung der Nebelproben N001 bis N050 (2.2. bis 28.5.2000). Der untere Teil der Abbildung: P = Nebelereignis, n.a. = Nebelereignis, nicht analysiert (wegen zu geringer Sammelmenge), B = Blindwert. Oberste Achse: Bezeichnung, unterste Achse: Datum des Ereignisses (wenn verfügbar).

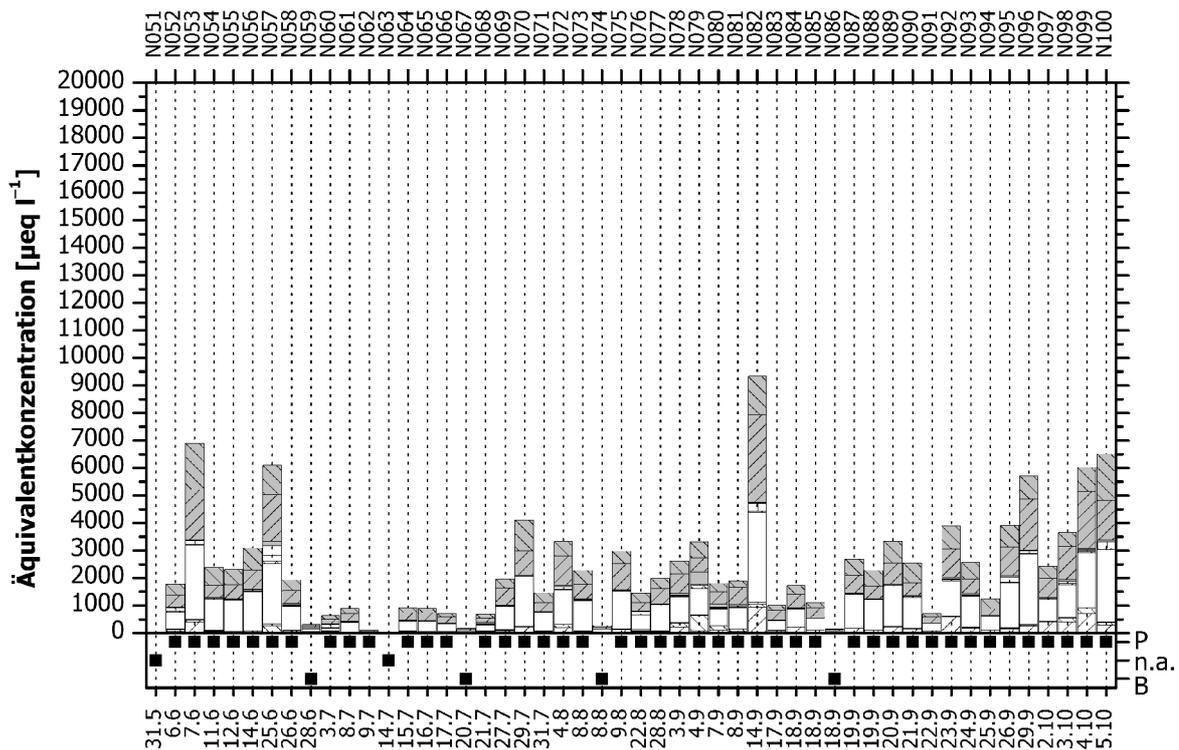


Abbildung 48: Chemische Zusammensetzung der Nebelproben N051 bis N100 (31.5.2001 bis 5.10.2001). Ausführliche Beschreibung: siehe Abbildung 47.

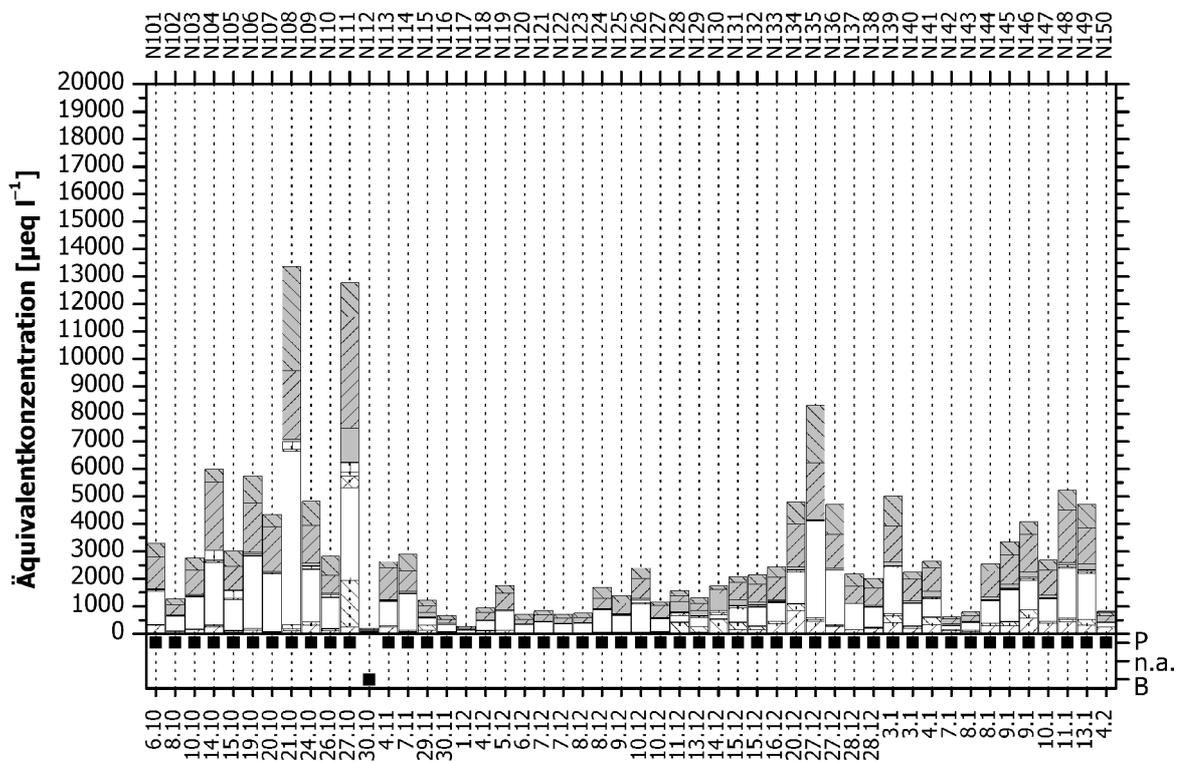


Abbildung 49: Chemische Zusammensetzung der Nebelproben N101 bis N150 (6.10.2000 bis 4.2.2001). Ausführliche Beschreibung: siehe Abbildung 47.

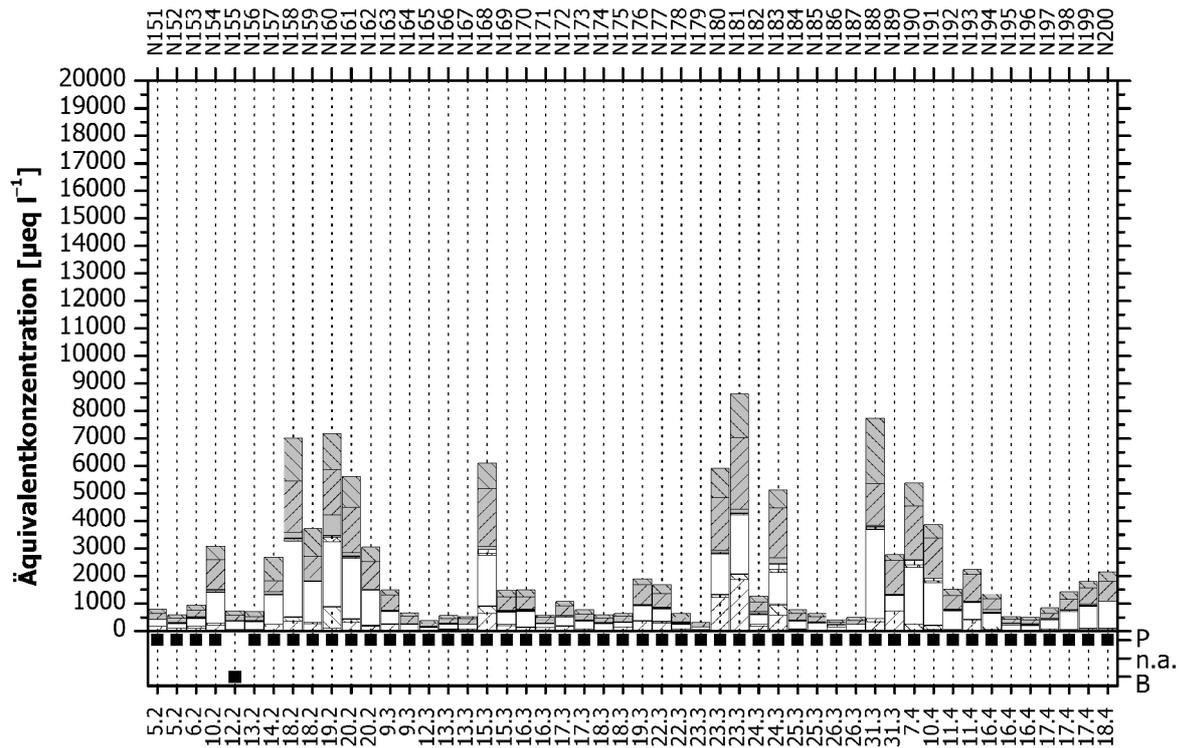


Abbildung 50: Chemische Zusammensetzung der Nebelproben N151 bis N200 (5.2.2001 bis 18.4.2001). Ausführliche Beschreibung: siehe Abbildung 47.

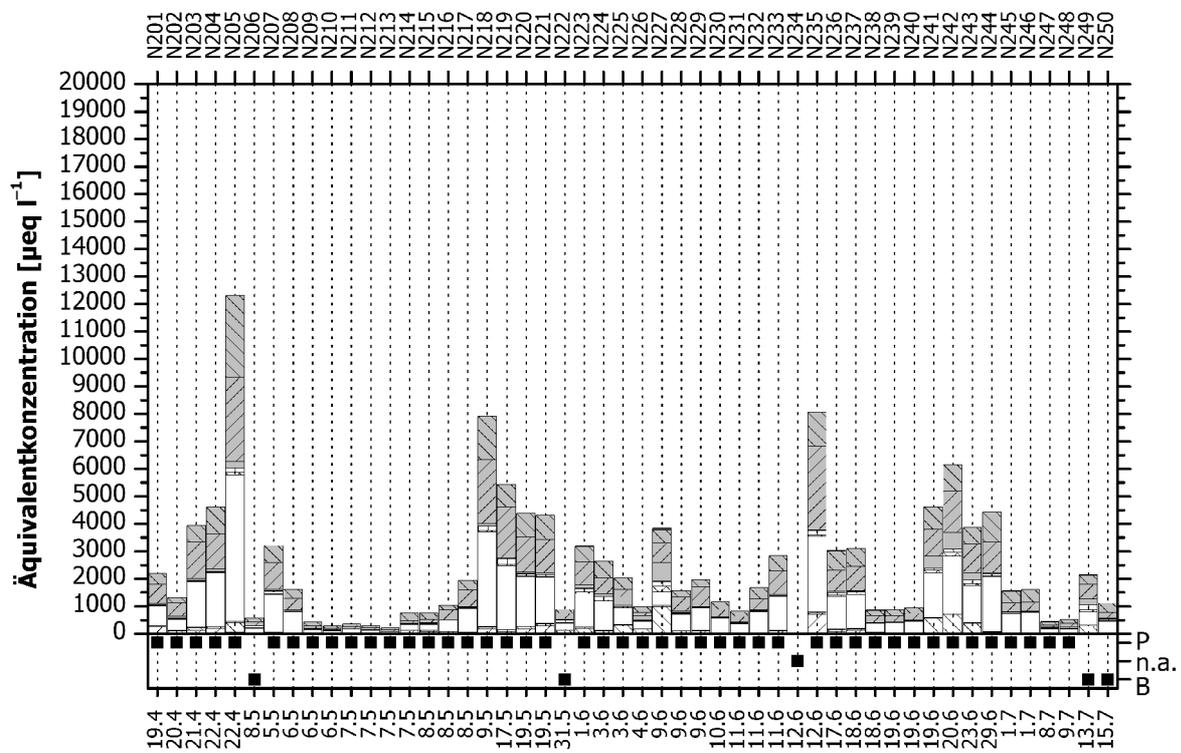


Abbildung 51: Chemische Zusammensetzung der Nebelproben N201 bis N250 (19.4.2001 bis 15.7.2001). Ausführliche Beschreibung: siehe Abbildung 47.

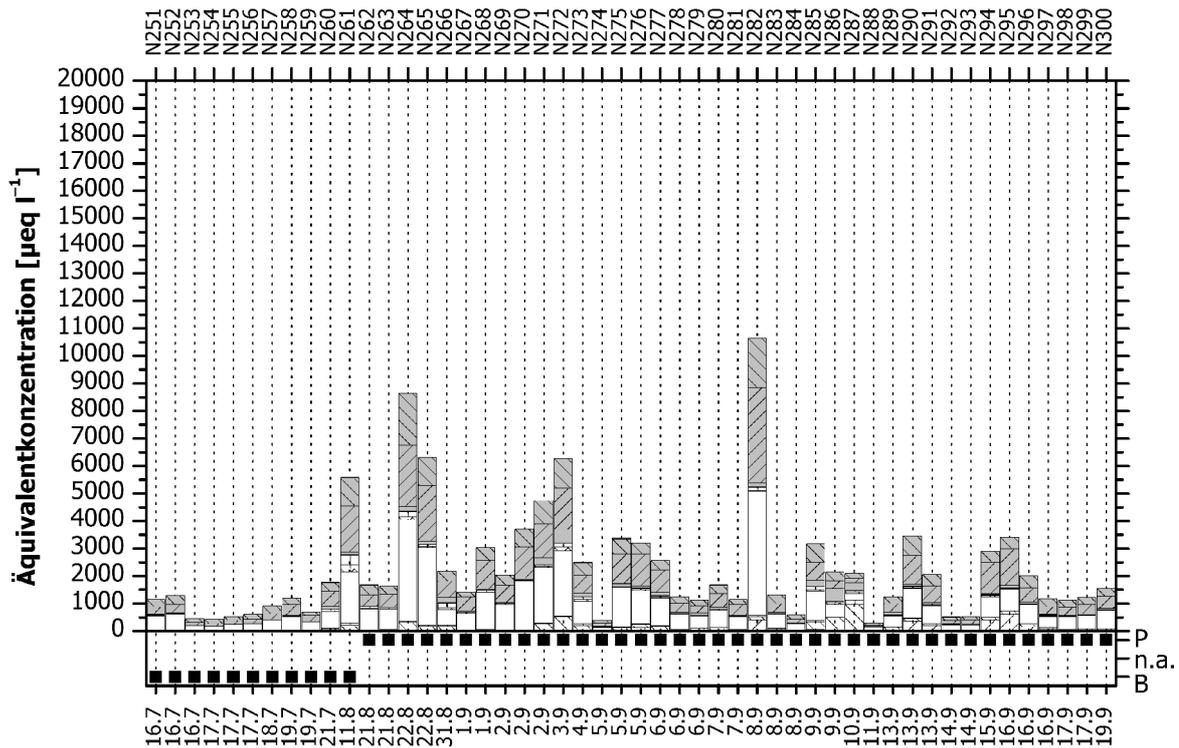


Abbildung 52: Chemische Zusammensetzung der Nebelproben N251 bis N300 (16.7.2001 bis 19.9.2001). Ausführliche Beschreibung: siehe Abbildung 47.

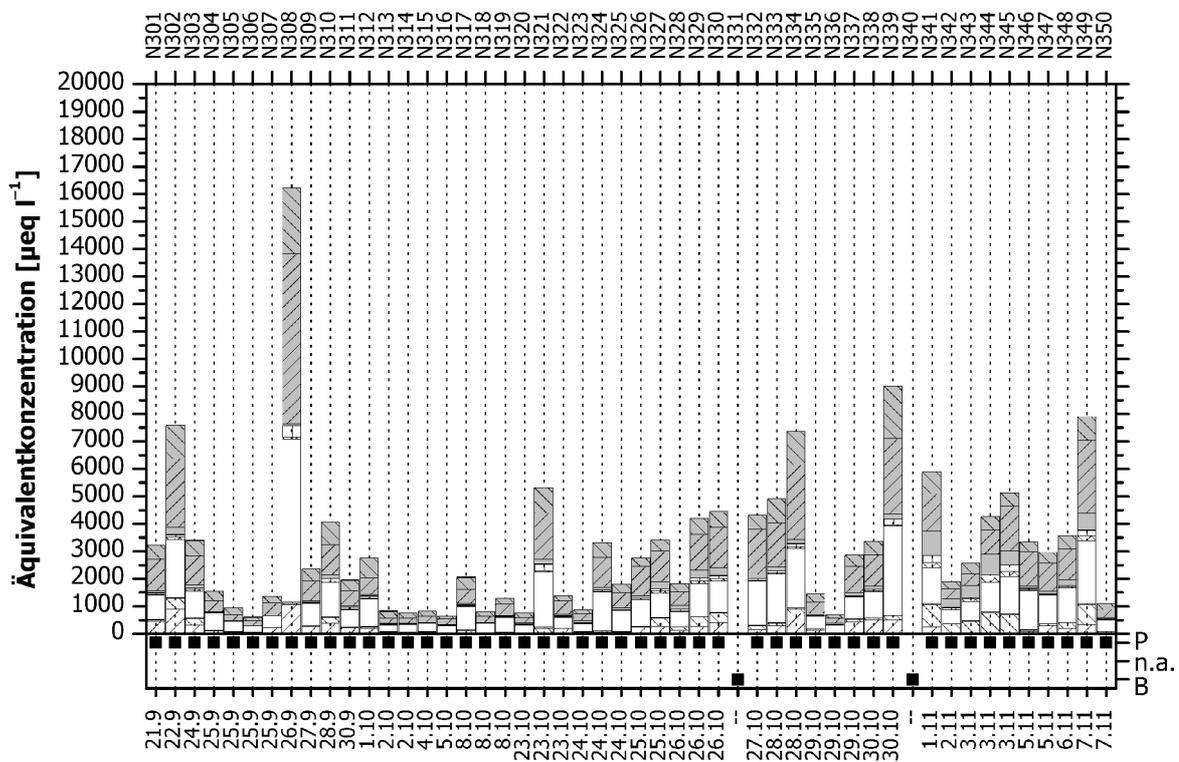


Abbildung 53: Chemische Zusammensetzung der Nebelproben N301 bis N350 (21.9.2001 bis 7.11.2001). Ausführliche Beschreibung: siehe Abbildung 47.

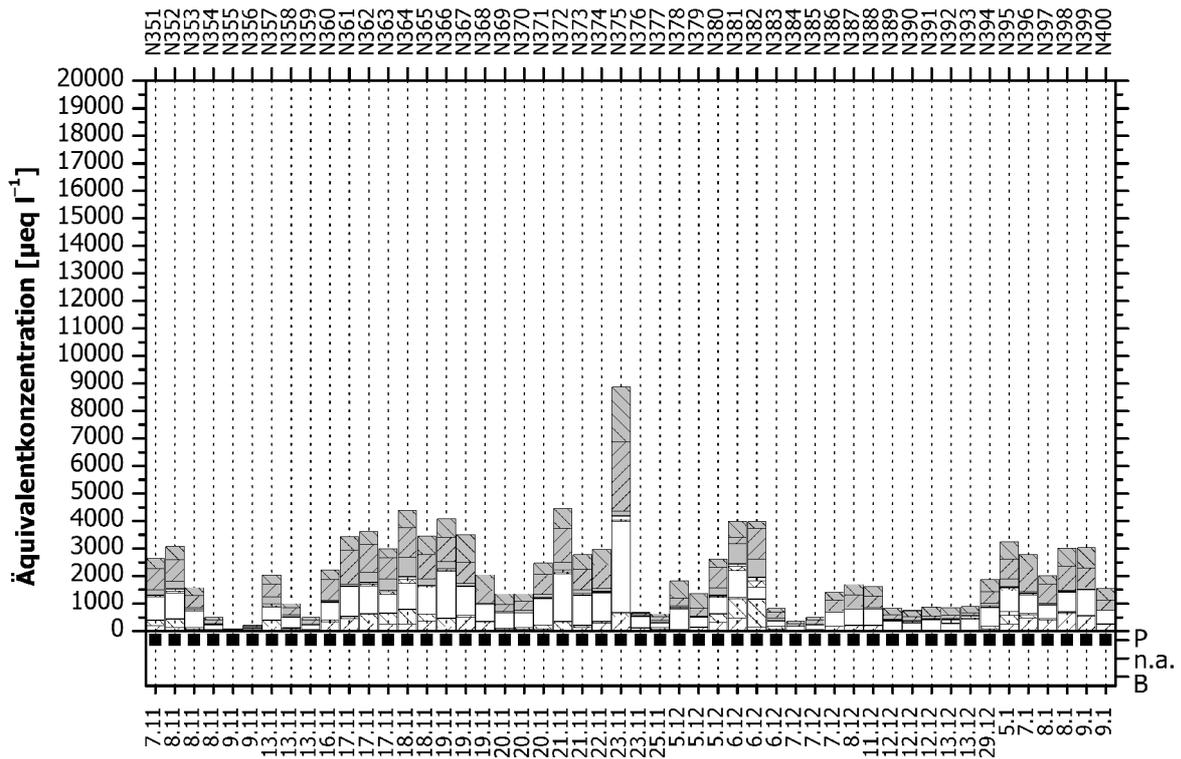


Abbildung 54: Chemische Zusammensetzung der Nebelproben N351 bis N400 (7.11.2001 bis 9.1.2002). Ausführliche Beschreibung: siehe Abbildung 47. Probe 364a wurde nicht analysiert.

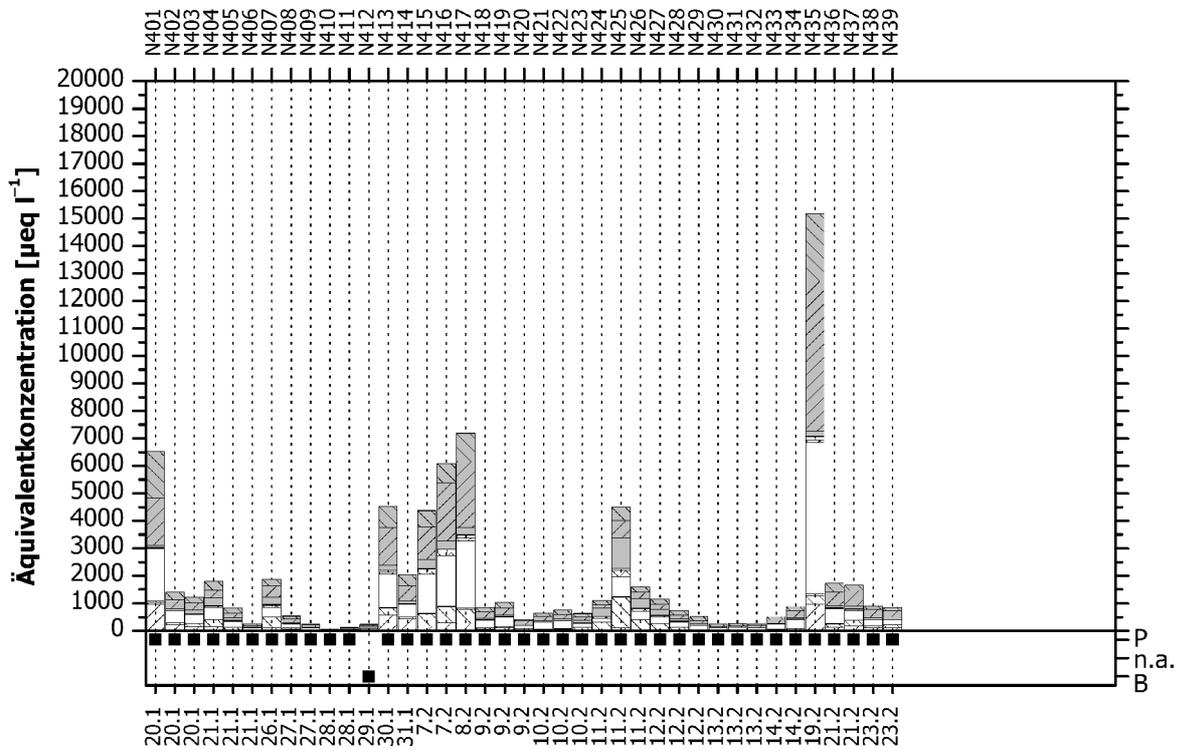


Abbildung 55: Chemische Zusammensetzung der Nebelproben N401 bis N439 (20.1.2002 bis 23.2.2002). Ausführliche Beschreibung: siehe Abbildung 47.

Aus Tabelle 18 ergibt sich eine mediane Zusammensetzung von Nebelwasser am Waldstein. Diese ist in Abbildung 56 dargestellt. Dominierend sind das Kation Ammonium NH_4^+ und die Anionen Nitrat NO_3^- und Sulfat SO_4^{2-} mit insgesamt 87 % Anteil an der Gesamtäquivalentkonzentration.

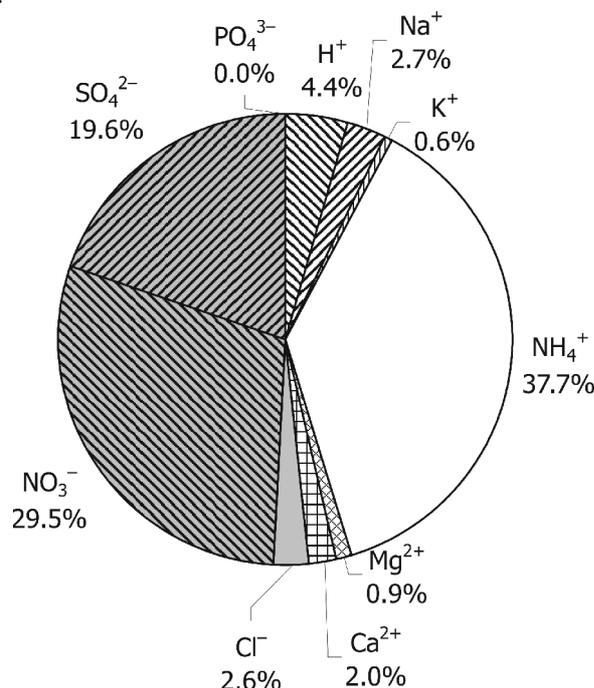


Abbildung 56: Mediane chemische Zusammensetzung der Nebelwasserproben vom Waldstein, Zeitraum 2000 bis 2002. Gesamtkonzentration: $1633 \mu\text{eq l}^{-1}$.

Durch die Normierung der Konzentrationen auf ein zugehöriges Luft-Volumenelement wird eine Vergleichbarkeit mit Luftbelastungen möglich. In Tabelle 21 sind die statistischen Kenngrößen der auf den Flüssigwassergehalt normierten gemessenen Ionenkonzentrationen zusammengetragen.

Tabelle 21: Statistische Kenngrößen der nebelgebundenen chemischen Luftbelastung in ng m^{-3} . Datengrundlage 218 Proben aus dem Zeitraum 1.4.2001 bis 18.3.2002 (für H^+ 217 Proben), für die chemische Analysen und der mittlere Flüssigwassergehalt vorliegen. < bedeutet: unter der Bestimmungsgrenze.

	H^+	Na^+	K^+	NH_4^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}
Minimum	0,0	<	<	0,9	<	<
5 %-Perzentil	0,4	<	<	112,9	<	<
unteres Quartil	2,7	53,0	<	884,5	10,5	34,9
Median	8,6	200,5	60,1	2141	37,8	115,0
oberes Quartil	35,2	635,3	139,5	3993	94,0	247,7
95 %-Perzentil	113,6	2004	289,4	8351	233,6	528,4
Maximum	232,9	6120	1850	14856	631,8	1315

	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	PO ₄ ³⁻	Summe
Minimum	<	3,7	1,1	<	5,7
5 %-Perzentil	<	249,3	233,5	<	596,0
unteres Quartil	135,4	2090	1380	<	4591
Median	362,5	5717	3025	<	11667
oberes Quartil	909,7	11876	5632	<	23563
95 %-Perzentil	2937	23691	9678	105,2	47930
Maximum	7875	47310	19248	383,4	99822

Bei der nebelgebundenen Luftbelastung dominieren Ammonium NH₄⁺, Nitrat NO₃⁻ und Sulfat SO₄²⁻ mit 93 % der Masse der Ionen.

3.7 Chemische Zusammensetzung der wet-only-Niederschlagswasserproben

3.7.1 Allgemeines

Die mit dem wet-only-Niederschlagssammler gewonnenen Proben wurden während der Messperiode im Mittel einmal wöchentlich gesammelt. Für den 2. April 2001 bis zum 25. Februar 2002 wurden insgesamt 45 Proben genommen. Bei allen wurde die chemische Zusammensetzung bestimmt.

3.7.2 Konzentration der wichtigsten Ionen, pH-Wert und elektrische Leitfähigkeit

Die Messung der chemischen Konzentration der wichtigsten Ionen im Niederschlag (wet-only) bildet die Grundlage für den Vergleich mit dem Nebelwasser und der nassen und feuchten Deposition. Die Tabelle 22 beinhaltet alle wichtigen statistischen Kenngrößen der gemessenen chemischen Parameter.

Tabelle 22: Statistische Kenngrößen der chemischen Zusammensetzung der wet-only-Niederschlagsproben aus dem Pflanzgarten, Waldstein für die Periode vom 2.4.2001 bis zum 25.2.2002. Dargestellt sind der pH-Wert (pH), die elektrische Leitfähigkeit (λ) in $\mu\text{S cm}^{-1}$ und die Äquivalentkonzentrationen der gemessenen anorganischen Ionen in $\mu\text{eq l}^{-1}$.

	pH	λ	H ⁺	Na ⁺	K ⁺	NH ₄ ⁺
Minimum	4,96	7	0,69	<	<	7,79
5 %-Perzentil	5,04	9	1,24	<	<	15,43
unteres Quartil	5,24	11	2,55	<	<	26,74
Median	5,38	13	4,19	<	<	32,44
oberes Quartil	5,60	19	5,77	9,61	<	58,45
95 %-Perzentil	5,91	33	9,15	23,02	8,48	124,44
Maximum	6,16	111	11,09	68,29	165,74	517,23

	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	PO ₄ ³⁻
Minimum	<	<	<	15,46	11,31	<
5 %-Perzentil	<	<	<	19,12	14,55	<
unteres Quartil	<	<	<	25,10	20,25	<
Median	<	<	9,11	34,59	26,75	<
oberes Quartil	2,19	15,98	14,12	45,42	35,84	<
95 %-Perzentil	6,93	32,05	39,48	97,31	66,79	21,78
Maximum	26,91	89,82	65,02	343,52	262,33	38,85

Dominierend im Niederschlag sind Ammonium NH₄⁺, Nitrat NO₃⁻ und Sulfat SO₄²⁻ mit 88 % Anteil an der Gesamtäquivalentkonzentration der medianen Zusammensetzung (siehe Abbildung 57). Die Ionenbilanz ist allerdings für den Median nur schlecht ausgeglichen, da die gemessenen Konzentrationen nah an der Bestimmungsgrenze liegen. Bei genauerer Analytik wären diesbezüglich exaktere Aussagen möglich.

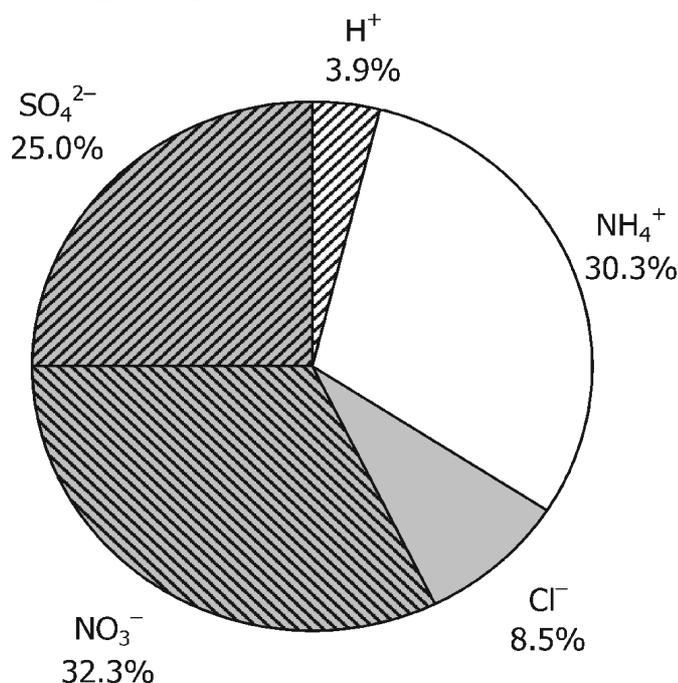


Abbildung 57: Mediane Zusammensetzung der wet-only-Niederschlagsproben vom Waldstein (Pflanzgarten) 2.4.2001 bis 25.2.2002 (45 Proben). Gesamtkonzentration: 107,1 $\mu\text{eq l}^{-1}$.

In Abbildung 58 sind neben den Messwerten der Konzentrationen auch die Niederschläge für die jeweiligen Sammelperioden angegeben.

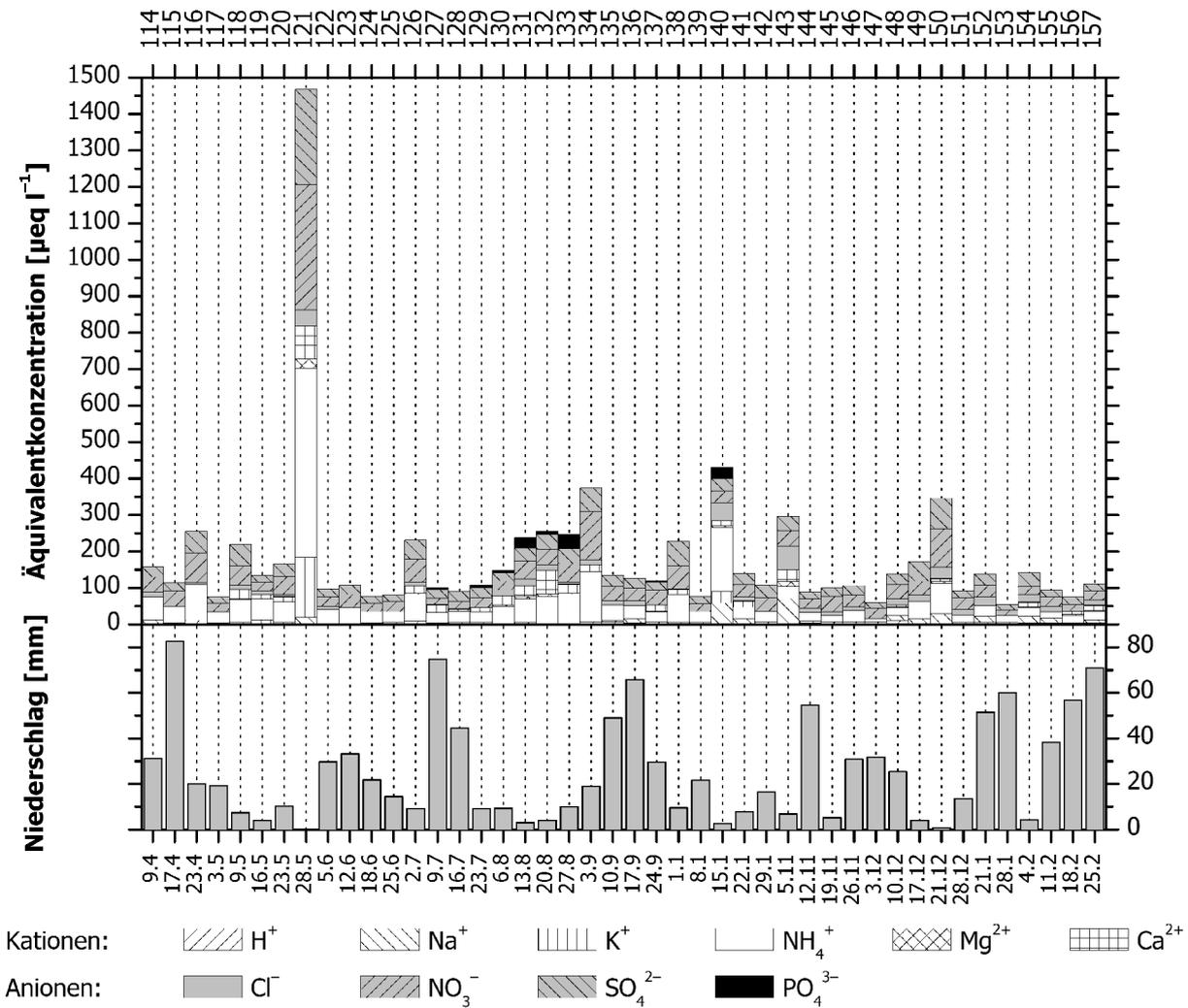


Abbildung 58: Chemische Zusammensetzung der wet-only-Niederschlagsproben aus dem Pflanzgarten, Waldstein für den Zeitraum vom 2.4.2001 bis zum 25.2.2002 und die Niederschläge für den jeweiligen Probenahmezeitraum. Oben dargestellt ist die Probennummer (komplette Nomenklatur: PG WO nnnn, nnnn = Nummer), unten das Probenabmedatum 2001/2002.

3.8 Eintrag von Spurenstoffen durch Nebel

Aus den Nebelwassereinträgen (Kapitel 3.5) und den chemischen Konzentrationen (Kapitel 3.6) kann der Eintrag von Spurenstoffen durch Nebel bestimmt werden. Die so berechneten Daten auf Ereignisbasis sind im Anhang (ab Seite A36) dargestellt. Während der Hauptuntersuchungsperiode 2001/2002 waren für insgesamt 211 Ereignisse sowohl der Nebelwasserfluss als auch die chemische Zusammensetzung bestimmbar. In Abbildung 59 wurden die Flüsse für alle Ereignisse monatlich aufsummiert und so eine saisonale Verteilung der feuchten Deposition dargestellt. Die gesamte Deposition während des Hauptuntersuchungszeitraums sind in Tabelle 23 aufgeführt. Dominierend sind Ammonium NH₄⁺, Nitrat NO₃⁻ und Sulfat SO₄²⁻.

Tabelle 23: Summe der feuchten Deposition der wichtigsten anorganischen Ionen an der Station Weidenbrunnen, Waldstein im Untersuchungszeitraum 2001/2002. Datengrundlage: 211 Ereignisse 17.4.2001 bis 28.2.2002.

Ion	H ⁺	Na ⁺	K ⁺	NH ₄ ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻
Deposition [kg ha ⁻¹]	0,09	1,73	0,30	8,54	0,22	0,50	2,45	24,25	12,20

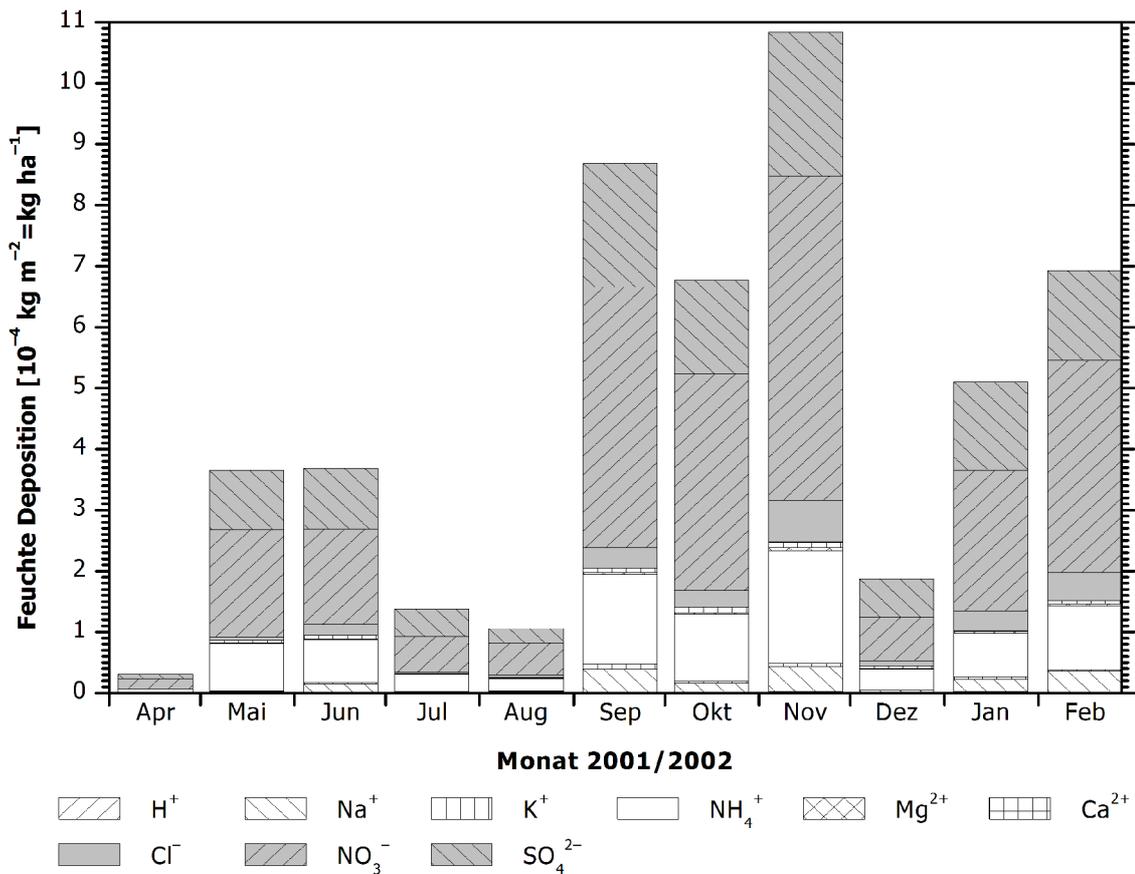


Abbildung 59: Monatssummen der feuchten Deposition der wichtigsten anorganischen Ionen am Waldstein während des Hauptuntersuchungszeitraums 2001/2002. Datengrundlage: 30-min-Werte des Depositionssetups und ereignisbezogene chemische Analytik (211 Ereignisse).

Für die Diskussion der ökosystemaren Auswirkungen dieser Depositionen sind der Stickstoff- und Schwefeleintrag von erhöhter Relevanz. Für den Zeitraum Mitte April 2001 bis Ende Februar 2002 beträgt der Stickstoffeintrag $6,64 \text{ kg N ha}^{-1}$ durch Ammonium NH_4^+ und $5,48 \text{ kg N ha}^{-1}$ durch Nitrat NO_3^- . Der Gesamteintrag beträgt demzufolge $12,12 \text{ kg N ha}^{-1}$ für den Zeitraum von 317 Tagen. Das entspricht einem jährlichen Eintrag von ca. $14,0 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$. Der Schwefeleintrag durch Sulfat SO_4^{2-} beträgt am Waldstein $4,07 \text{ kg S ha}^{-1}$ für den Untersuchungszeitraum oder auf ein Jahr hochgerechnet $4,7 \text{ kg S ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$.

3.9 Eintrag von Spurenstoffen durch Regen

Aus den gemessenen Niederschlägen (Regen und Schnee) und den auf meist wöchentlicher Basis analysierten wet-only-Niederschlagsproben lässt sich der Eintrag der wichtigsten anorganischen Ionen in das Ökosystem am Waldstein berechnen. Dabei wurden die direkten Messwerte ohne die Korrekturen nach [Rebmann *et al.* 2004] verwendet, da eine wöchentliche Auflösung benötigt wurde. Die ausführlichen Werte können dem Anhang entnommen werden (A41). Der saisonale Verlauf der nassen Deposition ist in Abbildung 60 dargestellt. Der Tabelle 24 kann man die Summen für den Hauptuntersuchungszeitraum entnehmen. Hauptsächlich werden Ammonium NH_4^+ , Nitrat NO_3^- und Sulfat SO_4^{2-} eingetragen.

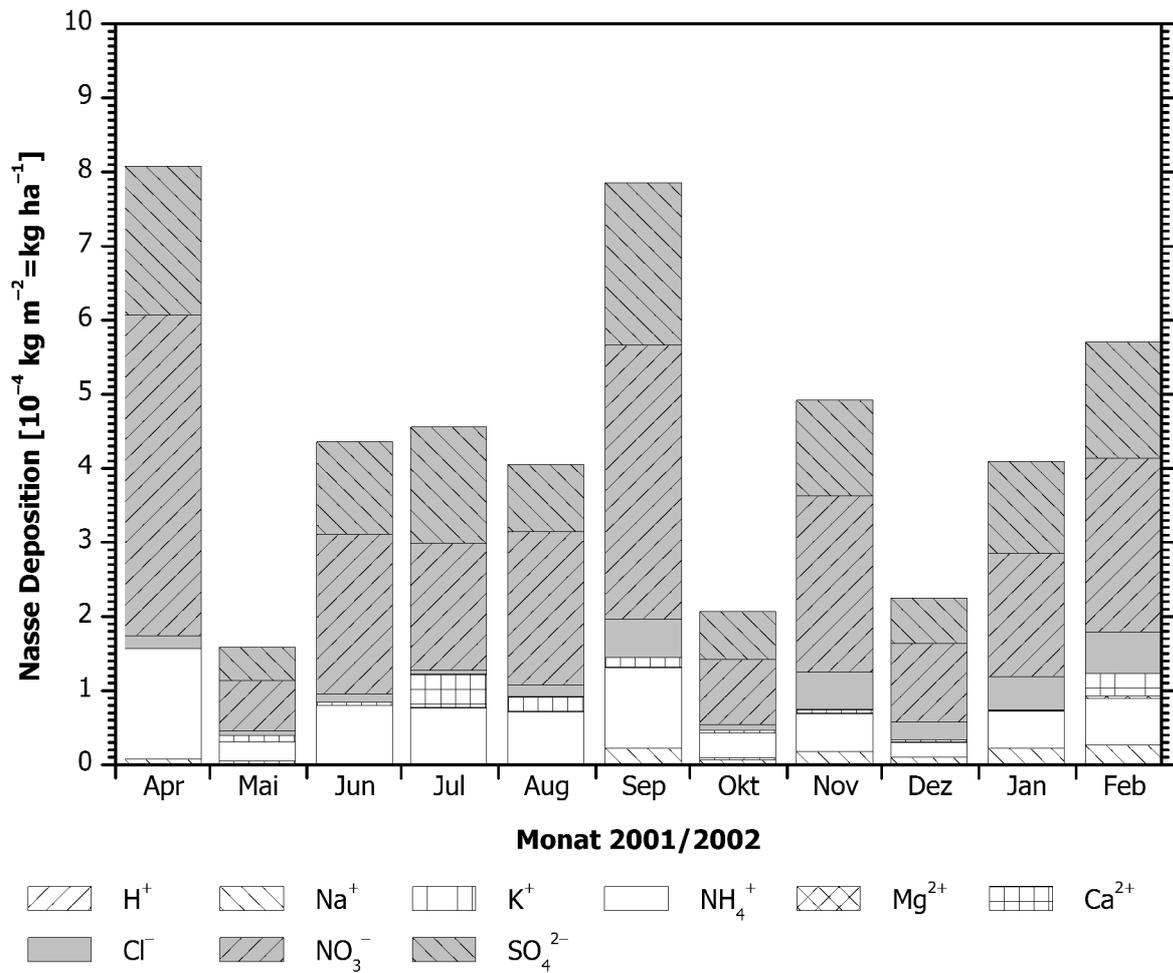


Abbildung 60: Monatssummen der nassen Deposition der wichtigsten anorganischen Ionen am Waldstein während des Hauptuntersuchungszeitraums 2001/2002. Datengrundlage: Chemische Analyse von 44 Proben und Niederschlagsdaten aus dem Pflanzgarten, Waldstein zwischen 2.4.2001 und 25.2.2002.

Tabelle 24: Summe der nassen Deposition der wichtigsten anorganischen Ionen an der Station Weidenbrunnen, Waldstein im Untersuchungszeitraum 2001/2002. Datengrundlage: 44 Proben vom 2.4.2001 bis 28.2.2002.

Ion	H ⁺	Na ⁺	K ⁺	NH ₄ ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻
Deposition [kg ha ⁻¹]	0,05	1,08	0,08	7,27	0,09	1,32	2,89	22,98	13,74

Betrachtet man den Eintrag auf Elementbasis, so ergeben sich für Stickstoff Werte von 5,65 kg N ha⁻¹ bei Ammonium NH₄⁺ und 5,19 kg N ha⁻¹ bei Nitrat NO₃⁻. Dies ergibt einen Gesamteintrag von 10,84 kg N ha⁻¹ oder hochgerechnet 11,9 kg N ha⁻¹ a⁻¹. Bei Schwefel liegt der Eintrag bei 4,58 kg S ha⁻¹ bzw. 5,0 kg S ha⁻¹ a⁻¹.

3.10 Ökosystem-Bilanzdaten für den Waldstein

Bei der Schließung der Ökosystembilanz an der Grenzfläche Vegetation – Atmosphäre stehen sich nasse und feuchte Deposition auf der einen und der Bestandesniederschlag auf der anderen Seite gegenüber. Zur vollständigen Schließung wären aber weitere Parameter (trockene Deposition, Kronentraufumsatz u. a.) zu messen. Durch das BITÖK werden auf verschiedenen Flächen im Waldsteingebiet Bestandes- und Freilandniederschlag untersucht. Im Rahmen der Routinemessungen werden auf der Intensivmessfläche Coulissenhieb (siehe Abbildungen 3 und 61) an vier Feldern Messungen des Bestandesniederschlages durchgeführt [Manderscheid *et al.*

2001]. Die Daten für diese Felder (siehe Abbildung 61) wurden durch [Alewell 2003] zur Verfügung gestellt.

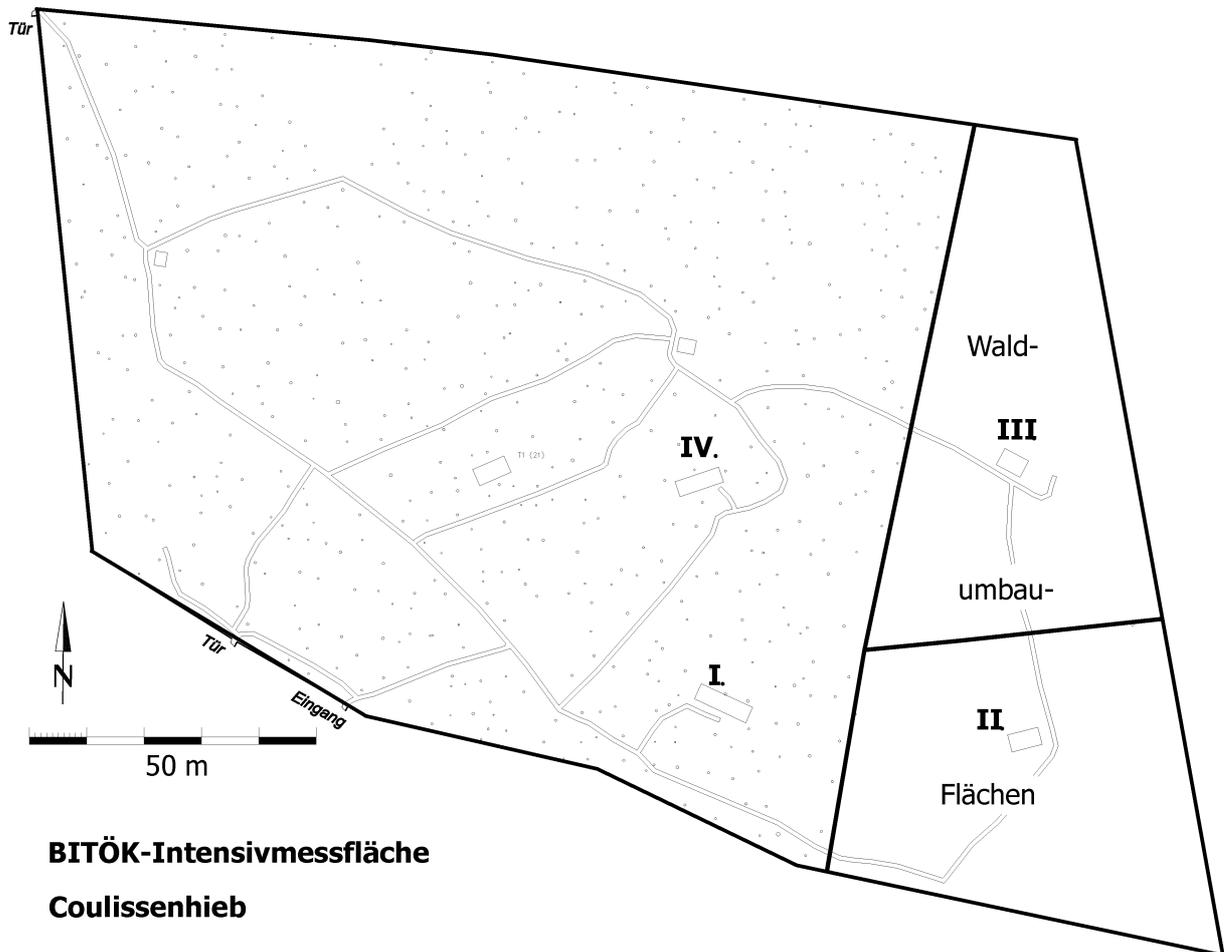


Abbildung 61: Lage der Messflächen für den Bestandesniederschlag I bis IV im Coulissenhieb, Waldstein. Die Punkte markieren Bäume, auf den Waldumbauflächen wird nach einem Kahlschlag ein Teil natürlich verjüngt, ein anderer forstlich aufbereitet. Quelle: [Gerstberger 2003].

Die Felder II und III (siehe Abbildung 61) sind aufgrund ihrer Lage in den Waldumbauflächen nicht als Messfelder zur Bestimmung des Bestandesniederschlags (als typisch für das stark bewaldete Gebiet) geeignet. Daher wurden nur Daten der Felder I und IV (insgesamt 10 Messpunkte) ausgewertet. Der Bestandesniederschlag wird im Coulissenhieb auf 14-tägiger Basis bestimmt. Zum Vergleich mit der nassen und feuchten Deposition wurden die Bestandesniederschläge vom 27. März 2001 bis zum 25. März 2002 (363 Tage) verwendet.

Die über die Niederschlagsmenge und die gemessenen Konzentrationen errechneten Einträge der wichtigsten anorganischen Ionen können der Abbildung 62 entnommen werden. Für den Gesamtzeitraum ergeben sich die in der Tabelle 25 angegebenen Werte. Der Bestandesniederschlag für diese Zeit beträgt 1026 mm (Mittelwert der 10 Messpunkte).

Auf Elementbasis ergeben sich für Stickstoff Einträge von $10,97 \text{ kg N ha}^{-1}$ durch Ammonium NH_4^+ und $12,31 \text{ kg N ha}^{-1}$ durch Nitrat NO_3^- . Durch Sulfat wurden in dem Zeitraum insgesamt $11,83 \text{ kg S ha}^{-1}$ eingetragen. Auf Jahresbasis¹ ergeben sich so Werte $22,3 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ bzw. $11,8 \text{ kg S ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$.

¹ Messzeit 363 Tage, linear extrapoliert auf 365 Tage.

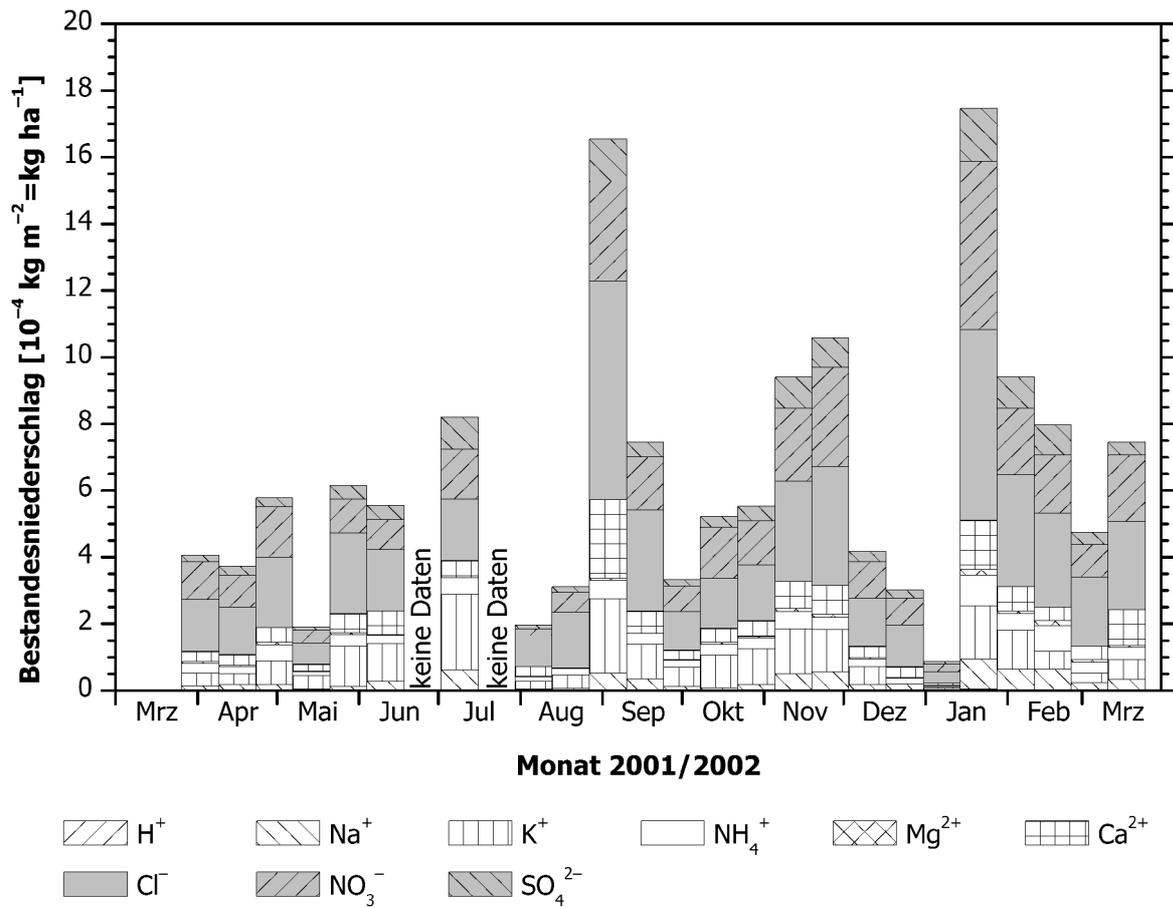


Abbildung 62: Durch den Bestandesniederschlag eingetragene anorganische Ionen während des Hauptuntersuchungszeitraums 2001/2002 im Coullissenbieb, Waldstein. Quelle: [Alewell 2003].

Tabelle 25: Summe der durch den Bestandesniederschlag eingetragenen wichtigsten anorganischen Ionen an der Station Coullissenbieb, Waldstein im Untersuchungszeitraum 2001/2002. Quelle der Rohdaten: [Alewell 2003], Daten vom 27.3.2001 bis 25.3.2002.

Ion	H^+	Na^+	K^+	NH_4^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}	Cl^-	NO_3^-	SO_4^{2-}
Deposition [kg ha^{-1}]	0,17	7,00	20,38	14,11	1,27	8,47	12,15	54,52	35,48

4 Diskussion

4.1 Charakterisierung des Messzeitraums

Eine meteorologische Charakterisierung des Messzeitraums 2001/2002 lässt sich anhand der im Kapitel 3.2 vorgestellten Daten und den klimatologischen Normalreihen des Waldstein vornehmen. In [Foken 2003b] wurden für den Standort diese Reihen aus den Messwerten seit 1994 und den langjährigen Messreihen der meteorologischen Stationen aus der Region synthetisiert.

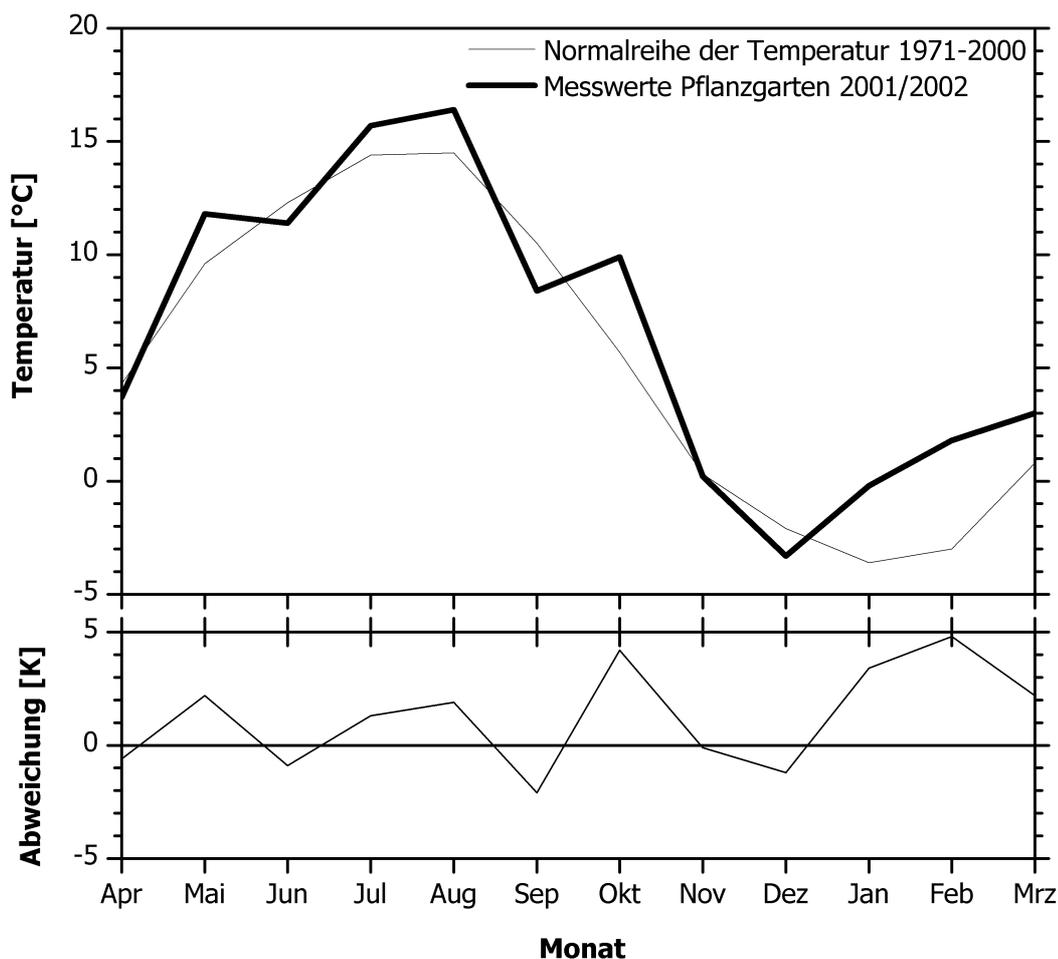


Abbildung 63: Vergleich der mittleren monatlichen Temperaturen am Waldstein für die Messphase 2001/2002 mit der Normalreihe. Oben: Verlauf der Temperaturen. Unten: Abweichung von Messzeitraum und Normalreihe. Quelle der Normalreihe: [Foken 2003b].

Beim Vergleich des Temperaturverlaufs (siehe Abbildung 63) erkennt man, dass der Messzeitraum insgesamt etwas wärmer als das langjährige Mittel war. Das langjährige Mittel liegt bei $+5,3\text{ °C}$ (1971 – 2000), die mittlere Temperatur des Aufzeichnungszeitraums $+6,6\text{ °C}$. Die Abweichung beträgt somit $+1,3\text{ K}$. Deutlich zu warm im Vergleich mit der Normalreihe waren dabei der Oktober 2001 ($+4,2\text{ K}$) sowie Januar und Februar 2002 ($+3,4\text{ K}$ bzw. $+4,8\text{ K}$). Deutliche Abweichungen nach unten gab es dagegen im September und Dezember 2001 ($-2,1\text{ K}$ bzw. $-1,2\text{ K}$). Gerade der Winter (Januar, Februar und März) ist als zu warm im Vergleich zur Norm zu bezeichnen. Während dieser Monate wich die Temperatur um $+3,5\text{ K}$ ab.

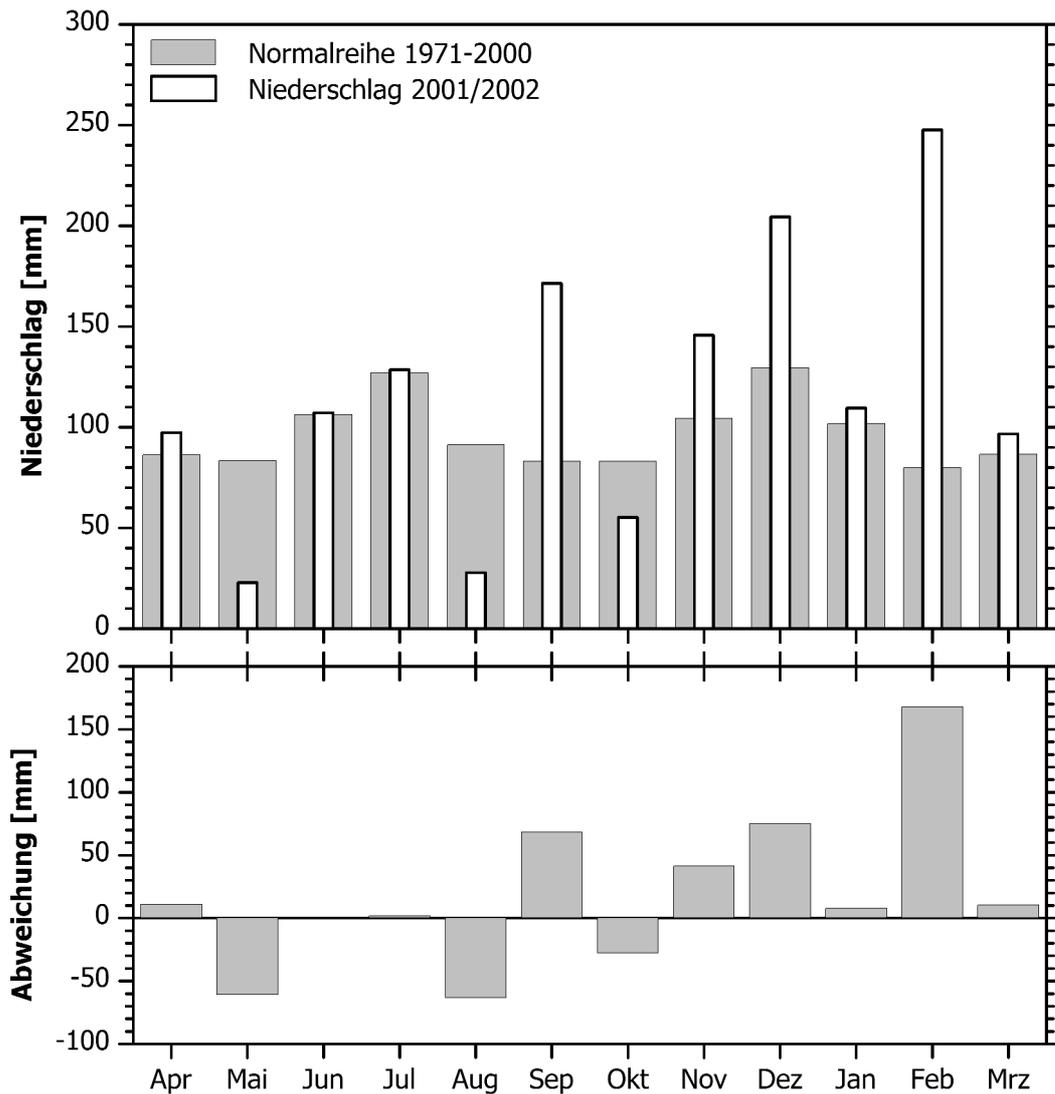


Abbildung 64: Vergleich der während der Messperiode 2001/2002 gemessenen Niederschläge mit der Normalreihe für den Waldstein. Oben: monatliche Niederschläge. Unten: Abweichung der Messwerte von der Normalreihe. Quelle der Normalreihe: [Foken 2003b].

Bei den gemessenen Niederschlägen (siehe Abbildung 64) sind die relativen Abweichungen naturgemäß deutlich größer als bei den Temperaturen. Der Frühling 2001 (April bis Juni) war eher zu trocken (18 % weniger als normal), der Sommer (Juni bis September) eher normal (+9 %) und der Herbst (Oktober bis Dezember) etwas zu feucht (+28 %). Der Winter 2002 (Januar bis März) war hingegen deutlich zu nass (69 % mehr Niederschlag als normal). Insgesamt fielen mit 1414 mm (korrigiert aus [Rebmann *et al.* 2004] etwa 22 % mehr als im langjährigen Mittel (1971 – 2000). Auch die unkorrigierten Werte sind mit 1236 mm im oberen Bereich der bisher gemessenen Werte ($\bar{\sigma}$ 1156 mm, maximal 1299 mm p. a.).

Im Kapitel 3.2.5 kann man die Messwerte der Sichtweite und die daraus abgeleitete Nebelstatistik für den kompletten Zeitraum der Aufzeichnungen am Waldstein finden. Der Hauptmesszeitraum 2001/2002 wird durch besonders häufiges Auftreten von Nebel charakterisiert. Mit 25,7 % ist für den Zeitraum April 2001 bis März 2002 ein im Vergleich mit allen bis dato gemessenen Kalenderjahren höchster Wert zu verzeichnen. Die Anzahl der Nebeltage in diesem Zeitraum liegt bei 223, die Nebelbelastung bei 9,3 Stunden. Die Nebelbelastung ist die Andauer von Nebel an Nebeltagen. Im Untersuchungszeitraum gab es während 13,0 % der Zeit dichten Nebel (mit Sichtweiten unter 200 m). Die für das Sammeln von

Nebelwasser entscheidende Sichtweite von kleiner gleich 500 m wurde während 21,6 % der Zeit unterschritten, das entspricht 72½ Tagen oder 1740 Stunden. Die prozentualen Angaben beziehen sich auf die Aufzeichnungsdauer. Zwischen 1. April 2001 und 31. März 2002 beträgt diese 92,1 % der Gesamtzeit. Der saisonale Verlauf für den Hauptmesszeitraum 2001/2002 im Vergleich mit dem Gesamtdatensatz seit Januar 1997 ist in Abbildung 65 dargestellt.

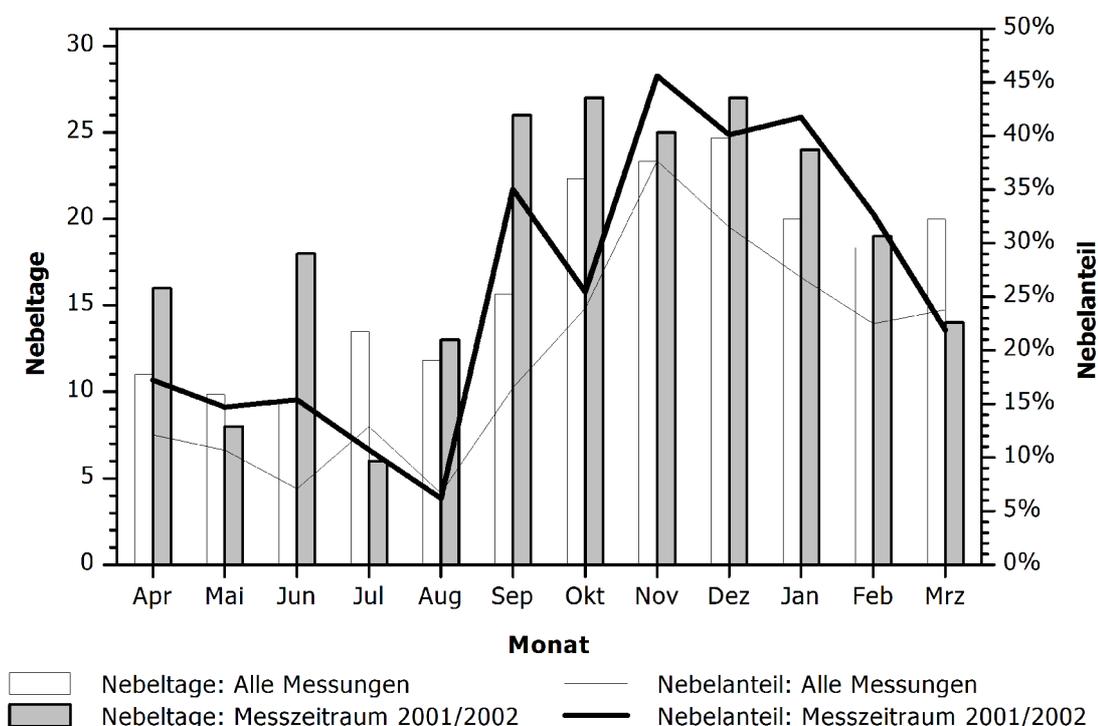


Abbildung 65: Vergleich der monatlichen Werte für die Anzahl der Nebeltage und den Nebelanteil zwischen dem Hauptuntersuchungszeitraum 2001/2002 und dem Gesamtdatensatz seit 1997 am Waldstein.

Die jahreszeitlichen Unterschiede sind bei der Nebelhäufigkeit deutlich ausgeprägt. Nebelreichster Monat ist im Mittel wie während der Hauptmessperiode der November mit 38 % bzw. 46 % Nebelanteil. Auch bei der Zahl der Nebeltage fällt das Maximum in den Herbst. Im Gesamtzeitraum seit 1997 sind im Dezember die meisten Nebeltage gemessen worden (24,7 Tage), während der Hauptuntersuchungsphase 2001/2002 waren Oktober und Dezember mit 27 Tagen Rekordhalter. Die geringste Andauer von Nebel findet sich sowohl im gesamten Datensatz als auch während der Hauptuntersuchungsphase im August (6,7 % bzw. 6,2 %). Nur bei der kleinsten Anzahl der Nebeltage gibt es einen Unterschied zwischen Gesamt- und Hauptuntersuchungszeitraum. Das langfristige Mittel liegt im Juni am niedrigsten (9,3 Tage), in 2001/2002 lag es im Juli mit 6 Tagen. Während der saisonale Verlauf für 2001/2002 also als typisch bezeichnet werden kann, liegen die absoluten Zahlen meist höher. Die Zahl der Nebeltage (223) liegt deutlich über dem langfristigen Mittel von 200 Tagen. Auch die Nebeldauer liegt 2001/2002 mit 93,3 d um ca. ein Drittel höher als sonst (70,6 d). Besonders zu diesem hohen Wert tragen die Nebelereignisse im September und von November bis Februar bei. Die saisonale Verteilung der Nebelhäufigkeit wirkt sich natürlich auf die in dieser Arbeit untersuchte feuchte Deposition aus (siehe Kapitel 4.6). Die Ursache für den ausgeprägten Jahresgang der Nebelhäufigkeit liegt im Jahresgang der Temperatur im mitteleuropäischen Klima und der damit verbundenen hohen mittleren relativen Luftfeuchte im Herbst und im Winter.

Vergleicht man die Daten für Regen (und Schnee) mit den Nebelhäufigkeiten, ist kein wirklicher Zusammenhang erkennbar. Es ist zwar über den gesamten Messzeitraum gegenüber der Normalreihe sowohl zu nass (Regen und Schnee) als auch zu feucht (Nebel), jedoch ist es in Monaten, die deutlich geringere Niederschläge aufwiesen (Mai, August, Dezember), entweder

nebeliger (Mai, Dezember) oder zumindest gleich nebelig (August). Der Juli 2001 war von geringerer Nebelhäufigkeit geprägt, wies jedoch höhere Niederschläge als im Mittel auf. Die Andauer von Nebel am Waldstein scheint also von den Niederschlagsmengen entkoppelt zu sein. Auch in den vorhergehenden Jahren wurde dies beobachtet. So war z. B. 1999 ein recht nasses Jahr, die synthetische Reihe aus [Foken 2003b] für das Fichtelgebirge berechnet 1046 mm Niederschlag (Mittel 1971-2000: 913 mm), beim Nebel waren in diesem Jahr aber nur 164 Nebeltage und knapp 16 % Nebelanteil zu verzeichnen. Die Mittelwerte seit Beginn der Aufzeichnung liegen bei 200 Nebeltage bzw. knapp 20 % Nebelanteil. Im Jahr 2000 lag der Niederschlag bei nur 876 mm, die Zahl der Nebeltage aber bei 223 und der Nebelanteil bei 19 %. Bei dieser Diskussion ist aber darauf zu achten, dass für den Nebel Statistiken erst für insgesamt sechs Jahre vorliegen und üblicherweise bei klimatologischen Vergleichen 30-Jahre-Statistiken herangezogen werden. Auch ist der Umbau des Messgerätes im August 2000 nicht unproblematisch. Der horizontale Abstand der beiden Messpunkte ist dabei weniger entscheidend, als der vertikale Versatz, der bei immerhin ca. 40 m liegt. Inwiefern diese sechs Jahre bereits repräsentativ für den Waldstein sind, müssen die weiteren Messungen zeigen.

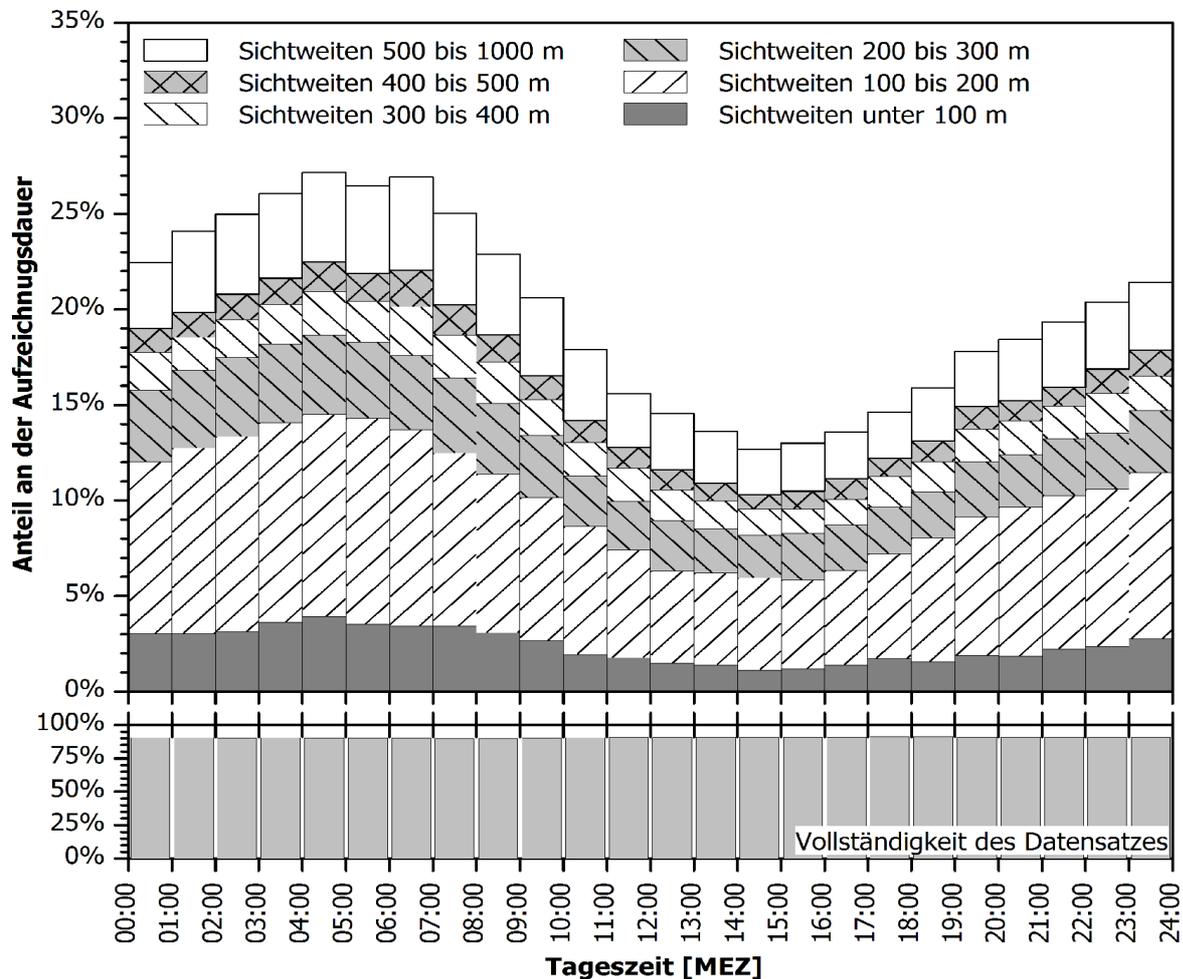


Abbildung 66: Tagesgang der Sichtweitenverteilung am Waldstein. Datengrundlage: Sichtweitemessungen 1997 bis 2002. Quelle: BITÖK-Datenbank.

Ursächlich für den zu beobachteten Tagesgang der Nebelhäufigkeit (siehe Abbildung 66) ist ebenfalls die Temperatur und ihr Tagesgang mit den entsprechenden hohen relativen Luftfeuchten um Sonnenaufgang und niedrigen Werten am Nachmittag. Das Maximum der Nebelhäufigkeit liegt am Waldstein zwischen 4 und 5 Uhr MEZ, das Minimum zwischen 14 und 15 Uhr MEZ. Der Tagesgang ist bei allen „Dichteklassen“ des Nebels ausgeprägt.

4.2 Messung von Flüssigwassergehalt und Nebelwasserfluss

Die Messung des Nebelwasserflusses am Waldstein über ein Jahr war das Hauptziel der vorliegenden Arbeit. Generell muss konstatiert werden, dass die große Menge an Datensätzen¹ eine exakte Auswertung nahezu unmöglich macht. Die teilweise gebotene direkte Betrachtung der Originaldaten ist verständlicherweise nur punktuell leistbar. Auch ist die allgemeine Diskussion über vorzunehmende Korrekturen an den Datensätzen noch sehr dynamisch (siehe z. B. [Finnigan *et al.* 2003]). Einen wirklichen Königsweg für die Auswertung gibt es noch nicht. Viele aktuelle Projekte beschäftigen sich mit den Korrekturverfahren, die z. B. für den Waldstein einen solchen Standard schaffen könnten (z. B. CARBOEUROFLUX [Rebmann *et al.* 2004]). Das bedeutet aber auch, dass die hier vorgestellten Daten in zukünftigen Untersuchungen noch nachkorrigiert werden könnten und sich die Flussdaten entsprechend verändern.

Die eingesetzten Geräte waren das Tropfenspektrometer FM-100 und das Ultraschallanemometer Young 81000. Das Ultraschallanemometer lieferte aufgrund eines Firmware-Fehlers am Anfang der Messungen (bis zum 17.4.2001) teilweise falsche Daten. Es wurde darauf verzichtet eine eventuell mögliche nachträgliche Korrektur dieser Datensätze durchzuführen, da noch genügend Daten für eine Berechnung der Jahresdeposition übrig waren. Der eingesetzte Typ eines Ultraschallanemometers wurde in der Vergangenheit häufiger ob seines im Vergleich mit anderen Typen sehr dicken Gerätefußes kritisiert. [Mauder 2002] konnte bei seinen Gerätevergleichen im Windkanal und mit älteren Messungen feststellen, dass das Gerät wahrscheinlich interne, leider nicht offen gelegte Korrekturen an den Rohdaten vornimmt und die durch das Design bedingten Fehler von σ_w oder u_* in den ausgegebenen Daten nur noch gering sind². Das bedeutet, dass Messungen des vertikalen Flusses mit diesem Gerät wohl unproblematisch sind.

Für das eingesetzte Tropfenspektrometer FM-100 waren die Messungen im Sommer und Herbst 2000 [Burkard *et al.* 2002] die ersten Feldeinsätze. Das in dieser Arbeit eingesetzte Gerät mit der Seriennummer 2 und das Gerät der Universität Bern (Seriennummer 1) sind die ersten beiden ausgelieferten Geräte des Typs. Trotz der oft zu erwartenden und teilweise auch eingetretenen Probleme mit Geräten einer solchen „Nullserie“ konnten die Messungen während der beiden Experimente nahezu durchgehend realisiert werden. Beim Gerätevergleich in [Burkard *et al.* 2002] wurde eine gute Übereinstimmung für beide Geräte gefunden. Es gab eine gute Übereinstimmung bei Massengrößenspektren und Nebelwasserflüssen beim Vergleich auf dem Weidenbrunnen-Messturm in einer Höhe von 32 m. In dieser Studie konnte auch durch Vergleich der Kospektren nach [Kaimal *et al.* 1972] untereinander und mit dem theoretischen Spektrum gezeigt werden, dass die zeitliche Auflösung der Tropfenspektrenmessung bei mindestens 6 Hz liegt. Technische Probleme traten beim FM-100 bereits während des Vergleichsexperiments im Jahr 2000 auf. Die Analog-Digital-Wandler-Platine wies einen Defekt auf, der im Wesentlichen zum Verlust der Information der Durchflussgeschwindigkeit führte. Für die Zeiten, als diese Messung noch funktionierte, waren die Schwankungen jedoch sehr gering. So sollte die Substitution der fehlerhaften Werte mit dem Mittelwert der erfolgreichen Messungen keinen spürbaren Einfluss auf die Gesamtmessung haben³.

Die Flüssigwassergehalte wurden direkt aus den FM-100-Daten berechnet. Vergleichswerte für Messungen in verschiedenen Regionen der Erde finden sich in Tabelle 26.

¹ 2001/2002: ca. 100 Mio. Datensätze mit je drei Windgeschwindigkeiten, Schalltemperatur und 40 Tropfengrößenzahlen. Die binären Originaldateien umfassen ca. 22 GB an Daten.

² σ_w^2 wird sogar überschätzt: Abweichung +5,6 %, R^2 lag bei 0,988; u_* : -0,6 %, $R^2=0,883$

³ Der Fehler geht linear in die LWC-Messung ein.

Tabelle 26: Vergleichswerte für den Flüssigwassergehalt der Luft [mg m^{-3}] während Nebelereignissen weltweit. Angegeben sind Minimum (Min), Maximum (Max) und Mittelwert oder Median (Mittel) je nach Angabe in der zitierten Arbeit.

Min	LWC		Zeit	Ort (Höhe)	Messgerät	Quelle
	Max	Mittel				
10	100	47	1991	Sonnblick (3106 m), Österreich	?	Kasper <i>et al.</i> 1998
50	630	350	1992	Sonnblick (3106 m)	?	Kasper <i>et al.</i> 1998
80	782	280	1993	Sonnblick (3106 m)	?	Kasper <i>et al.</i> 1998
		340-700	1994-96	Whiteface Mt. (1483 m), New York	PVM-100	Anderson <i>et al.</i> 1999
		150-320	1994-96	Whitetop Mt. (1686 m), Virginia	PVM-100	Anderson <i>et al.</i> 1999
		110	1993	Mt. Mitchell (2038 m), North Carolina	FSSP	DeFelice 2002
40	1608	128	1998	Strengbach (1146 m), Frankreich	PVM-100	Herckes <i>et al.</i> 2002
		143,5	2001-02	Lägeren (690 m), Schweiz	FM-100	Burkard <i>et al.</i> 2003
		61,2	2000	Kerzersmoos (435), Schweiz	FM-100	Thalmann <i>et al.</i> 2002
		65,9	2000	Waldstein (800 m)	FM-100	Thalmann <i>et al.</i> 2002
27	150		1997-99	Davis, California	PVM-100	Zhang & Anastasio 2001
0	2639	155,9	2001-02	Waldstein	FM-100	diese Arbeit

Die Flüssigwassergehalte am Waldstein bewegen sich im Rahmen der Messungen an anderen Standorten. Leider sind für vergleichbare Stationen in Deutschland noch keine aktuellen Daten für den LWC zu erhalten, somit ist ein Vergleich nicht möglich. Die Station Aubure/Strengbach in den Vogesen [Herckes *et al.* 2002] ist aber eine Station, die ähnliche Werte wie der Waldstein liefert. Sie ist eine Mittelgebirgsstation und hat ein ähnliches Nebelregime (advective Nebel) wie das Fichtelgebirge. Für den absoluten Vergleich der Messungen des FM-100 mit bereits etablierten Geräten (siehe Abbildung 67) fand [Burkard 2003] eine gute Übereinstimmung mit einem Gerber PVM-100 [Gerber *et al.* 1999]. Eine durchgeführte Vergleichsmessung am Waldstein (Herbst und Winter 2001/2002) scheiterte leider an einem defekten Spannungsteiler, welcher die Daten verfälschte.

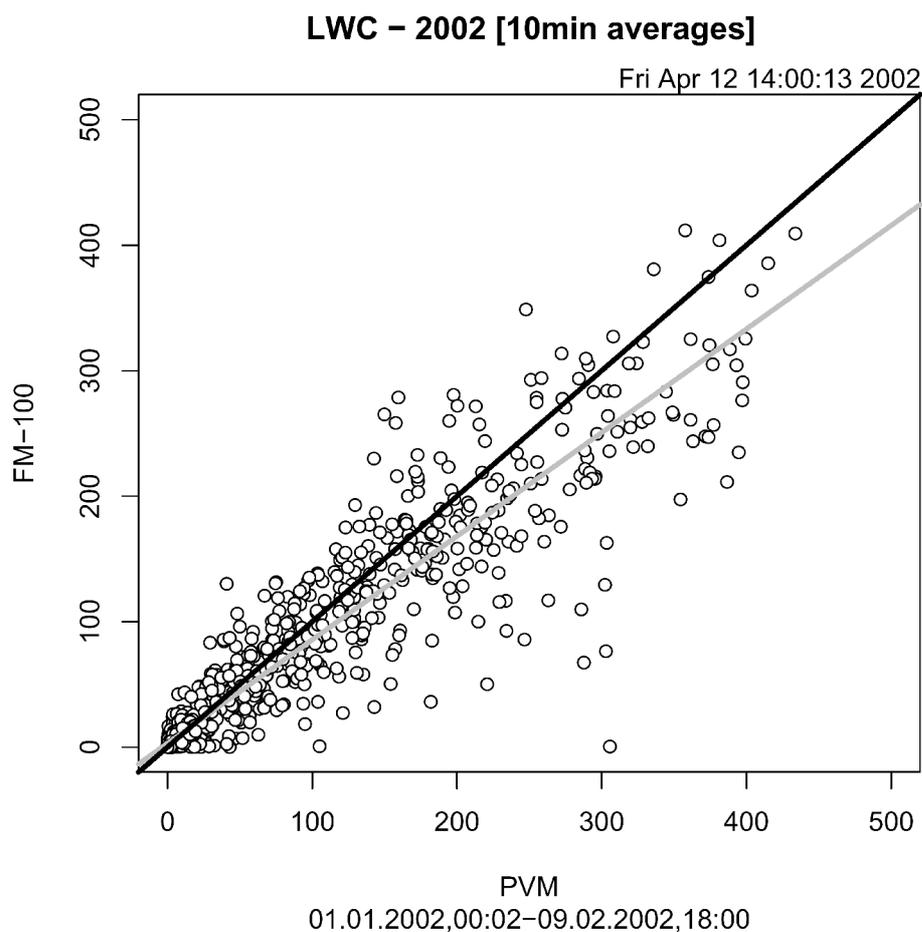


Abbildung 67: Vergleich zwischen PVM100 und FM-100 von gemessenen Flüssigwassergehalten an der Station Lägeren [Burkard et al. 2003] in der Schweiz. Die schwarze Linie ist die 1-zu-1-Linie, die graue ein Fit. Quelle der Grafik: [Burkard 2003].

Für die Messung des turbulenten Flusses ist auch die Schichtung der Atmosphäre zu untersuchen. In Abbildung 68 ist als Kenngröße für die Stabilität der bodennahen Atmosphäre der Stabilitätsparameter ζ dargestellt.

Zum Vergleich der gemessenen Stabilität während der Nebelereignisse und insgesamt lassen sich die Werte aus [Mangold 1999] heranziehen. Für den Zeitraum vom 6.7.1998 bis zum 10.8.1998 war die Atmosphäre in ca. 38 % der Zeit labil geschichtet, in ca. 28 % der Zeit neutral geschichtet und in ca. 34 % der Zeit stabil geschichtet. Als Grenze für die einzelnen Bereiche wurde hier $\zeta = \pm 0,032$ verwendet. Für äquivalente sommerliche Nebelbedingungen (Juli und August 2001) sind die berechneten Schichtungen bei diesen Grenzen wie folgt verteilt: 14,1 % der Zeit labile Schichtung, 74,2 % der Zeit neutrale Schichtung und 11,7 % stabile Schichtung. Es treten also anteilig deutlich mehr neutrale Schichtungen während Nebels auf als insgesamt. Da während Nebels die Einstrahlung durch die Trübung der Atmosphäre deutlich eingeschränkt ist, ist eine Erwärmung des Bodens und die daraus entstehende labile Schichtung tagsüber deutlich eingeschränkt. Aufgrund der Trübung ist auf der anderen Seite auch die Ausstrahlung nachts limitiert, sodass die Ausbildung einer stabilen Schichtung deutlich länger braucht. Außerdem spricht die veränderte Verteilung der Stabilität gegen das Vorhandensein von Strahlungsnebeln am Waldstein, da dieser natürlich nur bei starken, vor allem nächtlichen Ausstrahlungen vom Boden auftritt, die mit deutlich stabilen Schichtungen verbunden sind. Für einen ausführlicheren Vergleich müssen die Daten (Nebel und „Nicht-Nebel“) für ein komplettes Jahr betrachtet werden. Diese Daten werden im Zuge laufender Projekte ausgewertet und sind daher noch nicht verfügbar. Die Verteilung der Schichtungen bei Nebel ist sehr ähnlich den Sommerwerten.

Für die Charakterisierung der Turbulenz wird meist die Schubspannungsgeschwindigkeit als Parameter herangezogen. Als Gütemaß für eine ausreichend turbulent gemischte Atmosphäre wurde ein Grenzwert festgelegt. Es reicht ein Wert von $w_* \geq 0,1$. Betrachtet man in Abbildung 69 die Verteilung der gemessenen Schubspannungsgeschwindigkeiten, so erkennt man, dass während 1,6 % der Messungen die Atmosphäre als nicht ausreichend turbulent durchmischte gilt. Der bereits in Kapitel 3.5.1 festgestellte Einfluss auf die Gesamtdeposition ist mit $-0,07$ mm marginal. Ein strengerer Grenzwert von 0,3 würde eine Änderung von $-3,2$ mm bewirken.

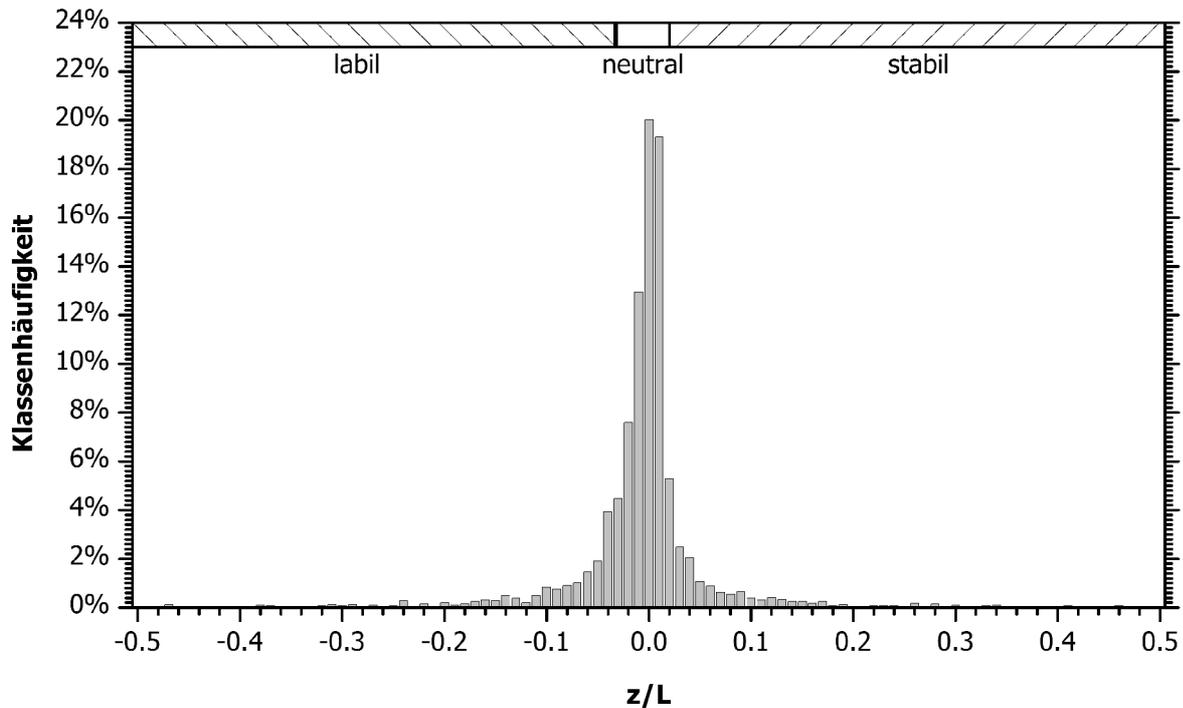


Abbildung 68: Verteilung der gemessenen Stabilitätsparameter $\zeta = z/L$ (Stabilitätsparameter) für alle gemessenen 30-min-Werte. Labile Schichtungen ($\zeta \leq -0,03$) machen ca. 22 %, neutrale Schichtungen ca. 65 % und stabile Schichtungen ($\zeta \geq +0,02$) ca. 13 % aller betrachteten Fälle aus.

Der turbulente und der sedimentative Fluss kann auch als Produkt aus Konzentration und der Depositionsgeschwindigkeit v_d formuliert werden. Im vorliegenden Fall bedeutet dies, dass sich der Fluss nach Formel (22) berechnet.

$$D = v_d \cdot LWC \quad (22)$$

In Abbildung 70 ist der gemessene Fluss als Funktion des Flüssigwassergehaltes aufgetragen. Dabei wird Sedimentation, turbulenter Fluss und Gesamtfluss unterschieden.

Der Quotient aus LWC und D ist nach (22) gleich der Depositionsgeschwindigkeit. Diese lässt sich für die Sedimentation über das Stokes'sche Gesetz (siehe Kapitel 2.2.3.1) berechnen. Es muss dabei nur nach Größenklassen unterschieden werden und damit der Flüssigwassergehalt für die verschiedenen Größenklassen bekannt sein. Beim turbulenten Fluss hingegen gibt es für die Depositionsgeschwindigkeit keine allgemein gültige Parametrisierung. Bei konstantem v_d müsste der Zusammenhang zwischen Konzentration (LWC) und Fluss linear sein. In Abbildung 70 erkennt man aber eine deutliche Streuung der Werte sowohl bei der Sedimentation als auch beim turbulenten Fluss. Für die Sedimentation ist die Streuung geringer als für den turbulenten Fluss. Die Sedimentationsgeschwindigkeiten steigen mit dem LWC auch an, was sich mit dem größeren mittleren Durchmesser der Tropfen bei höheren Flüssigwassergehalten (siehe Abbildung 28) erklären lässt. In Abbildung 70 lässt außerdem sich erkennen, dass für den turbulenten Fluss bei hohen Konzentrationen im Mittel höhere Flüsse zu erwarten sind. Ein statistisch signifikanter

Zusammenhang konnte jedoch nicht ermittelt werden. In Abbildung 71 ist der Faktor zwischen turbulentem Fluss und Flüssigwassergehalt, die turbulente Depositionsgeschwindigkeit, dargestellt. Die häufigste Depositionsgeschwindigkeit ist 4 cm s^{-1} und der Median liegt bei 7 cm s^{-1} . Zur Möglichkeit einer Parametrisierung der Depositionsgeschwindigkeit oder des Nebelwasserflusses für den Waldstein ist auf Kapitel 4.6 zu verweisen.

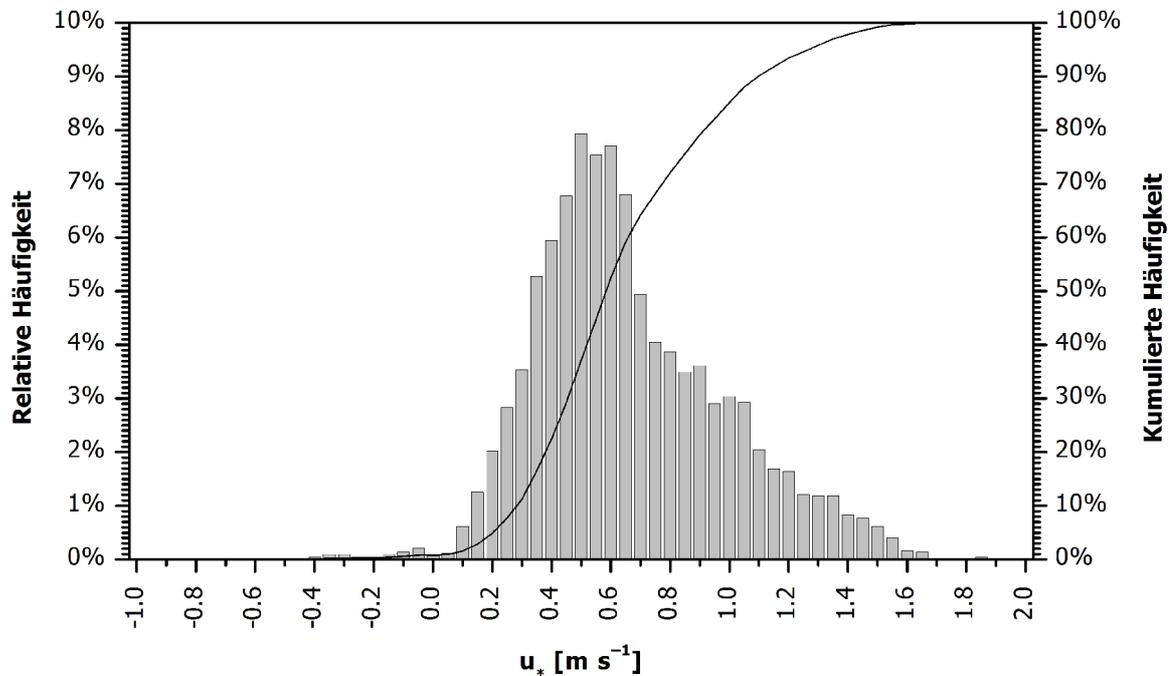


Abbildung 69: Verteilung der gemessenen Schubspannungsgeschwindigkeiten u_* am Waldstein während Nebelereignissen im Hauptuntersuchungszeitraum 2001/2002. Säulen: relative Klassenhäufigkeit, Linie: Kumulierte Häufigkeit. Zu den negativen u_* siehe Kapitel 2.2.3.1

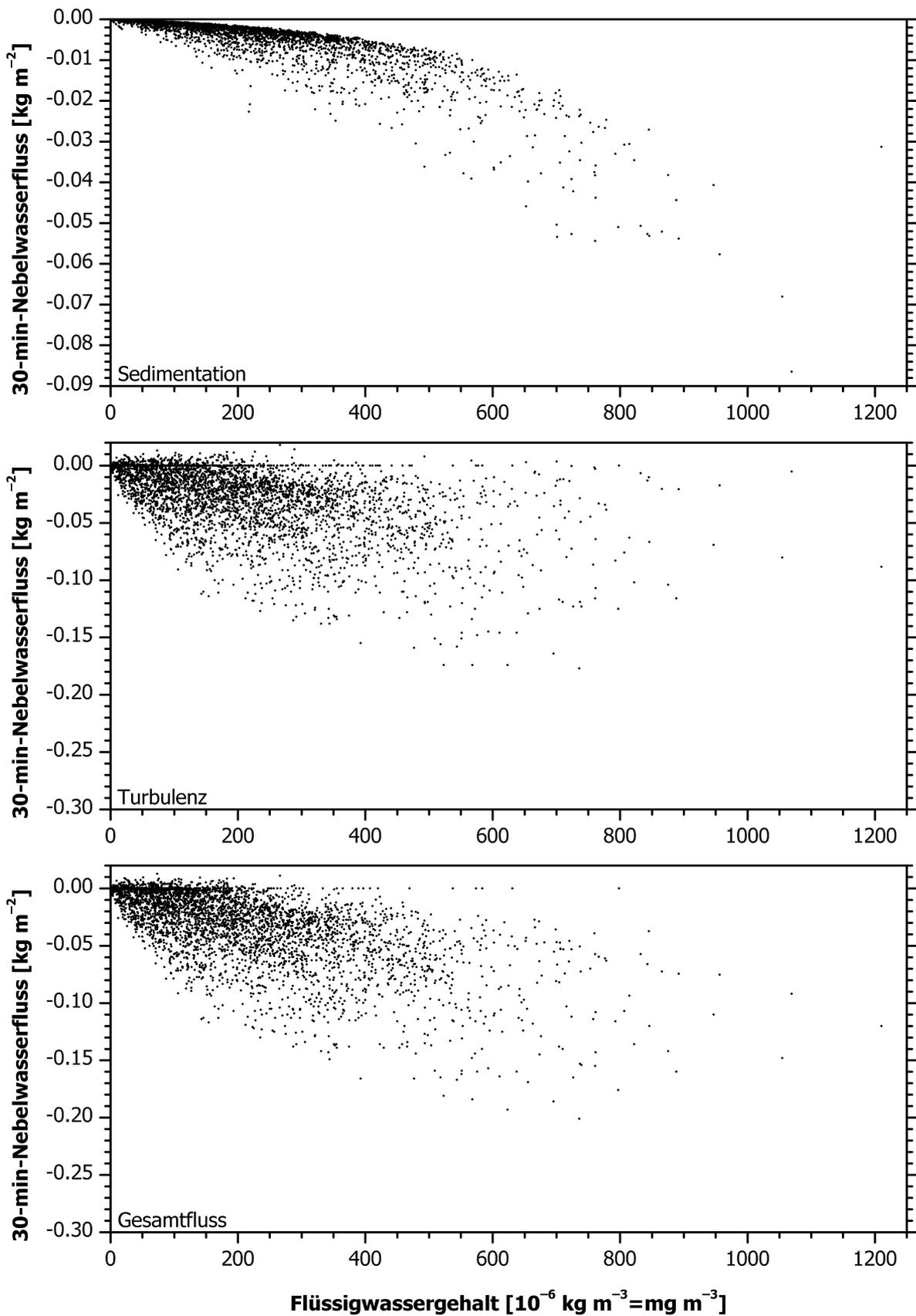


Abbildung 70: Abhängigkeit der Nebelwasserflüsse vom Flüssigwassergehalt. Oben: Sedimentativer Fluss, Mitte: Turbulenter Fluss, Unten: Gesamtfluss.

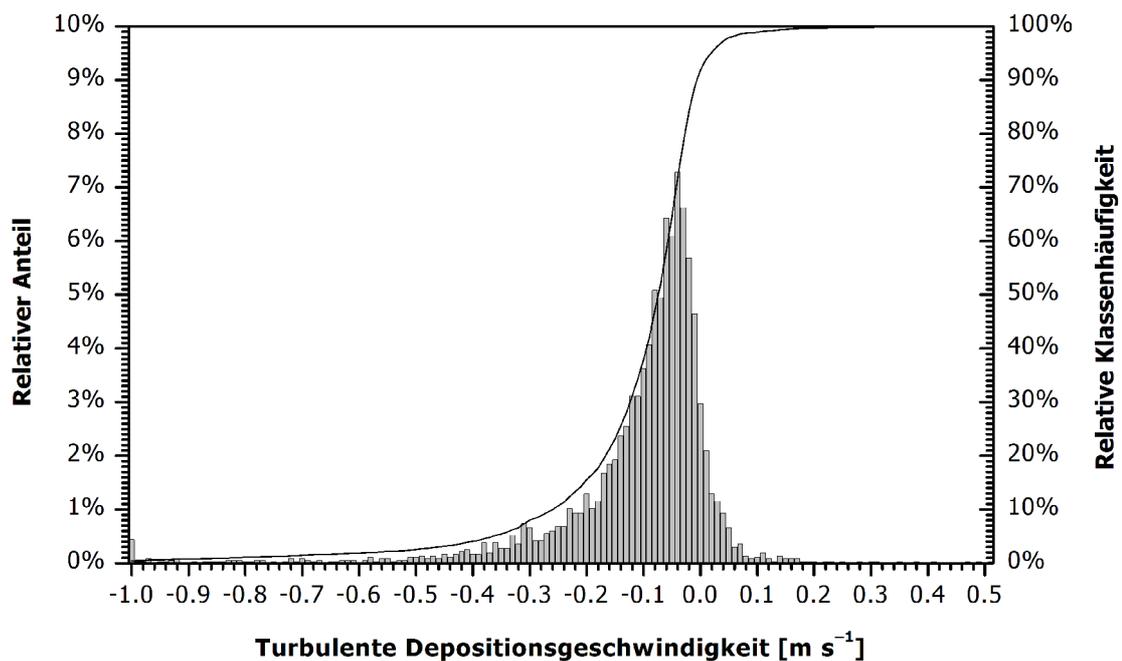


Abbildung 71: Verteilung der Depositionsgeschwindigkeiten für den turbulenten Fluss während des Hauptuntersuchungszeitraums am Waldstein. Säulen: Relative Klassenhäufigkeit, Linie: Kumulierte Häufigkeit.

4.3 Die Nebelwasser-Sammelergebnisse

Berechnet man Ereignis basiert den Flüssigwassergehalt aus den Sammelmengen, Sammelzeiten und theoretischen Sammeleigenschaften des Nebelsammlers BCC und vergleicht den LWC mit dem mittleren gemessenen, so erhält man den in Abbildung 72 dargestellten Zusammenhang. Der Median des Verhältnisses von Flüssigwassergehalt per FM-100 gemessen zum Flüssigwassergehalt per BCC bestimmt liegt bei 4,9. Der Flüssigwassergehalt wird also mit dem BCC unterschätzt oder vom FM-100 zu hoch gemessen. Mögliche Ursache dafür ist der

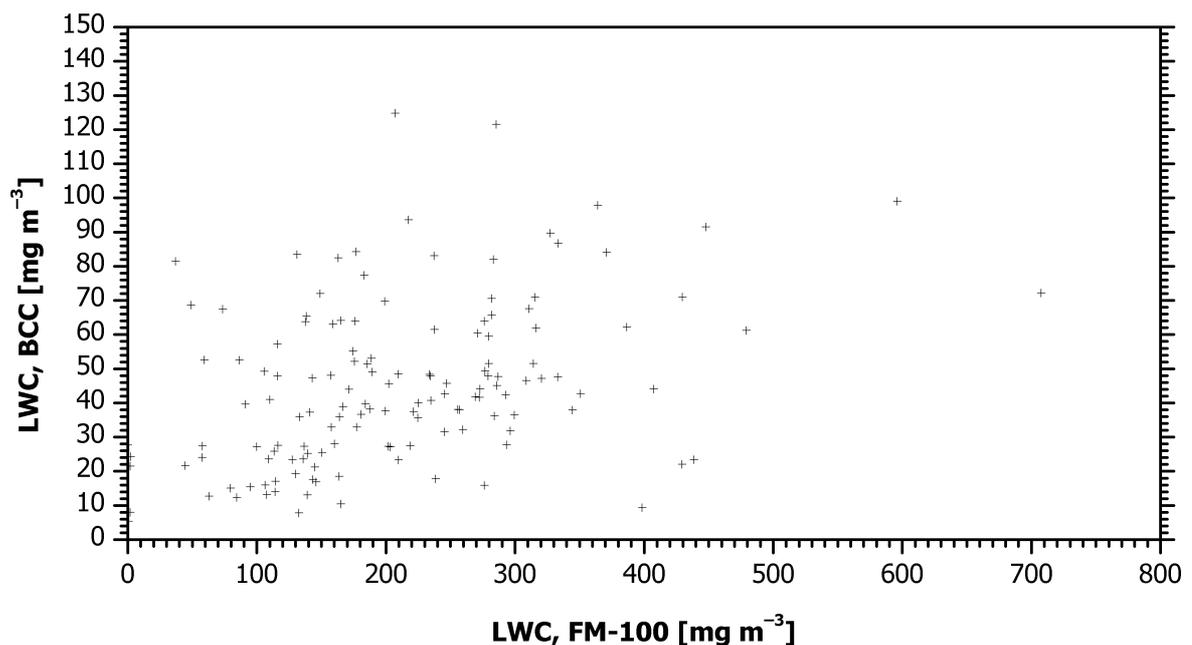


Abbildung 72: Vergleich der Flüssigwassergehalte, berechnet aus den Sammeldaten des Nebelsammlers BCC und aus den Tropfenspektren des FM-100 (Basis: 30-min-Werte).

verwendete Regenschutz, der den Luftdurchfluss im BCC herabsetzt und damit die Sammelmenge verringert.

4.4 Nebelwasser-Chemie

Die Bestimmung der chemischen Zusammensetzung des Nebelwassers erlaubt eine Bewertung der ökosystemaren Auswirkungen von Nebel. Mittlerweile gibt es eine große Anzahl von Untersuchungen weltweit zur chemischen Zusammensetzung von Nebelwasser. Die Messungen am Waldstein sollten vor allem zur Untersuchung der Auswirkungen auf den Wald in dieser Region dienen. In anderen Regionen der Erde steht bei diesen Untersuchungen die Nutzung des gewonnenen Nebelwassers als Trinkwasserquelle im Vordergrund (z. B. [Olivier 2002],). Ein Merkmal ist bis dato fast allen vorliegenden Messungen gemein: ein flächendeckendes und langfristiges Messen der chemischen Bestandteile des Nebelwassers gibt es nicht. Die Messungen sind meist punktuell und zeitlich begrenzt. Für den Oberfranken existieren bereits seit Anfang der 1980er Jahre Messungen. Beginnend mit den Untersuchungen von [Klemm 1983] und [Schrimpp *et al.* 1984] im Frankenwald gab es während der 1980er Jahre weitere Untersuchungen im Fichtelgebirge von [Verhoeven *et al.* 1987], [Trautner 1988], [Herterich & Paffrath 1988] und [Trautner *et al.* 1992]. Seit 1997 gab es mit den Arbeiten von [Wrzesinsky 1998], [Wrzesinsky & Klemm 2000], [Römpp 1999], [Römpp *et al.* 2001], [Hottenroth 2001], [Hottenroth *et al.* 2001], [Thalmann 2001], [Thalmann *et al.* 2002] und [Grießbaum 2002] sowie der vorliegenden Arbeit ein nahezu kontinuierliche Untersuchung der Nebelwasserchemie am Waldstein. [Klemm 2001] diskutierte mögliche Änderungen der Nebelwasserchemie seit Beginn der genannten Messungen.

Für die Einordnung der Messwerte sind in Abbildung 73 einige ausgewählte Ergebnisse der Untersuchung von Nebelwasser aus der Literatur mit den Werten dieser Arbeit verglichen. Der Bereich chemischer Variätät, der durch die aufgeführten Studien aufgespannt wird, umfasst verschiedene luftchemische Regimes weltweit. Die Messungen in Craigieburn (Neuseeland) sind durch geringe anthropogene Luftbelastung und starken marinen Einfluss geprägt. Die Konzentrationen an diesem Ort sind insgesamt sehr niedrig im Vergleich zu anderen Stationen. Die marine Prägung ist gut an den beiden Hauptionen Natrium Na^+ und Chlorid Cl^- und den hohen pH-Werten (6,1) zu erkennen. Ähnlich gering belastet ist auch das Nebelwasser an der Station Yuangyang Lake (Taiwan). Hier ist der marine Einfluss aber deutlich geringer, der pH-Wert liegt bei ca. 4,3, die Anteile der meeresbürtigen Ionen Na^+ und Cl^- ist nicht so hoch. Die meisten anderen Stationen sind in ihrer mittleren chemischen Zusammensetzung des Nebelwassers recht ähnlich. Als Kation dominiert Ammonium NH_4^+ , die wichtigsten Anionen sind Nitrat NO_3^- und Sulfat SO_4^{2-} . Außerdem sind pH-Werte um 4 typisch. Diese Stationen liegen alle in mehr oder weniger industrialisierten Gebieten und sind meist wenig marin beeinflusst. Zu diesem Typ Stationen zählt auch der Waldstein, was mit den Messungen 1997 und denen aus der vorliegenden Arbeit gut zu zeigen ist. Die Stationen Tshanowa und Lepelfontein (beide Südafrika) sind hingegen bei pH-Werten von 5,9 bzw. 7,2 wiederum durch hohe Konzentrationen von Na^+ und Cl^- geprägt. Sie sind beide relativ küstennah. Bei beiden Orten handelt es sich um potentielle „fog harvesting sites“ [Olivier & de Rautenbach 2002]. An solchen Orten sind hohe Konzentrationen natürlich problematisch. Gerade das Nebelwasser Lepelfontein ist mit seinen hohen absoluten Konzentrationen nicht als Trinkwasser geeignet. Die absoluten Konzentrationen zwischen den Stationen variieren stark. Bei den vorgestellten Werten handelt es sich größtenteils bereits um gemittelte Werte. Trotzdem liegt der Quotient zwischen niedrigen und hohen Konzentrationen bei über 20. Das lässt sich bei den „industriellen“ Klasse auf den unterschiedlichen Grad der Industrialisierung, der Emissionskontrolle und andere Faktoren zurückführen ([Fuzzi *et al.* 1996], [Collett *et al.* 2002]). Einen wirklichen Vergleich zur Identifizierung lokaler Ursachen kann man aber nur bei Betrachtung der nebelgebundenen Belastung der Luft, die den Flüssigwassergehalt berücksichtigt, durchführen. Leider gibt es für diese Daten nur wenige Veröffentlichungen bisher.

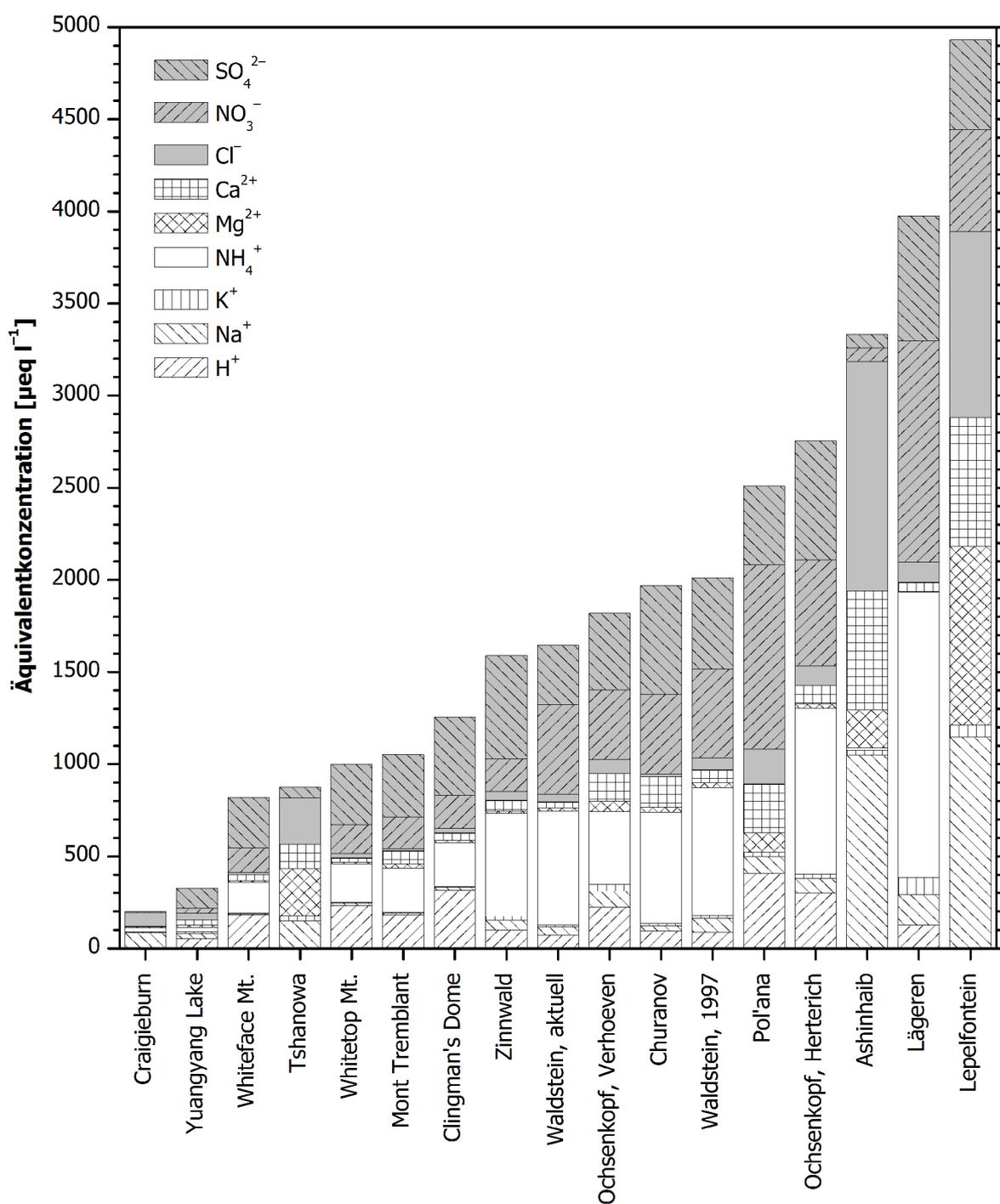


Abbildung 73: Vergleich der mittleren chemischen Zusammensetzung des Nebelwassers am Waldstein mit Literaturwerten, geordnet nach der Gesamtäquivalentkonzentration. Siehe auch Tabelle 27.

Tabelle 27: Lage, Messzeitraum und Quelle der in Abbildung 74 angegebenen Nebelmessstationen.

Ort	Höhe	Zeit	Quelle
Craigieburn (Neuseeland)	1600 m	~1985	[Verhoeven <i>et al.</i> 1987]
Yuanyang Lake (Taiwan)	ca. 2000 m	2000	[Chang <i>et al.</i> 2002]
Whiteface Mt. (New York, USA)	1483 m	1998	[Anderson <i>et al.</i> 1999]
Tshanowa (Northern Transvaal, Südafrika)	1004 m	2001	[Olivier & de Rautenbach 2002]
Whitetop Mt. (Virginia, USA)	1686 m	1998	[Anderson <i>et al.</i> 1999]
Mont Tremblant (Québec, Kanada)	860 m	1993	[Schemenauer <i>et al.</i> 1995]
Clingman's Dome (North Carolina, USA)	2014 m	1998	[Anderson <i>et al.</i> 1999]
Zinnwald (Erzgebirge)	877 m	1997- 1998	[Zimmermann & Zimmermann 2002]
Waldstein, aktuell	800 m	2000- 2002	diese Arbeit
Ochsenkopf, Verhoeven (Fichtelgebirge)	1000 m	~1985	[Verhoeven <i>et al.</i> 1987]
Chuřánov (Šumava, Tschechien)	1123 m	1989- 1994	[Tesař <i>et al.</i> 1995]
Waldstein, 1997	800 m	1997	[Wrzesinsky & Klemm 2000]
Pol'ana (Slowakei)	850 m	1994	[Mind'áš & Škvarenina 1995]
Ochsenkopf, Herterich (Fichtelgebirge)	1000 m	~1985	[Herterich 1987]
Ashinhaib (Oman)	900 m	~1990	[Schemenauer & Cereceda 1992]
Lägeren (Kanton Zürich)	690 m	2001	[Burkard <i>et al.</i> 2003]
Lepelfontein (Kapprovinz, Südafrika)	100 m	2001	[Olivier & de Rautenbach 2002]

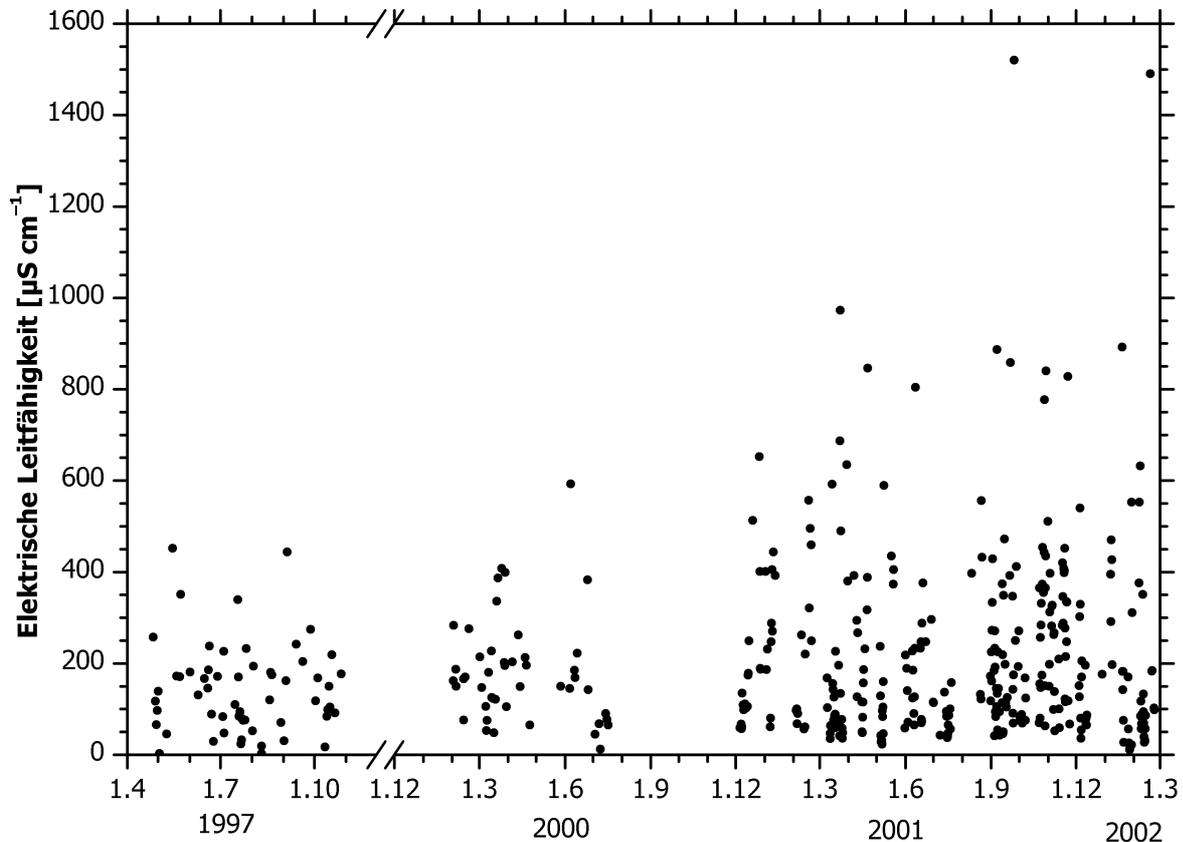


Abbildung 74: Die gemessenen Leitfähigkeiten während der Feldexperimente 1997 [Wrzesinsky 1998] und 2000 bis 2002.

Während der Messperioden am Waldstein von 2000 bis 2002 waren die Nebelereignisse (siehe Abbildungen 47 bis 55) von hoher Variabilität der chemischen Zusammensetzung geprägt. Der Interquartilsabstand¹ beträgt für die gemessenen elektrischen Leitfähigkeiten $217 \mu\text{S cm}^{-1}$ bei einem Median von $168 \mu\text{S cm}^{-1}$. Bei den Messungen am Waldstein 1997 von [Wrzesinsky & Klemm 2000] lag der Median noch bei $139 \mu\text{S cm}^{-1}$ und der Interquartilsabstand lag bei $100 \mu\text{S cm}^{-1}$. Betrachtet man bei den neueren Messungen nur den Zeitraum April bis Oktober, der der Messung 1997 zu Grunde lag, so liegen die Werte 2000 bei einem Median von $212 \mu\text{S cm}^{-1}$ und 2001 bei einem Median von $155 \mu\text{S cm}^{-1}$ und die Differenzen zwischen oberem und unterem Quartil bei 174 bzw. $210 \mu\text{S cm}^{-1}$. Die Variabilität lag also, unter Ausschluss eventueller saisonaler Einflüsse, im Zeitraum 2000 bis 2002 deutlich höher als noch 1997. Dies verdeutlicht auch die Abbildung 74, in der alle gemessenen elektrischen Leitfähigkeiten der beiden Messzeiträume dargestellt sind. Bei den Messungen 1997 war im Gegensatz zu den neueren Messungen die zeitliche Auflösung der Nebelbeprobungen geringer. Es wurde nur nach kompletten Nebelereignissen unterschieden. Die Variation innerhalb von Nebelereignissen ist so nicht ermittelbar. Bei den Messungen 2000 bis 2002 wurde aber ab Ende 2000 ein automatisches Probensammelsystem eingesetzt (siehe Kapitel 2.2.2.4). Bei einer zeitlichen Auflösung von acht Stunden ist so auch eine eingeschränkte Erfassung dieser Variation möglich. Weitere Faktoren, die jedoch teilweise wegen fehlender Messgrößen nicht untersucht werden konnten, sind verschiedene Flüssigwassergehalte und die möglichen Unterschiede in der Herkunft der Luftmassen.

Während bei der medianen Zusammensetzung die meisten Ionen gegenüber [Wrzesinsky 1998] fast unverändert blieben, fällt ein Rückgang des Sulfats SO_4^{2-} auf. Dessen Anteil sinkt von 28 % auf 19 %, auch absolut sinkt der Gehalt um ca. 24 %. Die beiden anderen Hauptionen Ammonium NH_4^+ und Nitrat NO_3^- steigen dagegen um 15 % bzw. 24 %. Mögliche Ursache für diese Entwicklung könnte der Rückgang der Emission der Vorgängersubstanz Schwefeldioxid SO_2 sein (siehe [Klemm & Lange 1999]). Generell scheint sich aber die Verbesserung der lufthygienischen Situation nach [Klemm & Lange 1999] in den letzten Jahren nicht fortzusetzen bzw. sich nicht weiter auf die Nebelwasserkonzentrationen auszuwirken.

Dies erkennt man auch bei der Betrachtung von älteren Daten aus der Region (siehe Tabelle 28). Dem deutlichen Rückgang zwischen den 1980er Jahren und 1997 folgt keine weitere Verringerung der Konzentrationen bis 2000.

Der Vergleich der mittleren chemischen Zusammensetzung von Nebel- und Regenwasser am Waldstein (Tabelle 29). Die bereits in vorangegangenen Arbeiten gefundenen deutlich höheren Konzentrationen im Nebelwasser sind also auch während dieser Messungen evident. Vor allem die wichtigsten Ionen Ammonium NH_4^+ , Nitrat NO_3^- und Sulfat SO_4^{2-} sind mit Anreicherungen von 18, 13 bzw. 11,5 bedeutsam.

¹ Die Messwerte sind laut Test nach [Shapiro & Wilk 1965] nicht normalverteilt (Signifikanzniveau 0,05).

Tabelle 28: Statistische Kenngrößen gemessener chemischer Zusammensetzungen von Nebelwasser im Fichtelgebirge und im Frankenwald im Verlauf der letzten 20 Jahre und die Vergleichswerte aus der vorliegenden Arbeit. Dargestellt sind elektrische Leitfähigkeit λ [$\mu\text{S cm}^{-1}$], pH-Wert und die Äquivalentkonzentrationen der analysierten Ionen [$\mu\text{eq l}^{-1}$].

		λ_{20}	pH	H ⁺	Na ⁺	K ⁺	NH ₄ ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻
Wülfersreuth	x_{mittel}	526	3,1		92	80	1366	74	375	138	708	1437
[Trautner 1988]	x_{min}	58	2,4		12	9	87	16	51	43	127	352
	x_{max}	2500	4,9		774	246	5416	584	3350	660	5600	9040
Ochsenkopf	x_{mittel}	255	3,5	314	66	28	922	22	110	96	599	669
[Herterich	x_{min}	49	2,9	45	5	4	125	3	9	8	83	83
1987]	x_{max}	900	4,3	1194	213	80	2821	76	376	374	2607	2375
Ochsenkopf	x_{mittel}	175	3,7	224	86	37	395	57	151	76	376	415
[Verhoeven <i>et al.</i> 1987]												
Landeshügel	x_{min}	69	2,5		60				50	60	80	310
[Schrimppf <i>et al.</i> 1984]	x_{max}	1230	4,2		970				2530	1510	3000	2890
Waldstein	x_{mittel}	151	4,3	89	65	12	669	20	69	54	481	497
[Wrzesinsky & Klemm 2000]	x_{min}	17	3,3	2	<9	<7	<21	<5	<11	<13	20	55
	x_{max}	452	5,7	513	664	69	2578	152	453	389	1742	1797
	x_{median}	142	4,3	52	30	10	547	10	40	31	409	421
Waldstein	x_{mittel}	224	4,2	151	111	15	896	29	55	98	719	461
diese Arbeit	x_{min}	0	2,7	1	<9	<6	16	<4	<10	<8	18	14
	x_{max}	1520	6,1	1862	1701	167	6320	420	569	1244	6209	3789
	x_{median}	168	4,1	72	43	10	621	15	32	43	487	321

Tabelle 29: Vergleich der mittleren Werte für pH, elektrische Leitfähigkeit und die Äquivalentkonzentrationen der wichtigsten Ionen im wet-only-Niederschlag und Nebelwasser. Angegeben sind die Mediane. Für Na⁺, K⁺, Mg²⁺ und Ca²⁺ lagen die Mediane der wet-only-Proben unter der Bestimmungsgrenze. Die Anreicherung ist der Quotient aus Nebelwasserkonzentration und wet-only-Konzentration.

Messwert		wet-only	Nebel	Anreicherung
pH-Wert		5,38	4,20	
Leitfähigkeit	[$\mu\text{S cm}^{-1}$]	13	156	11,8
H ⁺	[$\mu\text{eq l}^{-1}$]	4,2	63,1	15,0
NH ₄ ⁺	[$\mu\text{eq l}^{-1}$]	32,4	587,6	18,1
Cl ⁻	[$\mu\text{eq l}^{-1}$]	9,1	40,6	4,5
NO ₃ ⁻	[$\mu\text{eq l}^{-1}$]	34,6	453,2	13,1
SO ₄ ²⁻	[$\mu\text{eq l}^{-1}$]	26,8	308,1	11,5

Für die Beurteilung der Rolle des Nebels im Ökosystem ist ein Vergleich mit den anderen Eintragungswegen notwendig. Der Vergleich mit Regen und Schnee sowie mit der Ökosystembilanz erfolgt in Kapitel 4.5. Ein bisher für den Waldstein unquantifizierter Anteil des Eintrags von Spurenstoffen ist die trockene Deposition durch Partikel. In [Held *et al.* 2002] wurde die Luftbelastung durch Partikel für die Summe aus Ammonium NH₄⁺, Nitrat NO₃⁻ und Sulfat SO₄²⁻ bei den untersuchten Messungen mit ca. 4500 ng m⁻³ angegeben. Der aus Tabelle 21 zu ermittelnde Wert für den Nebel liegt mit ca. 11900 ng m⁻³ deutlich höher. Natürlich ist ein stichhaltiger Vergleich dieser beiden Werte aufgrund der geringen Zahl von Partikelmessungen nicht möglich.

4.5 Vergleich von turbulenter und sedimentativer Deposition

Der vertikale Transport von Partikeln und Tropfen im Größenbereich von wenigen Nanometern bis zu einigen Millimetern wird unter anderem turbulent und gravitativ angetrieben. Der gravitative Teil (Sedimentation) ist dabei von der Masse der Partikel und damit vom Durchmesser abhängig. Nach [Seinfeld & Pandis 1998] spielt die Sedimentation im Größenbereich von unter $1\ \mu\text{m}$ keine Rolle. Nebeltropfen sind mit einem Tropfendurchmesser von 2 bis ca. $50\ \mu\text{m}$ im Bereich zunehmender Bedeutung der Sedimentation. Für den Eintrag von Regentropfen ($\varnothing > 100\ \mu\text{m}$) ist Sedimentation der entscheidende Faktor. Für den Nebel erwartet man also einen steigenden Anteil der Sedimentation am Gesamtfluss mit steigendem Tropfendurchmesser.

In Abbildung 75 ist der mittlere Fluss für die beiden Arten in Abhängigkeit von der Tropfengröße dargestellt. Während insgesamt ca. 14 % des durch Nebel eingetragenen Wassers durch Sedimentation deponieren, schwankt der Anteil für die einzelnen Größenklassen zwischen 0,1 % (bei turbulenter Emission) für Klasse 1 (bis $1,5\ \mu\text{m}$) und 415 % in Klasse 39 ($47\ \text{bis}\ 48,5\ \mu\text{m}$). Betrachtet man nur Kanäle mit turbulenter Deposition, so liegt das Minimum im Kanal 14 ($13,5\ \text{bis}\ 14,5\ \mu\text{m}$) mit 6,9 %.

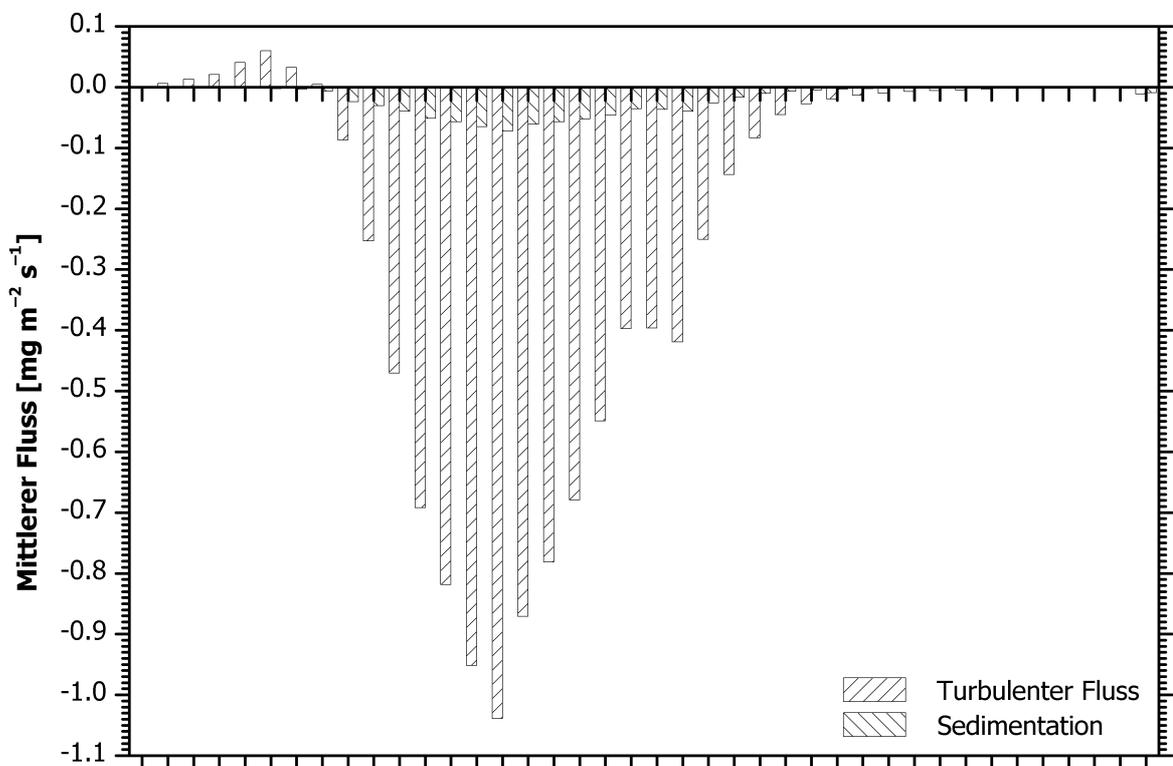


Abbildung 75: Größenabhängiger Vergleich von turbulentem und sedimentativem Fluss am Waldstein für den Messzeitraum 2001/2002.

4.6 Vergleich der Bedeutung von Regen und Nebel am Standort

4.6.1 Wassereintrag

In den Anfängen der modernen Nebelforschung wurde überwiegend der Beitrag der feuchten Deposition zum Wasserhaushalt der damals untersuchten Gebiete untersucht. So war in [Grunow 1955] und [Baumgartner 1958] ausschließlich dieser Beitrag Gegenstand der Untersuchung. Auch in den aktuellen Studien spielt der Wassergewinn durch die feuchte Deposition eine große Rolle. Der Schwerpunkt hat sich dabei allerdings auf das so genannte „fog harvesting“ verschoben. Dabei handelt es sich um die Gewinnung von Nebelwasser zur Trinkwasserversorgung in Gebieten mit chronischem Wassermangel. Die Nutzung von Nebel als Trinkwasserquelle ist bereits seit über 6000 Jahren wahrscheinlich. Untersuchungen im westlichen Südamerika [Larrain *et al.* 2001] ergaben dort die Nutzung von Steinhäufen als Nebelfänger. In der aktuellen Entwicklung ergeben sich vor allem Chancen für meeresnahe Wüstengebiete wie in Namibia und Südafrika ([Eckardt und Schemenauer 1998], [Olivier 2002] und [Olivier und de Rautenbach 2002]), im westlichen Südamerika (z. B.: [Cereceda und Schemenauer 1991] und [Cereceda *et al.* 1992]) und vielen anderen vergleichbaren Gebieten.

Bei der Untersuchung der eingetragenen Mengen von Nebelwasser am Waldstein ist natürlich der Vergleich mit dem durch Regen und Schnee gefallenen Niederschlag erforderlich. Die Grundlage für den Vergleich bilden die Daten des Depositionssystems und die Messung des Niederschlags im Pflanzgarten und auf dem Weidenbrunnen-Messturm. Die Daten der beiden Niederschlagsmesser waren während des Aufzeichnungszeitraums mit Fehlern behaftet. So lieferte der Schiffsregensammler auf dem Weidenbrunnen-Messturm während der Durchführung verschiedener anderer Experimente vor allem im Juli 2001 keine gesicherten Daten. Die Daten der Kippwaage im Pflanzgarten konnten aufgrund eines defekten Bauteils an einigen Tagen zum Jahreswechsel 2001/2002 und im kompletten März 2003 nicht verwendet werden. Auf diesen Grundlagen wurden die Daten der Kippwaage als Standard verwendet und an Tagen des Ausfalls des Messgeräts mit Daten des Schiffsregensammlers substituiert. Diese Korrektur wurde für die Zeiträume vom 28.12.2001 0:00 bis zum 8.1.2002 23:50 und ab dem 26.2.2002 0:00 verwendet.

*Tabelle 30: Monatlicher Niederschlag am Waldstein: Regen und Schnee, Nebel, Gesamtniederschlag und Anteil des Nebels am Gesamtniederschlag. Alle Werte in mm. April 2001: nur Daten ab 17.4. Regen und Schnee: Korrektur aus [Rebmann *et al.* 2004]*

Monat	Regen und Schnee	Nebel	Gesamtniederschlag	Anteil des Nebels
April 2001	97,3	0,3	97,6	0%
Mai 2001	22,8	7,2	30,0	24%
Juni 2001	107,1	5,2	112,3	5%
Juli 2001	128,5	5,3	133,8	4%
August 2001	27,8	1,0	28,8	4%
September 2001	171,4	13,4	184,8	7%
Oktober 2001	55,2	10,4	65,6	16%
November 2001	145,7	20,5	166,2	12%
Dezember 2001	204,5	14,9	219,4	7%
Januar 2002	109,5	24,1	133,6	18%
Februar 2002	247,6	15,2	262,8	6%
März 2002	96,7	5,9	102,6	6%

In der Tabelle 30 sind die Niederschlagsdaten für Regen und Schnee sowie Nebel dargestellt. Man erkennt die deutlich ausgeprägte saisonale Verteilung der Nebelniederschläge. Das Maximum lag während der Messungen in Spätherbst und Winter (November bis Februar), das Minimum im Sommer (August). Dies ist direkt mit den in diesem Zeitraum größeren

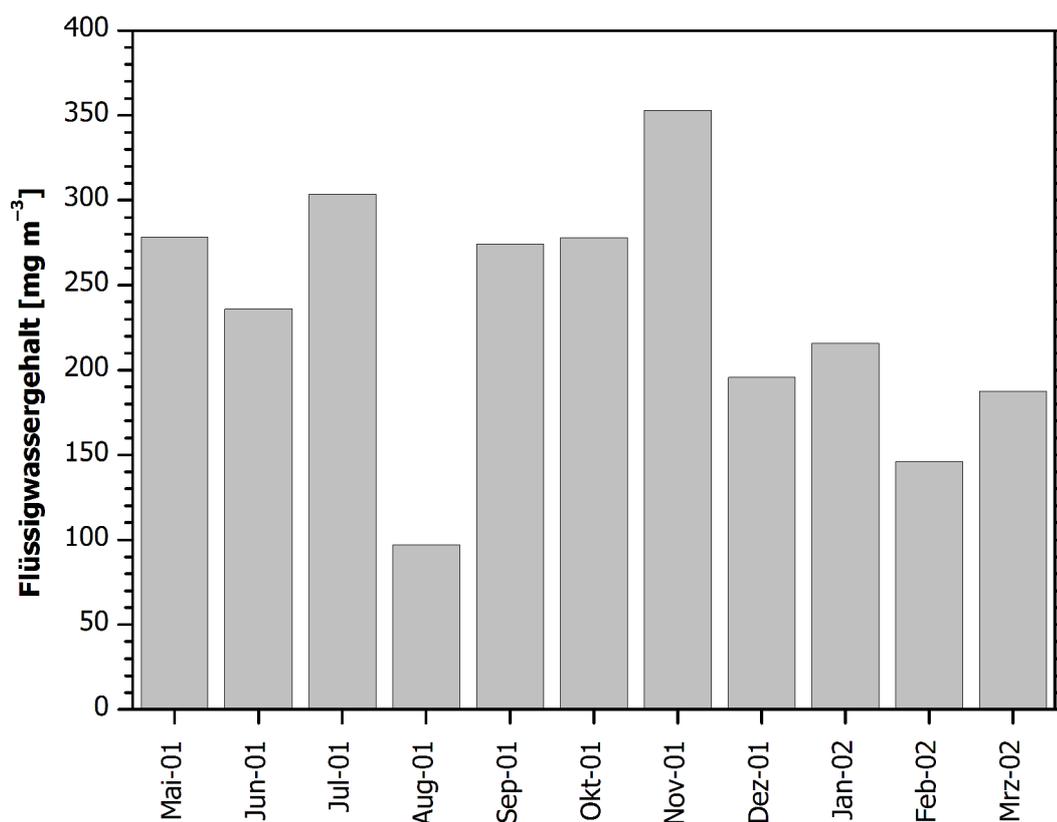


Abbildung 76: Monatliche gemittelter Flüssigwassergehalt während Nebels am Waldstein für den Hauptmesszeitraum 2001/2002.

Nebelhäufigkeiten korreliert. Andere Faktoren, die den Nebelniederschlag im Verlaufe des Jahres beeinflussen könnten, sind saisonale Änderungen des Tropfengrößenspektrums und des Flüssigwassergehaltes. Betrachtet man in Abbildung 76 den Verlauf des Flüssigwassergehaltes, dann ist ein Jahrgang nicht klar erkennbar.

4.6.2 Spurenstoffeintrag und Ökosystem-Bilanz

Eines der wichtigsten Ergebnisse dieser Arbeit ist die Quantifizierung des nebelgebundenen Eintrags von Nähr- und Spurenstoffen in das Ökosystem am Waldstein. Für die wichtigsten anorganischen Bestandteile im Nebel- und Regenwasser (Ammonium NH_4^+ , Nitrat NO_3^- und Sulfat SO_4^{2-}) liegen die Einträge im gleichen Größenbereich. Der Nebel spielt hier also eine gleichwertige Rolle wie der Regen.

Die saisonal unterschiedliche Verteilung der Nebelniederschläge ist direkt mit den Einträgen von Spurenstoffen in den Waldbestand an der Messstation verbunden. Es ist vorstellbar, dass durch den Jahrgang die Auswirkung der Deposition im Ökosystem anders sind, als bei einem gleichmäßigen Eintrag über das Jahr. Das muss bei einer z. B. pflanzenphysiologischen Untersuchung der Auswirkungen berücksichtigt werden (siehe z. B. [Mengel *et al.* 1987]).

Vergleicht man die gemessenen Werte für die feuchte und nasse Deposition mit den vom BITÖK ermittelten Werten für den Bestandesniederschlag wie in Tabelle 31 angegeben, so ist die Differenz während des Untersuchungszeitraum sehr stark vom untersuchten Spurenstoff abhängig. Große Differenzen gibt es bei Natrium Na^+ , Kalium K^+ , Magnesium Mg^{2+} und Calcium Ca^{2+} . Für Protonen H^+ , Ammonium NH_4^+ und Nitrat NO_3^- sind die Differenzen klein im Vergleich zum Gesamtumsatz, für Sulfat SO_4^{2-} ist die Differenz relativ zwar nicht so groß wie bei den oben genannten Stoffen, aber doch deutlich. Die Ursache für diese Unterschiede liegen

in der Interpretation des Bestandesniederschlages. Während sich Stoffe wie z. B. Kalium, Calcium und Magnesium im Kronenraum durch Leaching [Langusch *et al.* 2003] von den Pflanzenoberflächen anreichern können und im Bestandesniederschlag deutlich stärker als im Freilandniederschlag konzentriert sind, bleiben andere Ionen davon unbeeinflusst. Außerdem kommt beim Bestandesniederschlag noch die trockene Deposition durch Partikel hinzu, die bisher nicht quantifiziert wurde.

Tabelle 31: Vergleich der gemessenen Bestandesniederschläge mit den ermittelten wet-only-Niederschlägen und der Nebeldeposition. Alle Einheiten sind $\text{kg ha}^{-1} \text{a}^{-1}$. „wet-only und Nebel“ ist die Summe aus wet-only-Niederschlag und Nebeldeposition, „Differenz“ die Differenz zwischen Bestandesniederschlag und „wet-only und Nebel“. Messperiode: 1.4.2001 bis 31.3.2002.

Ion	H ⁺	Na ⁺	K ⁺	NH ₄ ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻
Bestandesniederschlag	0,2	7,0	20,4	14,1	1,3	8,5	12,2	54,5	35,5
wet-only-Niederschlag	0,1	1,2	0,1	7,9	0,1	1,4	3,2	25,1	15,0
Nebeldeposition	0,1	2,0	0,3	9,8	0,2	0,6	2,8	27,9	14,0
wet-only und Nebel	0,2	3,2	0,4	17,7	0,3	2,0	6,0	53,0	29,0
Differenz	0,0	3,8	20,0	-1,6	1,0	6,5	6,2	1,5	6,5

Betrachtet man für die weitere Diskussion dieser Ergebnisse den Eintrag von Stickstoff als Element, so erhält man die in der Tabelle 32 dargestellten Werte.

Tabelle 32: Stickstoffdeposition am Waldstein: Vergleich von Bestandesniederschlag, wet-only-Niederschlag und Nebeldeposition.

	Bestand	wet-only	Nebel	wet-only + Nebel	Differenz
NH ₄ ⁺ -N [kg N ha ⁻¹ a ⁻¹]	11,0	6,1	7,6	13,8	-1,2
NO ₃ ⁻ -N [kg N ha ⁻¹ a ⁻¹]	12,3	5,7	6,3	12,0	+0,3
N _{tot} [kg N ha ⁻¹ a ⁻¹]	23,3	11,8	13,9	25,7	-0,9

Die Ergebnisse zeigen klar, dass die Nebeldeposition von Stickstoff die Deposition durch wet-only-Niederschlag um 18 % überschreitet. Somit darf zumindest am Waldstein und in vergleichbaren Höhenlagen der Mittelgebirge die Nebeldeposition bei der Abschätzung der Gesamtdosition nicht außer Acht gelassen werden.

Die direkte Schätzung der Gesamtdosition aus dem Bestandesniederschlag ist für Stickstoff problematisch, da weder NH₄⁺ noch NO₃⁻ den Kronenraum unbeeinflusst passieren. Beide Ionen können im Kronenraum zu organischem Stickstoff metabolisiert werden. In diesem Fall würde der Bestandesniederschlag den Eintrag überschätzen. Augenfällig ist jedenfalls, dass die Summe aus wet-only-Niederschlag und Nebeldeposition (25,7 kg ha⁻¹ a⁻¹) mit dem Bestandesniederschlag (23,3 kg ha⁻¹ a⁻¹) bis auf eine kleine positive Abweichung von unter 10 % übereinstimmt. Akzeptiert man diese Ergebnisse als Übereinstimmung, stellt sich die Frage nach der Rolle der trockenen Deposition von NH₄⁺ und NO₃⁻ in partikulärer Form und in Gasform (als Ammoniak NH₃ bzw. gasförmige Salpetersäure HNO₃) neu. Für diese Depositionspfade wäre „kein Platz“ mehr in der Bilanz. Obwohl für die partikuläre Deposition für den Waldstein bislang keine belastbaren Abschätzungen vorliegen, muss man davon ausgehen, dass dies ein signifikanter Beitrag zur Deposition von Stickstoff ist. Als solcher müsste er zum Bestandesniederschlag beitragen, der allerdings durch eine vollständige Erfassung des wet-only-Niederschlags und der Nebeldeposition bereits vollständig bilanziert ist.

Für die gasförmige Deposition von HNO_3 muss auch ein Beitrag zur Ökosystembilanz angenommen werden. Im Falle von NH_3 bleibt bislang offen, ob die Waldökosysteme am Waldstein netto eine Quelle oder Senke darstellen, da die atmosphärischen Mischungsverhältnisse mit jährlichen Medianen zwischen 0,6 ppb und 1,5 ppb nach [Klemm 2004] unter dem zu erwartenden Kompensationspunkt liegen, unter dem mit Emission zu rechnen ist.

Nach diesen Erwägungen stellt die Summe aus wet-only-Niederschlag und Nebeldeposition ($25,7 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$) die unterste Grenze des möglichen N-Eintrags in den Fichtenwald durch atmosphärische Deposition dar, die mit großer Wahrscheinlichkeit deutlich überschritten wird. Die Abschätzung des N-Eintrags durch den Bestandesniederschlag wäre demnach eine Unterschätzung. Dies gilt in noch stärkerem Maße für die Abschätzung der N-Deposition durch das EMEP-Modell [EMEP 2003], die für das Jahr 1999 lediglich $17,9 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ ergibt.

4.7 Möglichkeiten von Parametrisierungen der Nebelwasserdeposition

Der Aufwand für die direkte Messung der Nebelwasserdeposition ist, wie bisher gezeigt wurde, sehr groß. Daher ist es natürlich wünschenswert, sinnvolle Parametrisierungen des nebelgebundenen Eintrags zu finden. Die Modellierung nach [Lovett 1984] und deren Weiterentwicklung nach [Pahl 1996] ist zurzeit eine wichtige Methode der Abschätzung von Nebeldeposition. [Scheer 2002] verglich dieses Modell unter Nutzung verschiedener Messwerte aus dieser Arbeit mit den gemessenen Nebelwasserflüssen. Die Abweichungen waren dabei auf monatlicher Basis sehr groß. Erst auf ein Jahr aggregiert konnten ähnliche Ergebnisse erzielt werden. Der berechnete Betrag von 161 mm für den Messzeitraum liegt um ca. 29 % über dem Messwert von 125 mm. Die in das Modell eingehenden Parameter sind dabei die Sichtweite und das vertikale Windprofil am Messort. Aus der Sichtweite werden dann z. B. Tropfengrößenverteilung (nach [Best 1951]) oder Flüssigwassergehalt (nach [Pahl 1996]) parametrisiert. Diese Werte konnten durch die vorliegenden Messungen auch direkt verwendet werden, brachten aber insgesamt keine eindeutige Verbesserung der erzielten Ergebnisse. Um für den Waldstein ein wenigstens empirisches Modell zu finden, wurden die Zusammenhänge zwischen Fluss und einigen standardmäßig erfassten bzw. leicht zu berechnenden Messgrößen untersucht. Abbildung 77 zeigt den Zusammenhang von Sichtweite und Fluss für den sedimentativen und den turbulenten Fluss sowie den Gesamtfluss. Während für die Sedimentation eine Abhängigkeit noch ableitbar wäre, ist der Zusammenhang für turbulenten und Gesamtfluss nicht sinnvoll in Formeln zu fassen. Es sind zwar bei geringen Sichtweiten hohe Flüsse zu erwarten, die Streuung ist aber enorm. Betrachtet man zusätzlich den Einfluss der Turbulenz als den Zusammenhang zwischen Schubspannungsgeschwindigkeit und dem Quotienten aus Fluss und Sichtweite in Abbildung 78 so wird die Streuung nicht geringer. Erst zwischen Depositionsgeschwindigkeit und Schubspannungsgeschwindigkeit scheint eine Abhängigkeit zu existieren (siehe Abbildung 79). Da sich aber der Fluss dann nur über die Messung des Flüssigwassergehaltes berechnen lässt, wird dieser Ansatz nicht weiter verfolgt.

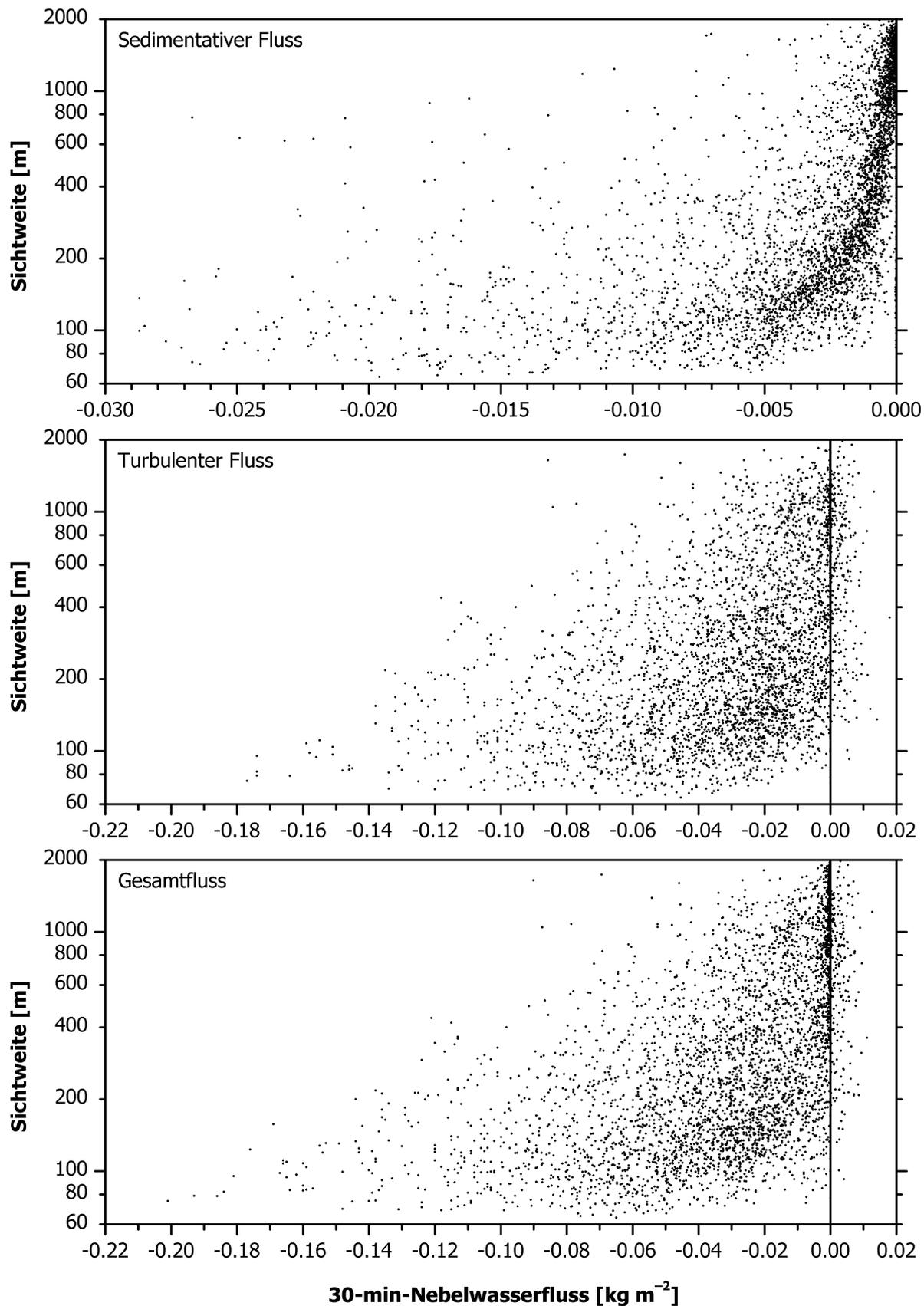


Abbildung 77: Abhängigkeit der gemessenen Sichtweiten von den gemessenen Nebelwasserflüssen am Waldstein. Oben: Sedimentativer Fluss, Mitte: Turbulenter Fluss, Unten: Gesamtfluss. Die vertikalen Linien (Mitte und Unten) geben die Grenze zwischen Deposition und Emission an.

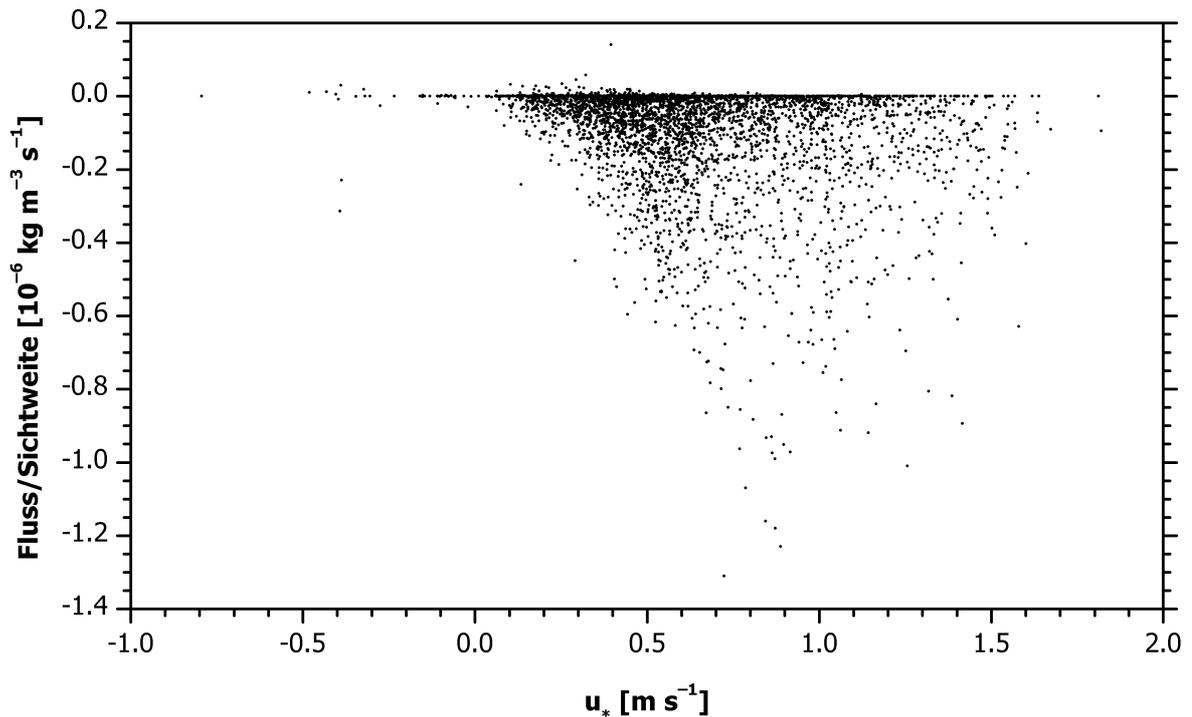


Abbildung 78: Der Quotient aus turbulentem Fluss und Sichtweite als Funktion der Schubspannungsgeschwindigkeit u_* . Basis: 30-min-Werte.

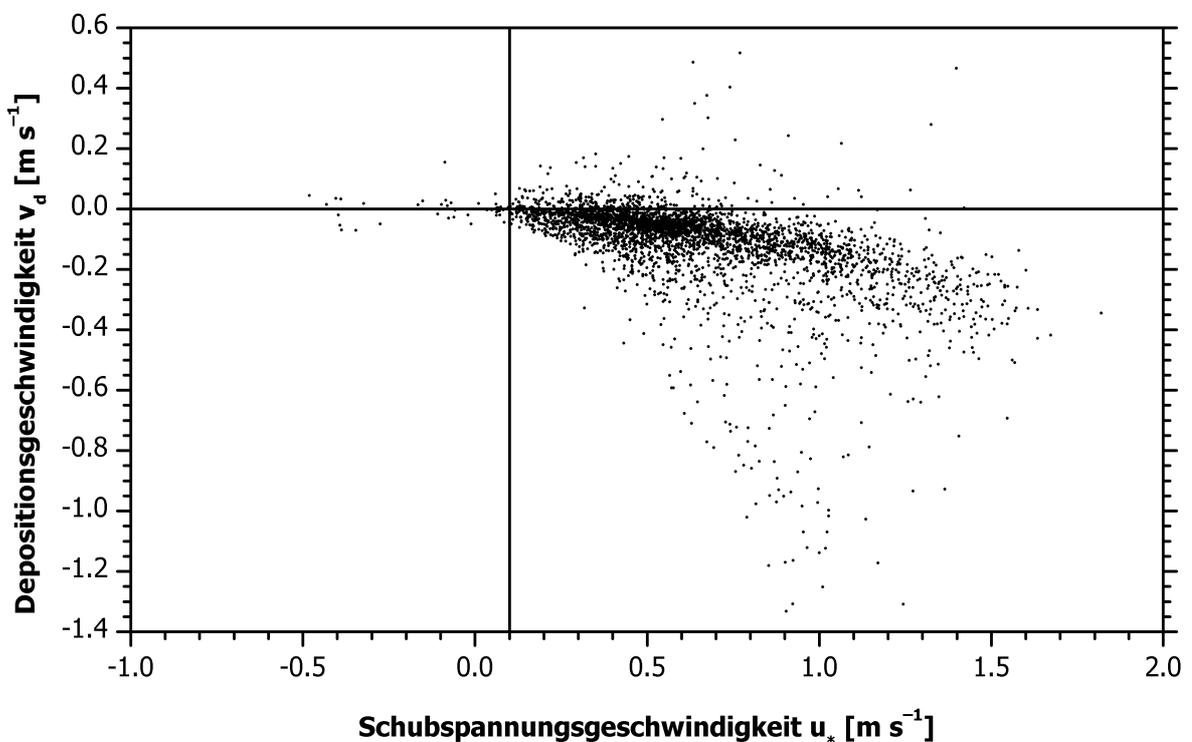


Abbildung 79: Die turbulente Depositionsgeschwindigkeit v_d als Funktion der Schubspannungsgeschwindigkeit u_* . Die horizontale Linie gibt die Grenze zwischen Deposition und Emission an. Die vertikale Linie kennzeichnet den für diese Arbeit verwendeten Grenzwert für die Schubspannungsgeschwindigkeit an. Basis: 30-min-Werte.

Bei der weiteren Untersuchung eventuell möglicher Parametrisierungen wurde versucht, zeitlich aggregiert Sichtweitedaten mit den ermittelten Nebelwasserdepositionsdaten zu vergleichen. Dabei scheint auf monatlicher Basis eine gute Korrelation zwischen der Andauer von Nebel und dem Nebelwasserfluss zu existieren. In Abbildung 80 ist dieser Zusammenhang grafisch dargestellt. Für einzelner Sichtweitenklassen wurde die Abhängigkeit durch eine lineare Regression beschrieben. Die höchste Korrelation von allen untersuchten Sichtweiteklassen wies dabei die Sichtweiteklasse ≤ 1000 m auf. Betrachtet man also die Andauer von Nebel, der schließlich als Sichtweite ≤ 1000 m definiert ist, so erhält man mit einem Korrelationskoeffizienten von 0,938 die in (23) dargestellte Formel.

$$\frac{D_{\text{Monat}}}{[\text{mm}]} = -1,706 + 1,439 \cdot \frac{t_{\text{Nebel}}}{[\text{d}]} \quad (23)$$

mit D_{Monat} monatliche Nebeldeposition [mm]
 t_{Nebel} monatliche Andauer von Nebel¹ [d]

Ob diese Formel wirklich für einzelne Monate gilt kann nur bei längerfristiger Untersuchung am Standort entschieden werden. Als erste Annäherung ist sie aber bestimmt hilfreich.

¹ Sichtweiten unter 1000 m

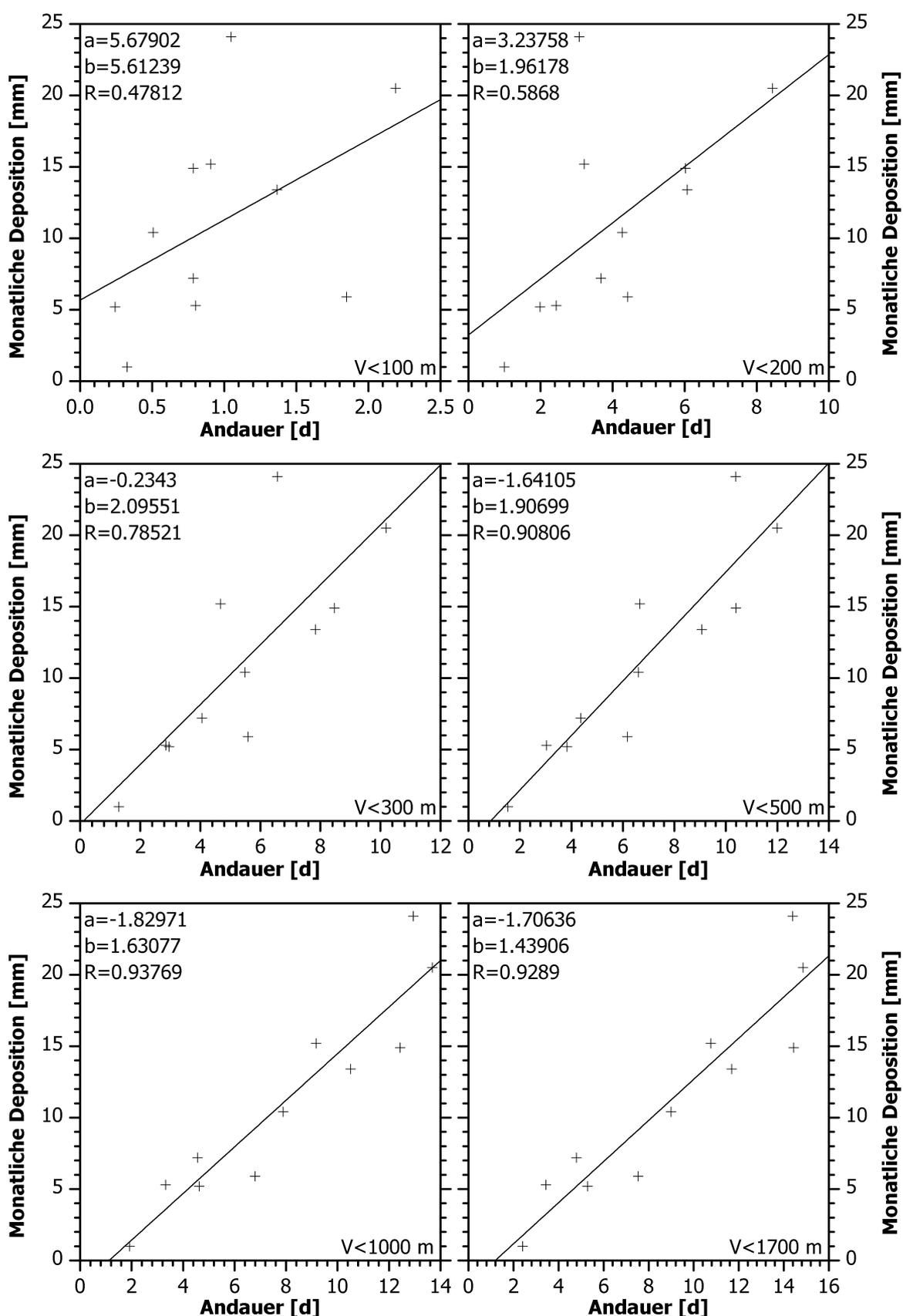


Abbildung 80: Abhängigkeit der monatlichen Deposition von der Andauer des Unterschreitens verschiedener Sichtweitekassen (100 m, 200 m, 300 m, 500 m, 1000 m und 1700 m) und die jeweilige lineare Regression für die Daten für die Gerade $y = a + bx$ mit dem Korrelationskoeffizienten R.

5 Schlussfolgerungen und Ausblick

5.1 Schlussfolgerungen

Aus den vorangegangenen Arbeiten [Wrzesinsky 1998] und [Wrzesinsky & Klemm 2000] war bekannt, dass der Standort Waldstein als ausgesprochen nebelreich zu charakterisieren ist. Durch die Untersuchungen konnte auch eine deutlich erhöhte Konzentration anorganischer Ionen im Nebelwasser im Vergleich mit Regenwasser festgestellt werden. Die Vermutung, dass der Nebel daher beim Eintrag von Wasser und Spurenstoffen eine nicht zu vernachlässigende Rolle für das Waldökosystem spielt, wurde formuliert und war Grundlage für das Projekt, welches in dieser Arbeit vorgestellt wurde. Der Fokus lag bei der Entwicklung, Erprobung und beim Einsatz eines Systems zur direkten Messung von Nebelwasserdeposition unter Anwendung der Eddy-Kovarianz-Methode. Dieses System konnte trotz einiger durch den Hersteller bedingten Probleme ab September 2000 in einem Vergleich mit einem sehr ähnlichen System des Geographischen Instituts der Universität Bern eingesetzt werden. Dieses Vergleichsexperiment [Burkard *et al.* 2002] zeigte, dass der Einsatz unter Feldbedingungen prinzipiell möglich ist. Die von [Kowalski & Vong 1999] gezeigte Flussdivergenz zwischen verschiedenen Höhen wurde während des Vergleich ebenfalls untersucht, konnte aber wahrscheinlich aufgrund von Messartefakten nicht nachgewiesen werden [Burkard *et al.* 2002]. Nach einigen Optimierungen und Reparaturen war das Nebeldepositionssystem dann von April 2001 bis März 2002 auf dem Weidenbrunnen-Messturm im Einsatz und lieferte Daten für den Nebelwasserfluss am Standort Waldstein. Der Zeitraum erwies sich als besonders nebelreich. Mit 223 Nebeltagen und einem Nebelanteil von 25,7 % waren Werte um die bisher gemessenen Maxima zu verzeichnen. Auch der „klassische“ Niederschlag aus Regen und Schnee lag höher als im Mittel. Die Messungen der Nebelwasserdeposition ergaben mit insgesamt 125 mm einen Anteil von 8,1 % am gesamten Wassereintrag. Der bereits in den frühen Jahren der modernen Nebelforschung in den Vordergrund gestellte zusätzliche Beitrag zum Wasserhaushalt der Bergwälder [Baumgartner 1958] ist also durchaus vorhanden. Allerdings sind Regen und Schnee dominierend. Der von [Wrzesinsky & Klemm] vermutete Beitrag von 163 bis 564 mm für 1997 muss als zu hoch betrachtet werden. Die zu Grunde liegenden Vereinfachungen und idealisierten Messungen überschätzen den Nebelfluss wohl erheblich.

Die Anwendung der Eddy-Kovarianz-Methode auf die Messung des Flusses von Partikeln und Tropfen ist eine noch relative neue Methode. Seit [Beswick *et al.* 1991] sind vor allem die Untersuchungen von [Vermeulen *et al.* 1995] und [Vong & Kowalski 1995] zu nennen. Nach den Vergleichsmessungen führte das Geographische Institut der Universität Bern die Messungen der Nebelwasserdeposition in der Schweiz fort [Burkard *et al.* 2003].

Die Qualitätskontrolle der Rohdaten ergab einen hohen Prozentsatz an verwendbaren Datensätzen. Eine Anwendung weiterführender Kontrollen könnte eine weitere Verbesserung der Qualität des Datensatzes führen. Problematisch ist dabei die große Menge an Rohdaten, die eine sorgfältige Auswertung erschwert. Eine vertiefende Untersuchung von Teilen des Datensatzes wäre durchaus angebracht, um die gewonnenen Ergebnisse weiter abzusichern. Probleme mit dem eingesetzten Tropfenspektrometer FM-100 und die geringe Kenntnis seiner Fehlerquellen sind weitere Unsicherheitsfaktoren für die vorliegenden Resultate. Das während des Vergleichsexperiments noch kritisierte Ultraschallanemometer Young 81000 scheint durch einige interne Verbesserungen seit Mitte April 2001 bessere Daten geliefert zu haben. Eine Offenlegung der gemachten Veränderungen seitens der Herstellerfirma ist bisher jedoch nicht erfolgt, sodass keine endgültigen Aussagen zum zukünftigen Einsatz dieses Gerätes für Flussmessungen gemacht werden können. Die bereits von [Vong & Kowalski 1995] festgestellten Emissionen kleiner Nebeltropfen konnte am Waldstein ebenfalls gezeigt werden.

Der neu entwickelte Nebelsammler „Bayreuth Heatable Active Cloudwater Collector“ (BCC) hat sich im Feldeinsatz bewährt. Die Messungen im Winter liefen ohne größere Probleme.

Seinem zukünftigen Einsatz steht auch bei Dauermessungen nicht im Wege. Die Kombination aus den gemessenen Flussdaten mit der chemischen Nebelwasserzusammensetzung sollte die Berechnung des Eintrags der wichtigsten Nähr- und Spurenstoffe ermöglichen. Für die untersuchten Proben ist festzustellen, dass sich die mittlere Zusammensetzung etwas zuungunsten von Sulfat verschoben hat und dass die Gesamtkonzentration sich gegenüber den Messungen von [Wrzesinsky & Klemm 2000] im Gegensatz zum allgemeiner Trend der 1990er Jahre [Klemm 2001] nicht weiter verringerte. Beim Vergleich zum Regen wurden Anreicherungen von ca. 11 bis 18 für die dominierenden Ionen Ammonium NH_4^+ , Nitrat NO_3^- sowie Sulfat SO_4^{2-} festgestellt. Bei der Berechnung der eingetragenen Mengen an Spurenstoffen machen diese Anreicherungen den geringeren Wassereintrag durch Nebel wieder wett. So errechnen sich Einträge der wichtigsten Ionen, die um die Werte der wet-only-Deposition schwanken. Der Beitrag zur Bilanzierung der Ökosystemflüsse ist also enorm und muss für den Standort Waldstein und vergleichbare Messpunkte unbedingt beachtet werden. Der nebelgebundene Eintrag von Stickstoff wurde mit insgesamt mit $13,9 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ ermittelt. Durch den Vergleich mit gemessenen Daten des Bestandesniederschlag und der wet-only-Deposition konnte gezeigt werden, dass die Summe aus wet-only und Nebel etwa gleich dem Bestandesniederschlag ist.

Bei der Berechnung der nebelgebundenen Deposition von Spurenstoffen musste davon ausgegangen werden, dass die Zusammensetzung des Nebelwassers unabhängig von der Tropfengrößenverteilung ist, da eine tropfengrößenspezifische Untersuchung im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich war. [Collett et al. 1994] und [Bator & Collett 1997] zeigten, dass die Zusammensetzung durchaus von der Tropfengröße abhängig ist. [Schell *et al.* 1997] zeigten für das Great Dunfell Experiment [Choularton *et al.* 1997], dass kleinere Tropfen höher konzentriert sind als größere, die Unterschiede aber nicht so hoch sind wie in anderen Untersuchungen.

Bei der Untersuchung möglicher Parametrisierungen der Nebelwasserdeposition wurden die gewonnenen Daten durch [Scheer 2002] mit einem Modell nach [Pahl 1996] verglichen. Der Vergleich führt nur auf Jahresbasis zu geringen Unterschieden zwischen gemessenen und modellierten Daten. Die Abweichungen der Monatswerte schwanken enorm. Eine einfache Parametrisierung aus der Nebeldauer pro Monat konnte entwickelt werden, muss aber mit unabhängig zu messenden Daten verifiziert werden.

Allgemein kann gesagt werden, dass es erstmals gelungen ist über ein Jahr eine direkte Messung der Nebelwasserdeposition durchzuführen und damit einen saisonal nicht überlagerten Vergleich mit den anderen am Standort gemessenen Ökosystemdaten durchzuführen. Der Aufwand für diese Art von Messungen ist leider noch sehr hoch. Eine komplett automatisierte Auswertung der Daten ist zurzeit noch nicht in Sicht und so wird auf absehbare Zeit es weiter nötig sein, solche Messungen unter starker wissenschaftlicher Betreuung durchzuführen. Eine „plug-and-play“-Version wird es sobald nicht geben. Die durch das Projekt gestellten Ziele konnten erreicht werden.

5.2 Ausblick

Die Messungen der Nebelwasserdeposition am Waldstein haben das Wissen um diesen Standort vermehrt. Der Beitrag der Nebeldeposition zur Wasserbilanz des Ökosystems konnte durch direkte Messungen quantifiziert werden, ebenso der Beitrag zur Nährstoffversorgung und Schadstoffbelastung der Vegetation. Die Beiträge sind in diesem montanen Waldökosystem signifikant, zum Teil erheblich. Deshalb sollten ähnliche Experimente an anderen nebelreichen Bergstandorten, die die Quantifizierung von Stoffflüssen in Ökosystemen (einschließlich Wasserflüsse) zum Ziel haben, keineswegs die Nebelwasserdeposition vernachlässigen. Ausdrücklich seien hier auch Untersuchungen im subtropischen und tropischen Raum genannt, wo die Deposition von Nebel teilweise eine noch größere Rolle spielen kann als in den gemäßigten Breiten.

Diese Arbeit befasste sich im Wesentlichen mit den Hauptionen als gelösten Inhaltsstoffen des Nebelwassers. Nebel enthält allerdings auch weitere gelöste und dispergierte Stoffe wie anorganischen und organischen Kohlenstoff (vgl. [Grießbaum 2002]), Haloacetate und Nitrophenole ([Römpf 1999], [Hottenroth 2001], [Römpf *et al.* 2001]) sowie viele andere organische Schadstoffe [Fuzzi *et al.*, 2002]. Alle diese Stoffe sind in Nebelwasser in deutlich höheren Konzentrationen vorhanden als in vergleichbarem Regenwasser. Deshalb ist für organische Spurenstoffe damit zu rechnen, dass für den Standort Waldstein die Deposition durch Nebel in der selben Größenordnung liegt als diejenige durch Regen. In vielen Fällen wird sie höher sein.

Die Modellierung bzw. Parameterisierung der Nebeldeposition aus relativ einfachen meteorologischen Parametern scheint noch nicht zufrieden stellend gelöst zu sein. Insbesondere für Mittelungszeiträume von einem Monat und kürzer traten erhebliche Abweichungen von Modell und experimenteller Messung auf, deren Ursachen dringend erforscht bzw. behoben werden müssen.

Es sind aber auch bezüglich der hier angewandten Messtechnik einige Fragen unbeantwortet geblieben und andere neu aufgetaucht. Für die Qualität der Messungen wäre eine detaillierte Untersuchung der mikrometeorologischen Eigenschaften des Nebeldepositionssystems erforderlich. Die physikalischen Ausmaße des FM-100 und der gesamten Anlage sind Rauigkeitshindernisse, die möglicherweise die Messung selbst beeinflussen können.

Auch untersucht die aktuelle Forschung am Waldstein kritisch die bisherigen Aussagen zur Güte von Turbulenzmessungen auf dem Weidenbrunnen-Turm. So könnten Erkenntnisse aus diesen Experimenten eine Korrektur der gewonnenen Daten erforderlich machen. Aus den in dieser Arbeit gewonnen Ergebnissen ergeben sich allerdings keine Hinweise darauf, dass die getroffenen Aussagen in signifikanter Weise Änderungen unterworfen werden müssen.

Die Quantifizierung der Flüsse chemische Inhaltsstoffe des Nebels (z. B. Stickstoff) durch Nebeldeposition mit „echter“ Eddy-Kovarianz müsste streng genommen auf Einzeltropfenanalyse beruhen und nicht – wie in dieser Arbeit geschehen – auf der Analyse einer über alle Tropfengrößen gemittelten Nebelwasserprobe. Die Tropfen können in Abhängigkeit von ihrer Größe unterschiedliche chemische Zusammensetzungen zeigen, und auch innerhalb einer Größenklasse könnten unterschiedlich zusammengesetzte Tropfen vorkommen („externe Mischung“). Von einer Einzeltropfenanalyse für Nebel (Messung von Größe und chemischer Zusammensetzung), so wie sie sich für „trockene“ Aerosolpartikel bereits in fortgeschrittenem Entwicklungsstadium befindet („Time-Of-Flight“-Massenspektrometrie) sind wir allerdings noch weit entfernt. Einen großen Fortschritt würde bereits die Messung der Konzentrationen der Inhaltsstoffe als Funktion der Tropfengröße bedeuten. Dies ist der nächste zwingende Schritt zur Verbesserung und Erweiterung der hier entwickelten Methodik.

6 Literaturverzeichnis

Alewell, C. (2003): Persönliche Mitteilung

Alt E. (1932): Klimakunde von Mittel- und Südeuropa. In: Köppen W. und R. Geiger (Hrsg., 1932): Handbuch der Klimatologie, Band III, Teil M. Berlin: Gebr. Borntraeger, 288 S. Reprint (1972) Nendeln/Liechtenstein: Kraus Reprint.

Anderson, J. B., R. E. Baumgardner, V. A. Mohnen und J. J. Bowser (1999): Cloud chemistry in the eastern United States, as sampled from three high-elevation sites along the Appalachian Mountains. *Atmospheric Environment* **33**, 5105-5114.

Aubinet, M., A. Grelle, A. Ibrom, Ü. Rannik, J. Moncrieff, T. Foken, A. S. Kowalski, P. H. Martin, P. Berbigier, C. Bernhofer, R. Clement, J. Elbers, A. Granier, T. Grünwald, K. Morgenstern, K. Pilegaard, C. Rebmann, W. Snijders, R. Valentini und T. Vesala. 2000. Estimates of the annual net carbon and water exchange of forests: The EUROFLUX methodology. *Advances in Ecological Research* **30**, 113-175.

Bator, A. und J. L. Collett (1997): Cloud chemistry varies with drop size. *Journal of Geophysical Research* **102**, 28071-28078.

Baumgartner, A. (1958): Nebel und Nebelniederschlag als Standortfaktoren am Großen Falkenstein (Bayerischer Wald). *Forstwissenschaftliches Centralblatt* **77**, 257-320.

Bayerisches Landesvermessungsamt (2001): TOP50 Bayern Nord: Amtliche Topographische Karten im Maßstab 1:50 000 mit Digitalem Geländemodell für 3D-Darstellungen, Version 3.1, CD-ROM, Bayerisches Landesvermessungsamt, München.

Best, A. C. (1951) Drop-Size Distribution in Cloud and Fog. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* **77**, 418-426.

Beswick, K. M., K. J. Hargreaves, M. W. Gallagher, T. Choularton und D. Fowler (1991): Size-resolved measurements of cloud droplet deposition velocity to a forest canopy using eddy correlation technique. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* **117**, 623-645.

Böer, W. und A. Vesecký (1973): Klima und Witterung im Erzgebirge. *Abhandlungen des Meteorologischen Dienstes der DDR* **104**, 166 S, zit. in [Foken 2003b].

Burkard, R (2003): Persönliche Mitteilung.

Burkard, R., P. Bützberger und W. Eugster (2003): Vertical fogwater flux measurements above an elevated forest canopy at the Lägeren research site, Switzerland. *Atmospheric Environment* **37**, 2979-2990.

Burkard, R., W. Eugster, T. Wrzesinsky und O. Klemm (2002): Vertical Divergence of Fogwater Fluxes above a Spruce Forest. *Atmospheric Research* **64**, 133-145.

Bürklin (2002): Internetkatalog unter <http://www.buerklin.de>. Stand: 2002-06-01.

Cereceda, P. und Schemenauer R. S. (1991): The Occurrence of Fog in Chile. *Journal of Applied Meteorology* **30**, 1097-1105.

- Cereceda, P., R. S. Schemenauer und M. Suit (1992): An Alternative Water Supply for Chilean Coastal Desert Villages. *Water Resources Development* **8**, 53-59.
- Chang, S. C., I. L. Lai und J. T. Wu (2002): Estimation of fog deposition on epiphytic bryophytes in a subtropical montane forest ecosystem in northeastern Taiwan. *Atmospheric Research* **64**, 159-167.
- Choularton, T. W., R. N. Colvile, K. N. Bower, M. W. Gallagher, M. Wells, K. M. Beswick, B. G. Arends, J. J. Möls, G. P. A. Kos, S. Fuzzi, J. A. Lind, G. Orsi, M. C. Facchini., P. Laj, R. Gieray, P. Wieser, T. Engelhardt, A. Berner, C. Krusiz, D. Möller, K. Acker, W. Wieprecht, J. Lüttke, K. Levsen M. Bizjak, H.-C. Hansson, S.-I. Cederfelt, G. Frank, B. Mentes, B. Martinsson, D. Orsini, B. Svenningsson, E. Swietlicki, A. Wiedensohler, K. J. Noone, S. Pahl, P. Winkler, E. Seyffer, G. Helas, W. Jaeschke, H. W. Georgii, W. Wobrock, M. Preiss, R. Maser, D. Schell, G. Dollard, B. Jones, T. Davies, D. L. Sedlak, M. M. David, M. Wendisch, J. N. Cape, K. J. Hargreaves, M. A. Sutton, R. L. Storeton-West, D. Fowler, A. Hallberg, R. M. Harrison und J. D. Peak (1997): The Great Dun Fell Cloud Experiment 1993: An Overview. *Atmospheric Environment* **31**, 2393-2405.
- Collett J. L. Jr. (2001): Persönliche Mitteilung.
- Collett, J. L., A. Bator, D. E. Sherman, K. F. Moore, K. J. Hoag, B. B. Demoz, X. Rao und J. E. Reilly (2002): The chemical composition of fogs and intercepted clouds in the United States. *Atmospheric Research* **64**, 29-40.
- Collett, J. L., A. Bator, X. Rao und B. B. Demoz (1994): Acidity Variations across the Cloud Drop Size Spectrum and Their Influence on Rates of Atmospheric Sulfate Production. *Geophysical Research Letters* **21**, 2393-2396.
- D'Ans, J. und E. Lax (1992): Taschenbuch für Chemiker und Physiker. Berlin, Springer, 768 S.
- Daube B. C., Jr., R. C. Flagan und M. R. Hoffmann (1987): Active Cloudwater Collector. United States Patent No. 4697462.
- DeFelice, T. P. (2002): Physical attributes of some clouds amid a forest ecosystem's trees. *Atmospheric Research* **65**, 17-34.
- Demoz, B. B., J. L. Collett Jr. und B. C. Daube Jr. (1996): On the Caltech Active Strand Cloudwater Collectors. *Atmospheric Research* **41**, 47-62.
- DMT – Droplet Measurement Technologies (1999): Persönliche Mitteilung.
- DMT – Droplet Measurements Technologies (2000): Fog Particle Spectrometer (Fog Monitor) Operations Manual. Droplet Measurements Technologies, P.O. Box 20293, Boulder, CO 80308, USA. 24 S.
- DuPont (2002): DuPont Teflon Product Properties. Internet: URL <http://www.dupont.com/teflon/chemical/properties.html>. Stand: 2003-02-25.
- ebm (2002): AC-Katalog, S-Reihe S. 100 – 121. pdf-Dokument, Internet: URL http://www.ebm-werke.de/homed/katalog/ebm-Standard/S100_121.pdf. Stand: 2002-08-20.

- Eckardt, F. D. und R. S. Schemenauer (1998): Fog water chemistry in the Namib Desert Namibia. *Atmospheric Environment* **32**, 2595-2599.
- EMEP (2003): Datenbankabfrage unter <http://www.emep.int>. Stand: 2003-03-01.
- Enders, G. (Hrsg., 1996): Klimaatlas von Bayern. Bayerischer Klimaforschungsverbund, BayFORKLIM, München, 1996, 57 Bl.
- Falge, E. (2001): Forstliche Charakterisierung der BITÖK-Messflächen: Biomasse, LAI und Transpiration. In: Gerstberger, Pedro (Hrsg.): Waldökosystemforschung in Nordbayern: Die BITÖK-Untersuchungsflächen im Fichtelgebirge und Steigerwald. Bayreuth, *Bayreuther Forum Ökologie* **90**, 11-15.
- Finnigan, J. J., R. Clement, Y. Malhi, R. Leuning and H. A. Cleugh (2003): A re-evaluation of long-term flux measurement techniques. Part I: Averaging and coordinate rotation. *Boundary Layer Meteorology* **107**, 1-48.
- Fišák, J., M. Tesař, D. Řezáčová, V. Eliáš, V. Weignerová und D. Fottová (2002): Pollutant concentrations in fog and low cloud water at selected sites of the Czech Republic. *Atmospheric Research* **64**, 75-87.
- Foken, T. (2003a): Angewandte Meteorologie, Mikrometeorologische Methoden. Berlin, Heidelberg u.a., Springer, 289 S.
- Foken, T. (Hrsg., 2003b): Lufthygienisch-Bioklimatologische Kennzeichnung des oberen Egertales. *Bayreuther Forum Ökologie* **100**, 70 S.
- Foken, T. und B. Wichura (1996): Tools for quality assessment of surface-based flux measurements. *Agricultural and Forest Meteorology* **78 (1-2)**, 83-105.
- Friedlander, S. K. (2000): Smoke, Dust, and Haze – Fundamentals of Aerosol Dynamics. New York und Oxford, Oxford University Press, 407 S.
- Fuzzi, S., M. C. Facchini, G. Orsi, G. Bonforte, W. Martinotti, G. Ziliani, P. Mazzali, P. Rossi, P. Natale, M. M. Grosa, E. Rampado, P. Vitali, R. Raffaelli, G. Azzini und S. Grotti (1996): The NEVALPA project: A regional network for fog chemical climatology over the Po Valley basin. *Atmospheric Environment* **30**, 201-213.
- Fuzzi, S., M. C. Facchini, S. Decesari, E. Matta und M. Mircea (2002): Soluble organic compounds in fog and cloud droplets: what have we learned over the past few years? *Atmospheric Research* **64**, 89-98.
- Gallagher, M. W., K. Beswick und T. W. Choularton (1992): Measurements and Modelling of Cloudwater Deposition to Moorland and Forests. *Environmental Pollution* **75**, 97-107.
- Garratt, J. R. (1992): The atmospheric boundary layer. Cambridge u.a., Cambridge University Press, 316 S.
- Geissbühler, P., R. Siegwolf und W. Eugster (2000): Eddy Covariance Measurements on Mountain Slopes: The Advantage of surface-normal Sensor Orientation over a vertical Set-up. *Boundary-Layer Meteorology* **96**, 371-392.

- Gerber, H., G. Frick und A. R. Rodi (1999): Ground-based FSSP and PVM measurements of liquid water content. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* **16**, 1143-1149.
- Gerstberger, P. (2001b): Naturräumliche und geomorphologische Übersicht über das Fichtelgebirge. In: Gerstberger, Pedro (Hrsg.): Waldökosystemforschung in Nordbayern: Die BITÖK-Untersuchungsflächen im Fichtelgebirge und Steigerwald. Bayreuth, *Bayreuther Forum Ökologie* **90**, 1-4.
- Gerstberger, P. (2003): Persönliche Mitteilung.
- Gerstberger, P. (Hrsg., 2001a): Waldökosystemforschung in Nordbayern: Die BITÖK-Untersuchungsflächen im Fichtelgebirge und Steigerwald. *Bayreuther Forum Ökologie* **90**, 194 S.
- Goss, K.-U. (1994): Predicting the Enrichment of Organic Compounds in Fog Caused by Adsorption on Water Surface. *Atmospheric Environment* **28**, 3513-3517.
- Grißbaum, F. (2002): Chemistry of Cloud Interstitial Aerosol Particles: Sample Collection for Ion Chromatography (IC), Scanning Electron Microscopy (SEM), and Carbon (TC, EC, BC and OC) analysis. Diplomarbeit, Bayreuther Institut für Terrestrische Ökosystemforschung, Abteilung Klimatologie, Universität Bayreuth, 78 S.
- Grunow, J. (1955): Der Nebelniederschlag im Bergwald. *Forstwissenschaftliches Centralblatt* **74**, 21-36.
- Held, A., T. Wrzesinsky, A. Mangold, J. Gerchau und O. Klemm (2002): Atmospheric phase distribution of oxidized and reduced nitrogen at a forest ecosystem research site. *Chemosphere* **48**, 697-706.
- Herckes, P., R. Wendling, N. Sauret, P. Mirabel und H. Wortham (2002): Cloudwater studies at a high elevation site in the Vosges Mountains (France). *Environmental Pollution* **117**, 169-177.
- Herterich, R. (1987): Eignung und Anwendung von Rotating Arm Collectoren zur Bestimmung von Nebel Eigenschaften – Flüssigwassergehalt, ionische Spurenstoffe, Wasserstoffperoxid. Diplomarbeit an der Universität Bayreuth: Lehrstuhl für Hydrologie, 85 S.
- Herterich, R. und D. Paffrath (1988): Untersuchung des Schadstoffgehaltes von Nebelwasserproben aus dem Fichtelgebirge mit einem Rotationsimpaktor. *DVFLR-Forschungsbericht* **88-35**, 67 S.
- Hottenroth, S. (2001): Nitrophenole im Nebel: Analytik und Interpretation atmosphärischer Parameter. Diplomarbeit, Lehrstuhl für Umweltchemie und Ökotoxikologie, Universität Bayreuth, 127 S.
- Hottenroth, S., A. Römpf, W. Völkel, W. Wieprecht, T. Wrzesinsky, O. Klemm und H. Frank (2001): Nitrophenols and Haloacetates in Fog and Rain. 2nd Conference on Fog and Fog Collection, St. John's, Canada: 15. - 20. Juli 2001, 89-92.
- Kaimal, J. C. und J. J. Finnigan (1994): Atmospheric boundary layer flows: Their structure and measurement. New York, Oxford University Press, 289 S.
- Kaimal, J. C., J. C. Wyngaard, Y. Izumi und O. R. Coté (1972): Spectral Characteristics of Surface Layer Turbulence. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* **98**, 563-589.

- Kasper, A., H. Puxbaum, B. Brandtner und S. Paleczek (1998): Scavenging efficiency of lead and sulfate in supercooled clouds at Sonnblick, 3106 m a.s.l., Austria. *Atmospheric Environment* **32**, 3967-3974.
- Klemm, O. (1983): Untersuchung winterlicher Niederschläge in der Nähe eines Großemittenten auf PCA, Spurenmetalle und Säureinhaltsstoffe in Abhängigkeit von der Witterung. Diplomarbeit, Lehrstuhl für Hydrologie, Universität Bayreuth, 70 S.
- Klemm, O. (2001): Trends in Fog Composition at a Site in NE Bavaria. 2nd Conference on Fog and Fog Collection, St. John's, Canada: 15. - 20. Juli 2001, 73-76.
- Klemm, O. (2004): Trace gases and particles in the atmospheric boundary layer at the Waldstein site: Present state and historic trends. In: Matzner, E. (Hrsg.) Temperate forest ecosystem functioning in a changing environment - watershed studies in Germany. Springer Ecological Studies, in press.
- Klemm, O. und H. Lange (1999): Trends of Air Pollution in the Fichtelgebirge Mountains, Bavaria. *Environmental Science and Pollution Research* **6**, 193-199.
- Klemm, O., A. S. Bachmeier, R. W. Talbot und K. I. Klemm (1994): Fog chemistry at the New England coast: Influence of air mass history. *Atmospheric Environment* **28**, 1181-1188.
- Kowalski, A. (1996): Occult Cloudwater Deposition to a Forest in Complex Terrain: Measurement and Interpretation. Doktorarbeit, Oregon State University, Atmospheric Sciences, 208 S.
- Kowalski, A. S., P. M. Anthoni, R. J. Vong, A. C. Delany und G. D. Maclean (1997): Deployment and evaluation of a system for ground-based measurement of cloud liquid water turbulent fluxes. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* **14**, 468-479.
- Langusch, J., B. Borcken, M. Armbruster, N. B. Dise und E. Matzner (2003): Canopy leaching of cations in Central European forest ecosystems - a regional assessment. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* **166**, 168-174.
- Larrain, H., P. Cereceda, R. Pinto, P. Lázaro, P. Osses und R. S. Schemenauer (2001): Archaeological Observations at a Coastal Fog-site in Alto Patache, South of Iquique, Northern Chile. 2nd Conference on Fog and Fog Collection, St. John's, Canada: 15. - 20. Juli 2001, 289-292.
- Lovett, G. M. (1984): Rates and Mechanisms of Cloud Water Deposition to a Subalpine Balsam Fir Forest. *Atmospheric Environment* **18**, 361-371.
- Malberg, H. (2002): Meteorologie und Klimatologie – Eine Einführung. Berlin u. a., Springer, 364 S.
- Manderscheid, B., U. Hell, K. Moritz und C. Alewell (2001): Daten zum Stoffhaushalt im Einzugsgebiet 'Lehstenbach'. In: Gerstberger, Pedro (Hrsg.): Waldökosystemforschung in Nordbayern: Die BITÖK-Untersuchungsflächen im Fichtelgebirge und Steigerwald. Bayreuth, *Bayreuther Forum Ökologie* **90**, 37-58.
- Mangold, A. (1999): Untersuchung der lokalen Einflüsse auf die Turbulenzmessungen an der Station Weidenbrunnen. Diplomarbeit, Lehrstuhl für Hydrologie, Universität Bayreuth, 175 S.

- Mauder, M. (2002): Auswertung von Turbulenzmessgerätevergleichen unter besonderer Berücksichtigung von EBEX-2000. Diplomarbeit, Abteilung Mikrometeorologie, Universität Bayreuth, 87 S.
- Mengel, K., H. J. Lzu und M. T. Breininger (1987): Auswaschung von Nährstoffen durch sauren Nebel aus jungen intakten Fichten (*Picea abies* (L.) KARSTÉ). *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde* **150**, 61-68.
- Mind'áš, J. und J. Škvarenina (1995): Chemical composition of fog cloud and rain snow water in Biosphere Reserve Pol'ana. *Ekologia-Bratislava* **14**, 125-137.
- Moser, K. (2003): persönliche Mitteilung.
- Olivier, J. (2002): Fog-water harvesting along the West Coast of South Africa: A feasibility study. *Water SA* **28**, 349-360.
- Olivier, J. und C. J. de Rautenbach (2002): The implementation of fog water collection systems in South Africa. *Atmospheric Research* **64**, 227-238.
- Pahl, S. (1996): Feuchte Deposition auf Nadelwälder in den Hochlagen der Mittelgebirge. *Berichte des Deutschen Wetterdienstes* **198**, 137 S.
- Rebmann, C., P. Anthoni, E. Falge, M. Göckede, A. Mangold, J.-A. Subke, C. Thomas, B. Wichura, E.-D. Schulze, J. Tenhunen und T. Foken (2004): Carbon Budget of a Spruce Forest. In: Matzner, E. (Hrsg., 2004): Biogeochemistry of forested catchments in a changing environment: a case study in NE Bavaria, Germany. Springer, *Ecological Studies*, in Vorbereitung.
- Rehfuess, K. E. (1981): Über die Wirkung saurer Niederschläge im Waldökosystem. *Forstwissenschaftliches Centralblatt* **100**, 363-381.
- Röhm (2002): Produktbeschreibung Plexiglas® GS Plexiglas® XT. pdf-Dokument, Internet: URL http://www.roehm.de/en/plexiglas/_download/download/plexiglas.Par.0004.TRow.0003.TCell.0002.File.tmp/211-1%20PLEXIGLAS%AE%20GS+XT_d.pdf. Stand: 2003-02-25.
- Römpp, A. (1999): Haloacetate und Nitrophenole im Nebel. Diplomarbeit, Lehrstuhl für Umweltchemie und Ökotoxikologie, Universität Bayreuth, 121 S.
- Römpp, A., O. Klemm, W. Fricke und H. Frank (2001): Haloacetates in fog and rain. *Environmental Science & Technology* **35**, 1294-1298.
- Scheer, C. (2002): Evaluierung eines Modells zur Nebeldeposition in Mittelgebirgen. Diplomarbeit, Abteilung Klimatologie, Bayreuther Institut für Terrestrische Ökosystemforschung (BITÖK), Universität Bayreuth, 63 S.
- Schemenauer, R. S. und P. Cereceda (1992): Monsoon Cloudwater Chemistry on the Arabian Peninsula. *Atmospheric Environment Part a-General Topics* **26**, 1583-1587.
- Schemenauer, R. S., C. M. Banic und N. Urquizo (1995): High-Elevation Fog and Precipitation Chemistry in Southern Quebec, Canada. *Atmospheric Environment* **29**,: 2235-2252.

- Schrimppf, E., O. Klemm, R. Eiden, T. Frevert und R. Herrmann (1984): Anwendung eines Grunow-Nebelfängers zur Bestimmung von Schadstoffgehalten in Nebelniederschlägen. *Staub – Reinhaltung der Luft* **44**, 72-75.
- Seinfeld, J. H. und S. N. Pandis (1998): *Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change*. New York u. a., Wiley, 1326 S.
- Shapiro, S. S. und M. B. Wilk (1965): An analysis of variance test for normality (complete samples). *Biometrika* **52**, 591-611.
- Stull, R. B. (1988): *An Introduction to Boundary Layer Meteorology*. Dordrecht u.a., Kluwer Academic Press, 666 S.
- Tanner, C. B. und G. W. Thurtell (1969): Anemoclinometer Measurements of Reynolds Stress and Heat Transport in the Atmospheric Surface Layer. University of Wisconsin Tech. Rep. ECOM-66-G22-F, 82 S., zitiert in [Foken 2003a].
- Tesař, M., V. Eliáš und M. Šír (1995): Preliminary results of characterization of cloud and fog water in the mountains of southern and northern Bohemia. *Journal of Hydrology and Hydromechanics* **43**, 412-426.
- Thalmann, E. (2001): Comparison of Wet and Occult Deposition. Diplomarbeit, Philosophisch-naturwissenschaftliche Fakultät, Universität Bern, Schweiz, 118 S.
- Thalmann, E., R. Burkard, T. Wrzesinsky, W. Eugster und O. Klemm (2002): Ion fluxes from fog and rain to an agricultural and a forest ecosystem in Europe. *Atmospheric Research* **64**, 147-158.
- Trautner, F. (1988): Entwicklung und Anwendung von Meßsystemen zur Untersuchung der chemischen und physikalischen Eigenschaften von Nebelwasser und dessen Deposition auf Fichten. Dissertation an der Universität Bayreuth, 160 S.
- Trautner, F., J. Burkhardt und R. Eiden (1992): Untersuchungen zur Deposition von Nebelwasser und Nebelwasserinhaltsstoffen auf Fichten. *Annalen der Meteorologie* **27**, 102-103.
- Vaisala (2001): Present Weather Detector PWD11 User's Guide. Helsinki, Vaisala Oyi, 119 S.
- Verhoeven, W., R. Herrmann, R. Eiden und O. Klemm (1987) A Comparison of the Chemical Composition of Fog and Rainwater Collected in the Fichtelgebirge, Federal Republic of Germany, and from South Island of New Zealand. *Theoretical and Applied Climatology* **38**, 210-221.
- Vermeulen, A. T., G. P. Wyers, F. G. Romer, G. P. J. Draaijers, N. F. M. van Leeuwen und J. W. Erisman (1995): Fog deposition on Douglas fir forest. *Studies in Environmental Science* **64**, 453-4.
- Vermeulen, A. T., G. P. Wyers, F. G. Romer, N. F. M. VanLeeuwen, G. P. J. Draaijers und J. W. Erisman (1997): Fog deposition on a coniferous forest in The Netherlands. *Atmospheric Environment* **31**, 375-386.
- Zhang, Q. und C. Anastasio (2001): Chemistry of fog waters in California's Central Valley - Part 3: concentrations and speciation of organic and inorganic nitrogen. *Atmospheric Environment* **35**, 5629-5643.
- Vong, R. J. und A. S. Kowalski (1995): Eddy correlation measurements of size-dependent cloud droplet turbulent fluxes to complex terrain. *Tellus* **47B**, 331-52.

- Wichura, B., N. Buchmann, T. Foken, A. Mangold, G. Heinz und C. Rebmann (2001): Pools und Flüsse des stabilen Kohlenstoffisotopes ^{13}C zwischen Boden, Vegetation und Atmosphäre in verschiedenen Pflanzengemeinschaften des Fichtelgebirges. *Bayreuther Forum Ökologie* **84** 123-153.
- Wrzesinsky, T. (1998): Sommerlicher Nebel im Fichtelgebirge: Häufigkeit und chemische Zusammensetzung. Diplomarbeit, Bayreuther Institut für Terrestrische Ökosystemforschung, Abteilung Klimatologie, Universität Bayreuth, 128 S.
- Wrzesinsky, T. und O. Klemm (2000): Summertime fog chemistry at a mountainous site in central Europe. *Atmospheric Environment* **34**, 1487-1496.
- Zimmermann, L. und F. Zimmermann (2002): Fog deposition to Norway Spruce stands at high-elevation sites in the Eastern Erzgebirge (Germany). *Journal of Hydrology* **256**, 166-175.

Anhang A: Nebelereignisse: Probenbezeichnung, Sammeldaten

Bezeichnung ¹	Art ²	Probenahme ³	Sammelbeginn ⁴	Sammelende ¹	Sammelzeit ⁵	Nebelzeit ⁶	Sammeler ein/aus ⁷	Sammelmenge ⁸ ml
		MEZ	MEZ	MEZ	hh:mm	hh:mm		
N001	P		2000-02-02 08:40	2000-02-02 09:43	01:02			138,1
N002	P		2000-02-02 15:51	2000-02-03 12:31	11:34			141,7
N003	P		2000-02-04 21:59	2000-02-05 11:00	13:00			137,5
N004	P		2000-02-05 11:00	2000-02-05 15:01	04:01			129,3
N005	P		2000-02-07 13:04	2000-02-08 04:50	02:00			19,6
N006	P		2000-02-13 08:41	2000-02-13 09:12	00:22			82,5
N007	P		2000-02-13 11:19	2000-02-14 05:30	08:23			37,0
N008	P		2000-02-15 00:57	2000-02-15 16:01	09:14			132,8
N009	P		2000-02-16 12:42	2000-02-16 13:04	00:21			21,6
N010	P		2000-02-19 04:12	2000-02-20 09:42	28:03			130,6
N011	P							96,0
N012	P							75,7
N013	P		2000-02-29 00:35	2000-02-29 03:53	01:11			16,4
N014	P		2000-03-01 17:58	2000-03-02 09:30	13:27			198,7
N015	P		2000-03-03 19:26	2000-03-04 10:12	14:20			77,0
N016	P							72,2
N017	P	2000-03-08 16:00	2000-03-08 01:47	2000-03-08 16:00	14:12			145,4
N018	P	2000-03-09 09:55	2000-03-08 16:00	2000-03-09 09:55	17:55			120,6
N019	P	2000-03-09 16:40	2000-03-09 09:55	2000-03-09 12:58	03:03			99,3
N020	B	2000-03-10 14:00						
N021	P	2000-03-11 16:30	2000-03-10 23:52	2000-03-11 13:31	12:35			141,8
N022	P	2000-03-14 09:52	2000-03-14 04:59	2000-03-14 09:52	04:52			108,2
N023	P	2000-03-14 17:00	2000-03-14 09:52	2000-03-14 17:00	07:08			107,1
N024	P	2000-03-15 15:30	2000-03-15 17:00	2000-03-15 13:18	03:22			125,8
N025	B	2000-03-16 16:30						
N026	P	2000-03-17 10:36	2000-03-16 23:19	2000-03-17 10:36	09:38			135,0
N027	P	2000-03-18 10:25	2000-03-18 10:36	2000-03-18 05:04	13:36			94,4
N028	P	2000-03-19 10:20	2000-03-19 19:19	2000-03-19 06:23	07:24			119,4
N029	B	2000-03-20 17:00						
N030	P	2000-03-21 18:15	2000-03-21 00:40	2000-03-21 05:48	04:13			113,4
N031	P	2000-03-25 17:45	2000-03-25 06:23	2000-03-25 10:32	04:04			90,6
N032	P	2000-03-28 09:16	2000-03-27 17:03	2000-03-28 09:16	16:12			122,6
N033	P	2000-03-28 14:49	2000-03-28 09:16	2000-03-28 14:48	05:32			120,9
N034	P	2000-03-29 16:00	2000-03-28 17:11	2000-03-29 00:02	04:03			86,8
N035	P	2000-03-30 15:18	2000-03-30 07:01	2000-03-30 15:18	06:49			119,5
N036	P	2000-04-06 18:00	2000-04-05 13:09	2000-04-05 20:47	06:47			103,8
N037	P	2000-04-12 18:15	2000-04-12 01:01	2000-04-12 07:11	06:10			100,0

¹ Name der Probe aus dem Kürzel „N“ und einer laufenden Nummer

² P ... beprobtes Nebelereignis, B ... Feldblindwert

³ Zeitpunkt der Probensicherung (Abholung vom Waldstein)

⁴ Beginn bzw. Ende des Nebelereignisses bzw. Wechseltermin des Autosamplers für die aktuelle Flasche

⁵ Nettosammelzeit des BCC (Datenaufzeichnung im BCC)

⁶ Andauer von Nebel mit Sichtweiten kleiner 500 m während des Ereignisses

⁷ Anzahl der Ein- und Auschaltvorgänge des BCC während des Ereignisses

⁸ > ... Sammelflasche übergelaufen. Die Flaschen konnten maximal ca. 1075 ml fassen.

Bezeichnung	Art	Probenahme	Sammelbeginn	Sammelende ¹	Sammelzeit	Nebelzeit	Sammlein/aus	Sammelmenge ml
		MEZ	MEZ	MEZ	hh:mm	hh:mm		
N038	P	2000-04-14 13:30	2000-04-14 00:13	2000-04-14 01:47	00:50			24,6
N039	B	2000-04-15 16:00						
N040	B	2000-04-18 09:17						
N041	P	2000-04-19 13:04	2000-04-19 06:22	2000-04-19 13:04	03:25			119,6
N042	P	2000-04-20 07:40	2000-04-20 13:04	2000-04-19 20:41	05:01			101,9
N043	B	2000-04-21 10:00						
N044	P	2000-04-25 07:20	2000-04-24 09:26	2000-04-25 06:55	17:20			142,2
N045	B	2000-04-26 14:25						
N046	B	2000-05-05 14:00						
N047	B	2000-05-11 14:55						
N048	B	2000-05-17 08:40						
N049	P	2000-05-28 10:00	2000-05-27 13:11	2000-05-28 05:22	01:19			44,1
N050	B	2000-05-28 10:15						
N051	P	2000-05-31 16:30	2000-05-31 06:17	2000-05-31 10:32	01:19			8,7
N052	P	2000-06-06 08:05	2000-06-06 04:28	2000-06-06 07:52	02:09			105,3
N053	P	2000-06-07 14:20	2000-06-07 06:10	2000-06-07 06:50	00:40			35,3
N054	P	2000-06-11 09:45	2000-06-11 06:00	2000-06-11 09:40	03:40			139,4
N055	P	2000-06-13 09:10	2000-06-11 21:30	2000-06-12 06:00	08:30			133,5
N056	P	2000-06-14 14:10	2000-06-14 05:36	2000-06-14 08:26	02:57			77,3
N057	P	2000-06-25 08:33	2000-06-25 03:27	2000-06-25 08:30	03:39			93,5
N058	P	2000-06-26 07:35	2000-06-25 23:37	2000-06-26 05:59	06:03			136,1
N059	B	2000-06-28 12:50						
N060	P	2000-07-03 10:30	2000-07-03 03:52	2000-07-03 09:47	00:12			89,4
N061	P	2000-07-08 10:00	2000-07-07 19:19	2000-07-08 04:32	15:40			290,3
N062	P	2000-07-10 08:00	2000-07-09 00:59	2000-07-09 06:30	02:00			152,0
N063	P	2000-07-14 10:00	2000-07-14 03:33	2000-07-14 10:13	06:00			400,0
N064	P	2000-07-15 13:00	2000-07-14 14:15	2000-07-15 06:41	09:00			142,2
N065	P	2000-07-16 15:00	2000-07-16 03:16	2000-07-16 12:36	04:01			139,4
N066	P	2000-07-17 12:30	2000-07-17 05:50	2000-07-17 09:42	05:50			136,7
N067	B	2000-07-20 10:57						
N068	P	2000-07-21 16:55			07:04			46,2
N069	P	2000-07-27 12:25			10:41			1 066,4
N070	P	2000-07-29 16:44			11:23			615,4
N071	P	2000-07-31 07:45			11:05			>
N072	P	2000-08-04 11:30			02:15			96,6
N073	P	2000-08-08 07:40			02:33			204,0
N074	B	2000-08-08 07:50						
N075	P	2000-08-09 09:10			08:08			600,0
N076	P	2000-08-22 14:50			05:09			296,8
N077	P	2000-08-28 15:30			06:33			300,0
N078	P	2000-09-03 10:13			10:18			509,1
N079	P	2000-09-04 07:45			05:18			191,6
N080	P	2000-09-07 13:55			11:50			603,4
N081	P	2000-09-08 09:30			07:21			527,3
N082	P	2000-09-14 10:00			03:01			110,3
N083	P	2000-09-17 14:15			09:44			680,0

Bezeichnung	Art	Probenahme	Sammelbeginn	Sammelende ¹	Sammelzeit	Nebelzeit	Sammler	Sammelmenge
		MEZ	MEZ	MEZ	hh:mm	hh:mm	ein/aus	ml
N084	P	2000-09-18 08:17			06:49			689,3
N085	P	2000-09-18 15:45			02:06			111,2
N086	B	2000-09-18 15:53						
N087	P	2000-09-19 10:34			13:08			774,5
N088	P	2000-09-19 15:45			01:54			79,0
N089	P	2000-09-20 15:00			09:24			446,1
N090	P	2000-09-21 10:55			06:43			240,6
N091	P	2000-09-22 09:45			18:03			>
N092	P	2000-09-23 11:10			16:46			503,8
N093	P	2000-09-24 14:05			06:31			321,8
N094	P	2000-09-25 08:49			05:01			444,1
N095	P	2000-09-26 12:40			05:48			300,0
N096	P	2000-09-29 11:20			14:03			538,4
N097	P	2000-10-02 08:08			12:35			765,3
N098	P	2000-10-03 10:35			02:22			62,2
N099	P	2000-10-04 13:30			03:44			69,0
N100	P	2000-10-05 16:05						150,0
N101	P	2000-10-06 09:00						700,0
N102	P	2000-10-08 08:13						>
N103	P	2000-10-10 08:40						300,0
N104	P	2000-10-14 10:05						400,0
N105	P	2000-10-15 13:35						>
N106	P	2000-10-19 09:14						200,0
N107	P	2000-10-20 14:30						550,0
N108	P	2000-10-21 09:20						100,0
N109	P	2000-10-24 11:20						50,0
N110	P	2000-10-26 13:40						255,0
N111	P	2000-10-27 13:10						80,0
N112	B	2000-10-30 10:00						
N113	P	2000-11-04 14:30						450,0
N114	P	2000-11-07 13:30						200,0
N115	P	2000-11-29 09:20						>
N116	P	2000-11-30 10:40						800,0
N117	P	2000-12-01 14:26						>
N118	P	2000-12-04 09:37						>
N119	P	2000-12-05 10:30						282,9
N120	P	2000-12-11 12:00	2000-12-05 13:30	2000-12-06 20:00	30:30			923,9
N121	P	2000-12-11 12:00	2000-12-06 20:00	2000-12-07 04:00	08:00			312,4
N122	P	2000-12-11 12:00	2000-12-07 04:00	2000-12-07 12:00	08:00			362,5
N123	P	2000-12-11 12:00	2000-12-07 12:00	2000-12-07 20:00	08:00			468,8
N124	P	2000-12-11 12:00	2000-12-07 20:00	2000-12-08 12:00	16:00			288,1
N125	P	2000-12-11 12:00	2000-12-09 04:00	2000-12-09 12:00	08:00			193,4
N126	P	2000-12-11 12:00	2000-12-09 12:00	2000-12-09 20:00	08:00			23,8
N127	P	2000-12-11 12:00	2000-12-09 20:00	2000-12-10 04:00	08:00			279,3
N128	P	2000-12-11 12:00	2000-12-11 04:00	2000-12-11 12:00	08:00			193,8
N129	P	2000-12-19 09:55	2000-12-12 12:00	2000-12-12 20:00	08:00			231,3

Bezeichnung	Art	Probenahme	Sammelbeginn	Sammelende ¹	Sammelzeit	Nebelzeit	Sammlein/aus	Sammelmenge ml
		MEZ	MEZ	MEZ	hh:mm	hh:mm		
N130	P	2000-12-19 09:55	2000-12-13 20:00	2000-12-14 04:00	08:00			73,7
N131	P	2000-12-19 09:55	2000-12-14 12:00	2000-12-14 20:00	08:00			68,5
N132	P	2000-12-19 09:55	2000-12-14 20:00	2000-12-15 12:00	16:00			41,2
N133	P	2000-12-19 09:55	2000-12-15 12:00	2000-12-15 20:00	08:00			86,7
N134	P	2000-12-27 15:40	2000-12-19 12:00	2000-12-20 00:00	12:00			56,9
N135	P	2000-12-27 15:40	2000-12-26 12:00	2000-12-27 00:00	12:00			125,0
N136	P	2000-12-27 15:40	2000-12-27 00:00	2000-12-27 12:00	12:00			162,0
N137	P	2000-12-27 15:40	2000-12-27 12:00	2000-12-27 15:40	03:40			51,6
N138	P	2001-01-04 12:20	2000-12-27 16:00	2000-12-29 00:00	32:00			427,0
N139	P	2001-01-04 12:20	2001-01-02 00:00	2001-01-03 00:00	24:00			93,5
N140	P	2001-01-04 12:20	2001-01-03 00:00	2001-01-03 16:00	16:00			188,7
N141	P	2001-01-04 12:20	2001-01-04 00:00	2001-01-04 12:20	12:20			82,8
N142	P	2001-01-15 09:30	2001-01-07 01:00	2001-01-07 13:00	12:00			214,8
N143	P	2001-01-15 09:30	2001-01-07 13:00	2001-01-08 01:00	12:00			242,8
N144	P	2001-01-15 09:30	2001-01-08 01:00	2001-01-08 13:00	12:00			334,5
N145	P	2001-01-15 09:30	2001-01-08 13:00	2001-01-09 01:00	12:00			388,5
N146	P	2001-01-15 09:30	2001-01-09 01:00	2001-01-09 13:00	12:00			253,9
N147	P	2001-01-15 09:30	2001-01-09 13:00	2001-01-10 01:00	12:00			280,5
N148	P	2001-01-15 09:30	2001-01-10 13:00	2001-01-11 13:00	24:00			67,3
N149	P	2001-01-15 09:30	2001-01-12 13:00	2001-01-13 01:00	12:00			46,9
N150	P	2001-02-12 09:00	2001-02-04 00:00	2001-02-04 12:00	12:00			557,2
N151	P	2001-02-12 09:00	2001-02-04 12:00	2001-02-05 00:00	12:00			423,8
N152	P	2001-02-12 09:00	2001-02-05 00:00	2001-02-05 12:00	12:00			98,0
N153	P	2001-02-12 09:00	2001-02-05 12:00	2001-02-06 12:00	24:00			214,7
N154	P	2001-02-12 09:00	2001-02-09 12:00	2001-02-11 00:00	36:00			230,3
N155	B	2001-02-12 09:00	2001-02-12 09:09	2001-02-12 09:11	00:02			
N156	P	2001-02-20 09:20	2001-02-13 04:00	2001-02-13 12:00	08:00			531,7
N157	P	2001-02-20 09:20	2001-02-13 12:00	2001-02-13 20:00	08:00			56,5
N158	P	2001-02-20 09:20	2001-02-17 04:00	2001-02-17 20:00	16:00			243,0
N159	P	2001-02-20 09:20	2001-02-17 20:00	2001-02-18 20:00	24:00			89,8
N160	P	2001-02-20 09:20	2001-02-18 20:00	2001-02-19 20:00	24:00			218,5
N161	P	2001-02-20 09:20	2001-02-19 20:00	2001-02-20 04:00	08:00			141,6
N162	P	2001-02-20 09:20	2001-02-20 04:00	2001-02-20 09:20	05:20			111,1
N163	P	2001-03-19 13:00	2001-03-08 22:00	2001-03-09 06:00	08:00			153,1
N164	P	2001-03-19 13:00	2001-03-09 06:00	2001-03-09 07:18	01:18			122,1
N165	P	2001-03-19 13:00	2001-03-12 08:22	2001-03-12 14:00	05:38			206,4
N166	P	2001-03-19 13:00	2001-03-12 14:00	2001-03-12 22:00	08:00			175,6
N167	P	2001-03-19 13:00	2001-03-12 22:00	2001-03-13 14:00	16:00			304,3
N168	P	2001-03-19 13:00	2001-03-14 14:00	2001-03-15 06:00	16:00			95,5
N169	P	2001-03-19 13:00	2001-03-15 06:00	2001-03-15 14:00	08:00			114,9
N170	P	2001-03-19 13:00	2001-03-15 14:00	2001-03-15 22:00	08:00			91,9
N171	P	2001-03-19 13:00	2001-03-16 06:00	2001-03-16 14:00	08:00			656,5
N172	P	2001-03-19 13:00	2001-03-16 14:00	2001-03-17 06:00	16:00			743,9
N173	P	2001-03-19 13:00	2001-03-17 06:00	2001-03-17 14:00	08:00			653,5
N174	P	2001-03-19 13:00	2001-03-17 14:00	2001-03-17 22:00	08:00			990,5
N175	P	2001-03-19 13:00	2001-03-17 22:00	2001-03-18 06:00	08:00			>

Bezeichnung	Art	Probenahme	Sammelbeginn	Sammelende ¹	Sammelzeit	Nebelzeit	Sammler ein/aus	Sammelmenge ml
		MEZ	MEZ	MEZ	hh:mm	hh:mm		
N176	P	2001-03-19 13:00	2001-03-18 06:00	2001-03-18 22:00	16:00			116,6
N177	P	2001-03-26 07:55	2001-03-21 14:00	2001-03-22 06:00	16:00			418,5
N178	P	2001-03-26 07:55	2001-03-22 06:00	2001-03-22 14:00	08:00			231,4
N179	P	2001-03-26 07:55	2001-03-22 14:00	2001-03-22 22:00	08:00			799,2
N180	P	2001-03-26 07:55	2001-03-22 22:00	2001-03-23 06:00	08:00			147,2
N181	P	2001-03-26 07:55	2001-03-23 06:00	2001-03-23 14:00	08:00			118,4
N182	P	2001-03-26 07:55	2001-03-23 14:00	2001-03-23 22:00	08:00			212,0
N183	P	2001-03-26 07:55	2001-03-23 22:00	2001-03-24 14:00	16:00			58,5
N184	P	2001-03-26 07:55	2001-03-24 22:00	2001-03-25 06:00	08:00			433,1
N185	P	2001-03-26 07:55	2001-03-25 06:00	2001-03-25 14:00	08:00			287,2
N186	P	2001-03-26 07:55	2001-03-25 14:00	2001-03-25 22:00	08:00			154,9
N187	P	2001-03-26 07:55	2001-03-25 22:00	2001-03-26 06:00	08:00			123,5
N188	P	2001-04-02 07:35	2001-03-30 01:00	2001-03-31 01:00	24:00			169,9
N189	P	2001-04-02 07:35	2001-03-31 01:00	2001-03-31 09:00	08:00			370,5
N190	P	2001-04-09 07:40	2001-04-07 00:05	2001-04-07 16:05	02:58	03:00	8	86,0
N191	P	2001-04-18 07:45	2001-04-10 00:00	2001-04-10 08:00	02:33	02:40	1	61,1
N192	P	2001-04-18 07:45	2001-04-10 08:00	2001-04-10 16:00	02:20	02:20	3	69,1
N193	P	2001-04-18 07:45	2001-04-11 00:00	2001-04-11 16:00	08:10	08:10	1	703,5
N194	P	2001-04-18 07:45	2001-04-15 09:00	2001-04-15 17:00	02:28	02:28	10	107,9
N195	P	2001-04-18 07:45	2001-04-15 17:00	2001-04-16 01:00	06:15	06:15	25	615,6
N196	P	2001-04-18 07:45	2001-04-16 01:00	2001-04-16 09:00	06:14	06:15	25	569,8
N197	P	2001-04-18 07:45	2001-04-16 09:00	2001-04-16 17:00	02:27	02:25	11	117,2
N198	P	2001-04-18 07:45	2001-04-16 17:00	2001-04-17 01:00	02:53	02:58	13	44,7
N199	P	2001-04-18 07:45	2001-04-17 01:00	2001-04-17 09:00	06:14	06:15	25	452,0
N200	P	2001-04-18 07:45	2001-04-17 09:00	2001-04-17 17:00	02:28	02:20	12	93,0
N201	P	2001-04-24 12:40	2001-04-18 16:00	2001-04-19 00:00	04:24	04:18	19	129,4
N202	P	2001-04-24 12:40	2001-04-19 00:00	2001-04-20 00:00	01:05	01:02	8	41,5
N203	P	2001-04-24 12:40	2001-04-21 00:00	2001-04-21 08:00	04:13	04:18	17	140,0
N204	P	2001-04-24 12:40	2001-04-21 08:00	2001-04-21 16:00	04:51	04:49	21	53,1
N205	P	2001-04-24 12:40	2001-04-21 16:00	2001-04-22 16:00	06:55	07:02	32	50,6
N206	B	2001-05-08 08:46	2001-05-08 08:42	2001-05-08 08:46				
N207	P	2001-05-07 12:47	2001-05-05 01:00	2001-05-05 09:00	06:45	07:00	7	347,1
N208	P	2001-05-07 12:47	2001-05-05 09:00	2001-05-05 17:00	07:51	07:50	1	337,8
N209	P	2001-05-07 12:47	2001-05-05 17:00	2001-05-06 01:00	08:00	08:00		780,5
N210	P	2001-05-07 12:47	2001-05-06 01:00	2001-05-06 09:00	07:56	07:50		730,4
N211	P	2001-05-07 12:47	2001-05-06 09:00	2001-05-06 17:00	06:31	06:50	6	379,4
N212	P	2001-05-07 12:47	2001-05-06 17:00	2001-05-07 01:00	08:00	08:00		937,6
N213	P	2001-05-07 12:47	2001-05-07 01:00	2001-05-07 09:00	08:00	08:00		>
N214	P	2001-05-07 12:47	2001-05-07 09:00	2001-05-07 12:47	03:47	03:40		422,1
N215	P	2001-05-15 06:45	2001-05-07 13:00	2001-05-07 21:00	08:00	08:00		>
N216	P	2001-05-15 06:45	2001-05-07 21:00	2001-05-08 05:00	08:00	08:00		1 011,5
N217	P	2001-05-15 06:45	2001-05-08 05:00	2001-05-08 13:00	06:18	06:20		512,0
N218	P	2001-05-15 06:45	2001-05-08 21:00	2001-05-09 05:00	01:47	01:30		43,6
N219	P	2001-05-23 10:44	2001-05-16 23:00	2001-05-17 15:00	01:33	01:40	6	49,5
N220	P	2001-05-23 10:44	2001-05-18 23:00	2001-05-19 07:00	08:00	08:00		466,8
N221	P	2001-05-23 10:44	2001-05-19 07:00	2001-05-19 15:00	00:51	00:40	1	64,9

Bezeichnung	Art	Probenahme	Sammelbeginn	Sammelende ¹	Sammelzeit hh:mm	Nebelzeit hh:mm	Sammler ein/aus	Sammelmenge ml
		MEZ	MEZ	MEZ				
N222	B	2001-05-31 08:32	2001-05-31 08:30	2001-05-31 08:32				
N223	P		2001-06-01 01:00	2001-06-01 09:00	02:04	02:10	3	39,5
N224	P		2001-06-02 09:00	2001-06-03 01:00	03:29	03:40	12	250,0
N225	P		2001-06-03 01:00	2001-06-03 17:00	03:17	03:20	1	375,0
N226	P		2001-06-03 17:00	2001-06-04 17:00	06:55	06:50	3	375,0
N227	P		2001-06-08 10:00	2001-06-08 18:00	01:27	01:30	1	38,2
N228	P		2001-06-08 18:00	2001-06-09 02:00	05:04	05:10	9	228,2
N229	P		2001-06-09 02:00	2001-06-09 10:00	02:58	03:00		185,4
N230	P		2001-06-10 02:00	2001-06-10 10:00	06:08	06:20	5	340,8
N231	P		2001-06-10 10:00	2001-06-10 18:00	02:33	02:40	9	82,1
N232	P		2001-06-10 18:00	2001-06-11 02:00	06:13	06:10	5	310,5
N233	P		2001-06-11 02:00	2001-06-11 10:00	04:57	04:40	2	314,5
N234	P		2001-06-11 10:00	2001-06-11 18:00	00:11	00:10	1	21,3
N235	P		2001-06-11 18:00	2001-06-12 10:00	03:49	04:10	6	250,0
N236	P		2001-06-17 05:00	2001-06-17 13:00	01:36	01:20	3	106,2
N237	P		2001-06-17 21:00	2001-06-18 05:00	04:01	04:20	2	148,7
N238	P		2001-06-18 05:00	2001-06-18 08:14	03:14	03:10		382,3
N239	P		2001-06-18 08:20	2001-06-18 16:20	03:05	03:10	6	173,1
N240	P		2001-06-18 16:20	2001-06-19 00:20	07:04	07:00	3	434,7
N241	P		2001-06-19 00:20	2001-06-19 16:20	06:15	06:20	11	375,0
N242	P		2001-06-20 00:20	2001-06-20 08:20	01:23	01:20	1	35,0
N243	P		2001-06-23 00:20	2001-06-23 08:20	03:02	03:00	1	113,3
N244	P		2001-06-28 21:00	2001-06-29 05:00	06:08		4	399,8
N245	P		2001-06-30 21:00	2001-07-01 05:00	04:12		1	243,3
N246	P		2001-07-01 05:00	2001-07-01 13:00	02:21			141,4
N247	P		?	2001-07-08 09:00				399,8
N248	P		2001-07-08 09:00	2001-07-08 17:00	00:43			243,3
N249	P		2001-07-13 01:00	2001-07-13 09:00	02:14	01:50	7	46,2
N250	P		2001-07-15 01:00	2001-07-15 09:00	02:33	02:30	2	164,9
N251	P		2001-07-15 09:00	2001-07-15 17:00	03:43	03:50	4	248,5
N252	P		2001-07-15 17:00	2001-07-16 01:00	06:38	06:30	3	465,6
N253	P		2001-07-16 01:00	2001-07-16 09:00	08:00	08:00		1 023,5
N254	P		2001-07-16 09:00	2001-07-16 17:00	06:35	06:10	6	495,9
N255	P		2001-07-16 17:00	2001-07-17 01:00	08:00	08:00		996,0
N256	P		2001-07-17 01:00	2001-07-17 09:00	10:09	08:00		>
N257	P		2001-07-17 12:00	2001-07-17 20:00				272,8
N258	P		2001-07-18 20:00	2001-07-19 04:00	02:30	02:30	5	123,2
N259	P		2001-07-19 04:00	2001-07-19 12:00	02:34	02:30	1	225,1
N260	P		2001-07-20 12:00	2001-07-20 20:00				25,0
N261	P		2001-08-11 00:00	2001-08-11 08:00	01:37	01:40	2	60,4
N262	P		2001-08-20 09:00	2001-08-21 01:00	07:38	07:50	4	250,0
N263	P		2001-08-21 01:00	2001-08-21 09:00	05:56	05:50	5	125,0
N264	P		2001-08-21 09:00	2001-08-22 01:00	04:00	04:00	6	375,0
N265	P		2001-08-22 01:00	2001-08-22 09:00	02:51	02:50	1	250,0
N266	P		2001-08-31 01:00	2001-08-31 09:00	03:11	03:20	1	312,9
N267	P		2001-08-31 09:00	2001-08-31 17:00	03:14	03:10		552,6

Bezeichnung	Art	Probenahme	Sammelbeginn	Sammelende ¹	Sammelzeit	Nebelzeit	Sammelerin/aus	Sammelmenge ml
		MEZ	MEZ	MEZ	hh:mm	hh:mm		
N268	P		2001-09-01 01:00	2001-09-01 09:00	05:58	06:10	1	685,6
N269	P		2001-09-01 09:00	2001-09-01 17:00	07:40	07:40	2	684,3
N270	P		2001-09-01 17:00	2001-09-02 01:00	08:00	08:00		864,5
N271	P		2001-09-02 01:00	2001-09-02 09:00	07:58	07:50		406,9
N272	P		2001-09-02 09:00	2001-09-02 17:00	01:54	02:00	6	67,2
N273	P		2001-09-04 01:00	2001-09-04 09:00	00:48	00:50		84,5
N274	P		2001-09-04 09:00	2001-09-04 17:00	00:12		3	63,8
N275	P		2001-09-04 17:00	2001-09-05 01:00	04:09	04:10	5	96,8
N276	P		2001-09-05 01:00	2001-09-05 09:00	07:55	08:00	2	516,7
N277	P		2001-09-05 09:00	2001-09-05 17:00	01:04	01:00	2	83,2
N278	P		2001-09-05 17:00	2001-09-06 01:00	02:43	02:50	1	230,9
N279	P		2001-09-06 01:00	2001-09-06 09:00	05:49	06:30	3	523,0
N280	P		2001-09-06 17:00	2001-09-07 01:00	03:33	03:30	4	343,4
N281	P		2001-09-07 01:00	2001-09-07 09:00	07:14	07:10	3	830,5
N282	P		2001-09-07 09:00	2001-09-07 17:00	02:49	02:40	4	47,4
N283	P		2001-09-07 17:00	2001-09-08 01:00	07:51	07:50	3	961,3
N284	P		2001-09-08 01:00	2001-09-08 09:00	07:29	07:30	4	>
N285	P		2001-09-08 09:00	2001-09-09 01:00	02:17	02:20	2	73,9
N286	P		2001-09-09 01:00	2001-09-09 17:00	01:10	01:20	3	63,5
N287	P		2001-09-10 01:00	2001-09-10 08:41	03:45	03:50	1	420,6
N288	P		2001-09-10 09:00	2001-09-10 17:00	05:12	04:17	3	590,2
N289	P		2001-09-12 14:00	2001-09-12 22:00	17:50			402,7
N290	P		2001-09-12 22:00	2001-09-13 06:00	06:32	06:30	2	339,4
N291	P		2001-09-13 06:00	2001-09-13 14:00	00:12	00:10	1	342,0
N292	P		2001-09-13 14:00	2001-09-13 22:00	02:39	02:40	3	299,6
N293	P		2001-09-13 22:00	2001-09-14 06:00				315,9
N294	P		2001-09-14 06:00	2001-09-15 06:00	06:18	06:20	4	238,8
N295	P		2001-09-15 06:00	2001-09-15 22:00	04:00	04:00	1	665,4
N296	P		2001-09-15 22:00	2001-09-16 06:00	06:34	06:30	2	288,7
N297	P		2001-09-16 06:00	2001-09-16 14:00	03:19	03:10	5	350,1
N298	P		2001-09-16 14:00	2001-09-17 06:00	10:32	10:30	8	741,4
N299	P		2001-09-17 06:00	2001-09-17 07:31	00:38	00:40	1	179,4
N300	P		2001-09-18 08:00	2001-09-18 16:00	02:34	02:20	1	140,7
N301	P		2001-09-21 00:00	2001-09-21 16:00	03:57	04:00	7	136,3
N302	P		2001-09-21 16:00	2001-09-22 08:00	08:10	08:00	4	187,6
N303	P		2001-09-24 00:00	2001-09-24 08:00	01:51	02:00	3	115,8
N304	P		2001-09-24 08:00	2001-09-24 16:00	08:00	01:50		167,4
N305	P		2001-09-24 10:00	2001-09-24 18:00	08:00	08:00		>
N306	P		2001-09-24 18:00	2001-09-25 02:00	07:44	07:50	2	>
N307	P		2001-09-25 02:00	2001-09-25 10:00	07:23	07:30	1	922,1
N308	P		2001-09-25 18:00	2001-09-26 18:00	03:50	03:40	8	66,7
N309	P		2001-09-27 02:00	2001-09-27 18:00	04:52	05:00	2	365,4
N310	P		2001-09-28 02:00	2001-09-28 18:00	05:32	05:40	1	311,0
N311	P		2001-09-30 02:00	2001-09-30 18:00	04:09	04:00	6	230,3
N312	P		2001-09-30 18:00	2001-10-01 18:00	01:42	01:50	3	81,5
N313	P		2001-10-01 16:00	2001-10-02 00:00	00:31	00:30	2	86,9

Bezeichnung	Art	Probenahme	Sammelbeginn	Sammelende ¹	Sammelzeit	Nebelzeit	Sammler ein/aus	Sammelmenge ml
		MEZ	MEZ	MEZ	hh:mm	hh:mm		
N314	P		2001-10-02 00:00	2001-10-02 08:00	02:05	02:20	6	149,9
N315	P		2001-10-03 16:00	2001-10-04 08:00	05:18	05:20	5	461,4
N316	P		2001-10-04 08:00	2001-10-04 16:00	00:54	00:50	2	60,7
N317	P		2001-10-07 08:00	2001-10-07 16:00	01:12	01:20	1	79,3
N318	P		2001-10-07 16:00	2001-10-08 00:00	07:34	07:20	3	728,6
N319	P		2001-10-08 00:00	2001-10-08 08:00	02:15	02:20		147,5
N320	P		2001-10-22 10:00	2001-10-22 18:00	02:47	03:00	4	265,8
N321	P		2001-10-22 18:00	2001-10-23 02:00	07:00	07:00	3	222,5
N322	P		2001-10-23 02:00	2001-10-23 10:00	04:16	04:20	1	578,1
N323	P		2001-10-23 10:00	2001-10-23 18:00	01:36	01:20	3	205,2
N324	P		2001-10-23 18:00	2001-10-24 02:00	05:21	05:30	2	321,5
N325	P		2001-10-24 02:00	2001-10-24 10:00	05:47	05:40	4	505,3
N326	P		2001-10-24 10:00	2001-10-24 18:00	02:39	02:30	3	130,3
N327	P		2001-10-24 18:00	2001-10-25 10:00	05:57	06:20	19	207,1
N328	P		2001-10-25 10:00	2001-10-25 18:00	00:53	00:50	2	60,5
N329	P		2001-10-25 18:00	2001-10-26 02:00	02:45	02:50	4	103,3
N330	P		2001-10-26 02:00	2001-10-26 10:00	00:56	00:50	4	61,7
N331								
N332	P		2001-10-27 02:00	2001-10-27 10:00	02:27	02:30	2	206,0
N333	P		2001-10-27 18:00	2001-10-28 02:00	05:48	06:00	2	251,9
N334	P		2001-10-28 02:00	2001-10-28 10:00	04:09	04:50	6	90,3
N335	P		2001-10-28 10:00	2001-10-28 18:00	06:56	06:50	3	337,8
N336	P		2001-10-28 18:00	2001-10-29 02:00	08:00	08:10		518,1
N337	P		2001-10-29 02:00	2001-10-29 10:00	08:00	08:00		453,0
N338	P		2001-10-29 10:00	2001-10-29 18:00	04:46	04:50	5	247,7
N339	P		2001-10-29 18:00	2001-10-30 10:00	06:19	06:20	3	113,0
N340								
N341	P		2001-10-31 16:00	2001-11-01 16:00	03:35	03:20	5	45,6
N342	P		2001-11-02 00:00	2001-11-02 08:00	08:00	08:00		687,1
N343	P		2001-11-02 08:00	2001-11-02 16:00	05:52	05:50	3	291,8
N344	P		2001-11-02 16:00	2001-11-03 00:00	06:11	06:10		416,3
N345	P		2001-11-03 00:00	2001-11-03 08:00	01:32	01:30	1	87,7
N346	P		2001-11-04 16:00	2001-11-05 00:00	03:26	03:20	6	287,2
N347	P		2001-11-05 00:00	2001-11-05 08:00	08:00	08:00		902,7
N348	P		2001-11-05 08:00	2001-11-05 16:00	04:05	04:10		376,5
N349	P		2001-11-06 08:00	2001-11-06 16:00	01:05	01:00	6	32,7
N350	P		2001-11-06 16:00	2001-11-07 00:00	08:00	08:00		866,3
N351	P		2001-11-07 00:00	2001-11-07 08:00	07:37	07:30	2	342,4
N352	P		2001-11-07 08:00	2001-11-07 16:00	05:03	05:00	5	188,2
N353	P		2001-11-07 16:00	2001-11-08 00:00	05:53	05:50	12	218,6
N354	P		2001-11-08 00:00	2001-11-08 08:00	01:56	01:50	6	216,0
N355	P		2001-11-08 08:00	2001-11-08 16:00	00:00		1	86,8
N356	P		2001-11-08 16:00	2001-11-09 00:00	01:14	01:01	6	62,8
N357	P		2001-11-12 09:00	2001-11-12 17:00	01:28	01:30	2	47,2
N358	P		2001-11-12 17:00	2001-11-13 01:00	07:22	07:31	9	679,6
N359	P		2001-11-13 01:00	2001-11-13 09:00	06:09	06:00	25	399,7

Bezeichnung	Art	Probenahme	Sammelbeginn	Sammelende ¹	Sammelzeit	Nebelzeit	Sammler ein/aus	Sammelmenge ml
		MEZ	MEZ	MEZ	hh:mm	hh:mm		
N360	P		2001-11-16 01:00	2001-11-16 09:00	04:00	03:54	17	228,4
N361	P		2001-11-16 09:00	2001-11-16 17:00	02:27	02:28	9	127,3
N362	P		2001-11-16 17:00	2001-11-17 01:00	00:49	00:46	4	84,4
N363	P		2001-11-17 01:00	2001-11-17 09:00	05:24	05:20	24	363,6
N364a	P		2001-11-17 09:00	2001-11-17 17:00	01:28	01:12	9	18,3
N364	P		2001-11-17 17:00	2001-11-18 01:00	02:46	02:36	14	49,6
N365	P		2001-11-18 01:00	2001-11-18 09:00	06:08	06:07	25	132,8
N366	P		2001-11-18 16:00	2001-11-19 00:00	01:38	01:41	7	135,3
N367	P		2001-11-19 00:00	2001-11-19 08:00	03:47	03:46	16	243,5
N368	P		2001-11-19 08:00	2001-11-19 09:00	00:47	00:46	3	71,9
N369	P		2001-11-19 09:00	2001-11-19 17:00	07:08	07:36	14	690,8
N370	P		2001-11-19 17:00	2001-11-20 01:00	06:28	07:59	22	454,4
N371	P		2001-11-20 01:00	2001-11-20 09:00	04:45	04:50	21	276,6
N372	P		2001-11-20 17:00	2001-11-21 01:00	02:35	02:36	12	135,2
N373	P		2001-11-21 01:00	2001-11-21 09:00	06:06	06:25	25	518,6
N374	P		2001-11-21 09:00	2001-11-21 17:00	02:38	03:00	8	140,5
N375	P		2001-11-22 09:00	2001-11-22 17:00	06:15	06:15	25	88,7
N376	P		2001-11-22 17:00	2001-11-23 01:00	02:21	02:13	10	116,6
N377	P		2001-11-24 09:00	2001-11-24 17:00	01:34		2	192,8
N378	P		2001-12-04 10:00	2001-12-04 18:00	06:15	03:39	25	320,6
N379	P		2001-12-04 18:00	2001-12-05 02:00	08:00	05:50		630,6
N380	P		2001-12-05 02:00	2001-12-05 10:00	07:15	08:00	10	399,3
N381	P		2001-12-05 10:00	2001-12-05 18:00	07:50	02:40	3	83,5
N382	P		2001-12-05 18:00	2001-12-06 02:00	08:00	01:10		267,6
N383	P		2001-12-06 02:00	2001-12-06 10:00	08:00	05:00		666,7
N384	P		2001-12-06 10:00	2001-12-06 18:00	07:14	06:58	11	514,3
N385	P		2001-12-06 18:00	2001-12-07 02:00	06:15	06:23	25	408,4
N386	P		2001-12-07 02:00	2001-12-07 10:00	06:15	06:15	25	308,9
N387	P		2001-12-07 10:00	2001-12-07 18:00	03:20	02:52	14	127,8
N388	P		2001-12-11 01:00	2001-12-11 09:00		04:57		337,7
N389	P		2001-12-11 09:00	2001-12-11 17:00		06:15		444,9
N390	P		2001-12-11 17:00	2001-12-12 01:00		06:15		396,9
N391	P		2001-12-12 01:00	2001-12-12 09:00		06:15		337,5
N392	P		2001-12-12 09:00	2001-12-12 17:00		06:15		420,4
N393	P		2001-12-12 17:00	2001-12-13 01:00		03:54		261,5
N394	P		2001-12-28 23:00	2001-12-29 11:00				133,3
N395	P		2002-01-04 23:00	2002-01-05 23:00				40,6
N396	P		2002-01-06 23:00	2002-01-07 10:55		08:44		261,5
N397	P		2002-01-07 11:00	2002-01-07 19:00		03:07		233,7
N398	P		2002-01-07 19:00	2002-01-08 11:00		10:41		222,7
N399	P		2002-01-08 11:00	2002-01-08 19:00		05:05		122,5
N400	P		2002-01-08 19:00	2002-01-09 03:00		01:10		86,5
N401	P		2002-01-19 08:00	2002-01-19 16:00		02:13		133,0
N402	P		2002-01-19 16:00	2002-01-20 00:00		06:07		655,3
N403	P		2002-01-20 00:00	2002-01-20 08:00		06:07		475,2
N404	P		2002-01-20 08:00	2002-01-20 16:00		06:07		520,6

Bezeichnung	Art	Probenahme	Sammelbeginn	Sammelende ¹	Sammelzeit hh:mm	Nebelzeit hh:mm	Sammlein/aus	Sammelmenge ml
		MEZ	MEZ	MEZ				
N405	P		2002-01-20 16:00	2002-01-21 00:00		06:31		887,1
N406	P		2002-01-21 00:00	2002-01-21 08:00		00:23		899,4
N407	P		2002-01-26 00:00	2002-01-26 08:00		01:20		94,2
N408	P		2002-01-26 08:00	2002-01-26 16:00		02:30		213,9
N409	P		2002-01-27 00:00	2002-01-27 16:00		05:30		760,5
N410	P		2002-01-27 16:00	2002-01-28 00:00		07:50		>
N411	P		2002-01-28 00:00	2002-01-28 08:00		06:20		>
N412	B		2002-01-29 11:00	2002-01-29 11:00				
N413	P		2002-01-29 16:00	2002-01-30 08:00		04:10		205,0
N414	P		2002-01-30 08:00	2002-01-30 16:00		02:20		323,7
N415	P		2002-02-06 16:00	2002-02-07 00:00		05:10		215,5
N416	P		2002-02-07 00:00	2002-02-07 16:00		05:06		112,1
N417	P		2002-02-08 00:00	2002-02-08 08:00		03:00		80,2
N418	P		2002-02-08 08:00	2002-02-08 16:00		07:14		921,9
N419	P		2002-02-08 16:00	2002-02-09 00:00		07:10		845,2
N420	P		2002-02-09 00:00	2002-02-09 08:00		07:00		920,1
N421	P		2002-02-09 08:00	2002-02-09 16:00		03:40		449,1
N422	P		2002-02-09 16:00	2002-02-10 00:00				50,5
N423	P		2002-02-10 00:00	2002-02-10 08:00		03:54		171,2
N424	P		2002-02-10 08:00	2002-02-10 16:00		02:03		105,4
N425	P		2002-02-10 16:00	2002-02-11 08:00		07:00		186,2
N426	P		2002-02-11 08:00	2002-02-11 09:55		01:30		130,6
N427	P		2002-02-11 10:00	2002-02-11 18:00		02:50		173,9
N428	P		2002-02-11 18:00	2002-02-12 02:00		02:50		262,6
N429	P		2002-02-12 02:00	2002-02-12 10:00		05:10		536,7
N430	P		2002-02-12 10:00	2002-02-12 18:00		03:50		544,4
N431	P		2002-02-12 18:00	2002-02-13 02:00		05:20		866,8
N432	P		2002-02-13 02:00	2002-02-13 10:00		06:20		585,2
N433	P		2002-02-13 10:00	2002-02-13 18:00		04:30		185,5
N434	P		2002-02-13 18:00	2002-02-14 02:00		00:30		31,9
N435	P		2002-02-18 18:00	2002-02-19 02:00		05:13		84,7
N436	P		2002-02-20 10:00	2002-02-20 18:00		02:54		444,9
N437	P		2002-02-20 18:00	2002-02-21 10:00		06:07		209,2
N438	P		2002-02-22 18:00	2002-02-23 02:00		06:04		545,6
N439	P		2002-02-23 02:00	2002-02-23 18:00		06:10		210,0
N440	P		2002-02-25 11:00	2002-02-25 19:00		06:48		853,1
N441	P		2002-02-25 19:00	2002-02-26 03:00		06:50		900,7
N442	P		2002-02-26 03:00	2002-02-26 11:00				131,4
N443	P		2002-02-26 11:00	2002-02-26 19:00				105,4
N444	P		2002-02-26 19:00	2002-02-27 03:00		00:20		30,5
N445	P		2002-02-27 03:00	2002-02-27 11:00		00:20		41,1
N446	P		2002-02-27 11:00	2002-02-27 19:00	08:00			185,5
N447	P		2002-02-27 19:00	2002-02-28 03:00	08:00			922,8
N448	P		2002-02-28 03:00	2002-02-28 11:00	08:00			616,1

Anhang B: Chemische Zusammensetzung der Nebelwasserproben – Kationen

Probe	H ⁺		Na ⁺		K ⁺		NH ₄ ⁺		Mg ²⁺		Ca ²⁺	
	mg l ⁻¹	µeq l ⁻¹	mg l ⁻¹	µeq l ⁻¹	mg l ⁻¹	µeq l ⁻¹	mg l ⁻¹	µeq l ⁻¹	mg l ⁻¹	µeq l ⁻¹	mg l ⁻¹	µeq l ⁻¹
N001	0,166	166,0	1,16	50,5	0,53	13,5	7,68	425,8	0,30	24,4	1,03	51,4
N002	0,234	234,4	3,10	134,8	1,08	27,6	19,10	1058,8	0,43	35,5	1,21	60,4
N003	0,186	186,2	2,46	107,0	0,56	14,3	9,62	533,3	0,34	27,6	1,57	78,3
N004	0,132	131,8	2,02	87,9	0,42	10,7	8,41	466,2	0,34	27,9	2,63	131,2
N005												
N006	0,051	51,3	8,09	351,9	0,72	18,4	11,90	659,7	1,08	88,9	1,56	77,8
N007	0,025	24,5	3,07	133,5	0,31	7,9	5,56	308,2	0,39	32,3	0,57	28,2
N008	0,162	162,2	4,28	186,2	0,40	10,2	8,09	448,5	0,48	39,5	0,53	26,6
N009												
N010	0,380	380,2	2,75	119,6	0,35	9,0	8,79	487,3	0,34	27,6	0,49	24,6
N011	0,028	28,2	<	<	<	<	0,55	30,2	<	<	<	<
N012	0,004	4,3	<	<	<	<	0,07	3,7	<	<	<	<
N013												
N014	0,204	204,2	4,44	193,1	0,56	14,3	10,90	604,3	0,46	37,9	0,63	31,5
N015	0,132	131,8	5,27	229,2	0,27	6,9	6,96	385,8	0,66	53,9	1,27	63,4
N016	0,209	208,9	7,58	329,7	0,51	13,1	9,98	553,3	0,84	69,5	0,96	47,9
N017	0,060	60,3	1,31	57,0	0,51	13,1	9,36	518,9	0,15	12,1	0,74	36,9
N018	0,030	30,2	<	<	<	<	4,83	267,8	<	<	<	<
N019	0,015	15,5	0,44	19,2	<	<	8,10	449,0	<	<	0,29	14,6
N020	0,009	8,5	1,65	71,8	<	<	1,37	75,9	0,14	11,3	0,21	10,3
N021	0,102	102,3	1,26	54,8	0,34	8,6	16,10	892,5	0,17	14,3	0,76	37,8
N022	0,245	245,5	0,77	33,5	0,29	7,4	13,70	759,5	0,08	6,9	0,38	19,0
N023	0,076	75,9	0,42	18,3	<	<	11,90	659,7	<	<	0,43	21,3
N024	0,021	20,9	0,65	28,1	0,32	8,1	14,30	792,7	0,13	10,3	1,29	64,4
N025	0,007	6,9	1,35	58,7	<	<	1,22	67,6	0,09	7,8	<	<
N026	0,013	12,9	2,45	106,6	<	<	3,08	170,7	0,26	21,0	0,31	15,7
N027	0,091	91,2	0,48	20,8	<	<	9,73	539,4	0,07	5,4	0,34	16,8
N028	0,081	81,3	1,47	63,9	1,21	30,9	39,30	2178,7	0,26	21,1	1,96	97,8
N029	0,019	19,1	0,46	20,2	<	<	7,92	439,1	<	<	0,38	18,8
N030	0,245	245,5	3,94	171,4	0,53	13,5	31,30	1735,2	0,56	45,8	2,22	110,8
N031	0,031	30,9	2,11	91,8	0,89	22,9	51,90	2877,2	0,34	28,1	2,32	115,8
N032	0,015	15,5	0,41	17,7	<	<	24,70	1369,3	<	<	0,44	22,0
N033	0,019	19,1	0,32	14,1	<	<	23,80	1319,4	<	<	0,45	22,3
N034	0,069	69,2	<	<	0,28	7,1	49,20	2727,5	0,09	7,1	1,35	67,4
N035	0,026	25,7	<	<	<	<	11,00	609,8	<	<	0,57	28,4
N036	0,005	5,1	0,47	20,3	0,30	7,7	25,10	1391,5	0,09	7,5	1,20	59,9
N037	0,035	35,5	0,51	22,1	0,44	11,2	30,50	1690,8	0,11	9,4	1,40	69,9
N038	0,013	12,9	1,91	83,1	0,42	10,8	16,10	892,5	0,20	16,2	1,36	67,9
N039	0,005	4,7	0,32	14,0	<	<	2,71	150,2	<	<	0,28	13,7
N040	0,003	2,8	0,53	23,1	<	<	0,78	43,5	<	<	0,37	18,3
N041	0,102	102,3	0,45	19,5	0,30	7,6	20,00	1108,7	0,10	7,9	0,78	39,1
N042	0,051	51,3	0,33	14,2	0,53	13,5	21,80	1208,5	0,07	6,1	1,35	67,4
N043	0,009	9,1	<	<	<	<	2,43	134,7	<	<	0,67	33,3
N044	0,004	3,6	0,54	23,4	0,29	7,4	6,56	363,7	<	<	1,19	59,4

Probe	H ⁺		Na ⁺		K ⁺		NH ₄ ⁺		Mg ²⁺		Ca ²⁺	
	mg l ⁻¹	µeq l ⁻¹	mg l ⁻¹	µeq l ⁻¹	mg l ⁻¹	µeq l ⁻¹	mg l ⁻¹	µeq l ⁻¹	mg l ⁻¹	µeq l ⁻¹	mg l ⁻¹	µeq l ⁻¹
N045	0,002	2,3	<	<	<	<	1,52	84,3	<	<	0,31	15,3
N046	0,003	3,2	<	<	1,66	42,5	1,96	108,7	0,23	18,5	2,05	102,3
N047	0,003	2,6	0,35	15,2	3,03	77,5	1,85	102,6	0,30	24,7	1,90	94,8
N048	0,002	1,7	0,27	11,9	0,68	17,4	0,95	52,9	0,08	6,9	1,04	51,9
N049	0,018	17,8	2,17	94,4	2,08	53,2	11,30	626,4	0,78	64,0	6,07	302,9
N050	0,006	5,8	0,32	13,8	<	<	1,35	74,8	0,08	6,3	0,74	37,1
N051												
N052	0,052	52,5	1,43	62,2	1,08	27,6	11,10	615,4	0,40	32,5	2,86	142,7
N053	0,417	416,9	1,13	49,2	1,29	33,0	48,40	2683,1	0,41	33,3	2,91	145,2
N054	0,063	63,1	0,40	17,3	0,49	12,4	20,10	1114,3	0,15	12,6	1,01	50,4
N055	0,034	33,9	0,44	19,0	0,26	6,5	20,40	1130,9	0,07	5,9	0,58	28,8
N056	0,046	45,7	0,70	30,2	0,34	8,7	25,60	1419,2	0,14	11,7	1,07	53,4
N057	0,013	12,6	5,52	240,1	3,03	77,5	39,50	2189,8	1,09	89,7	11,40	568,9
N058	0,022	21,9	1,37	59,6	0,51	13,1	15,50	859,3	0,21	17,2	1,17	58,4
N059	0,006	6,5	1,10	47,8	<	<	1,45	80,4	0,10	8,2	0,30	14,9
N060	0,006	5,9	1,30	56,5	0,55	14,1	1,75	97,0	0,28	23,4	2,31	115,3
N061	0,004	3,6	0,32	14,0	<	<	6,57	364,2	<	<	0,70	34,8
N062	0,002	1,6	<	<	<	<	0,53	29,5	<	<	0,24	11,9
N063												
N064	0,056	56,2	0,39	17,1	<	<	6,56	363,7	<	<	0,36	17,8
N065	0,045	44,7	0,52	22,7	<	<	6,58	364,8	<	<	<	<
N066	0,049	49,0	0,22	9,5	<	<	5,05	280,0	<	<	0,27	13,5
N067	0,012	11,7	0,30	13,2	<	<	1,14	63,2	<	<	<	<
N068	0,010	10,5	1,11	48,3	0,50	12,7	3,60	199,6	0,16	13,0	0,94	46,9
N069	0,087	87,1	0,34	14,9	0,48	12,3	15,20	842,6	0,06	4,7	0,70	35,1
N070	0,224	223,9	<	<	0,57	14,6	32,60	1807,2	<	<	0,43	21,6
N071	0,059	58,9	0,30	13,2	0,29	7,5	11,90	659,7	<	<	0,25	12,4
N072	0,195	195,0	1,92	83,5	1,62	41,4	22,30	1236,2	0,40	32,9	2,14	106,8
N073	0,050	50,1	0,66	28,8	0,42	10,8	19,50	1081,0	0,12	9,9	0,95	47,2
N074	0,014	14,5	<	<	<	<	2,22	123,1	<	<	<	<
N075	0,123	123,0	0,32	13,9	0,33	8,5	24,60	1363,7	0,05	4,3	0,60	29,7
N076	0,051	51,3	0,69	29,9	1,27	32,5	9,74	540,0	0,15	12,1	2,25	112,3
N077	0,055	55,0	0,49	21,1	0,51	12,9	16,30	903,6	0,07	6,1	0,94	46,8
N078	0,224	223,9	3,02	131,4	0,80	20,4	16,70	925,8	0,37	30,5	0,93	46,5
N079	0,076	75,9	13,10	569,8	1,02	26,1	16,90	936,9	1,47	121,0	0,90	45,0
N080	0,110	109,6	3,60	156,6	0,53	13,5	10,50	582,1	0,44	36,0	0,73	36,5
N081	0,060	60,3	2,10	91,3	0,30	7,6	13,70	759,5	0,26	21,1	0,79	39,4
N082	0,933	933,3	2,97	129,2	2,24	57,3	58,70	3254,2	0,77	63,6	5,68	283,4
N083	0,081	81,3	0,26	11,4	<	<	6,55	363,1	<	<	0,47	23,4
N084	0,219	218,8	<	<	<	<	11,70	648,6	<	<	0,61	30,3
N085	0,095	95,5	<	<	<	<	7,95	440,7	<	<	<	<
N086	0,019	19,5	<	<	<	<	1,10	61,0	<	<	<	<
N087	0,170	169,8	0,25	10,8	<	<	22,00	1219,6	<	<	0,47	23,4
N088	0,091	91,2	<	<	<	<	20,30	1125,4	<	<	0,34	16,9
N089	0,209	208,9	0,34	15,0	0,42	10,7	26,30	1458,0	<	<	0,96	47,9
N090	0,145	144,5	0,33	14,4	0,56	14,3	19,90	1103,2	0,06	4,6	1,14	56,9
N091	0,076	75,9	<	<	<	<	4,86	269,4	<	<	<	<

Probe	H ⁺		Na ⁺		K ⁺		NH ₄ ⁺		Mg ²⁺		Ca ²⁺	
	mg l ⁻¹	µeq l ⁻¹	mg l ⁻¹	µeq l ⁻¹	mg l ⁻¹	µeq l ⁻¹	mg l ⁻¹	µeq l ⁻¹	mg l ⁻¹	µeq l ⁻¹	mg l ⁻¹	µeq l ⁻¹
N092	0,589	588,8	0,40	17,3	0,77	19,8	22,70	1258,4	0,11	8,8	1,33	66,4
N093	0,182	182,0	0,40	17,4	0,91	23,1	19,80	1097,7	0,08	6,7	0,96	47,9
N094	0,100	100,0	<	<	<	<	9,28	514,5	<	<	0,23	11,5
N095	0,148	147,9	0,69	30,2	0,72	18,5	29,50	1635,4	0,30	24,3	3,75	187,1
N096	0,245	245,5	0,82	35,5	1,23	31,5	46,10	2555,6	0,23	18,7	1,88	93,8
N097	0,407	407,4	0,23	9,9	0,51	13,0	14,10	781,7	0,10	8,4	0,93	46,5
N098	0,398	398,1	3,56	154,9	0,92	23,6	21,30	1180,8	0,51	42,3	1,38	68,9
N099	0,708	707,9	3,91	170,1	1,24	31,7	36,10	2001,3	0,53	43,3	1,37	68,4
N100	0,282	281,8	2,04	88,7	1,43	36,6	47,50	2633,3	0,55	45,4	4,51	225,1
N101	0,309	309,0	0,40	17,6	0,46	11,8	21,50	1191,9	0,12	10,0	1,46	72,9
N102	0,072	72,4	0,83	35,9	<	<	9,48	525,5	0,06	4,6	0,31	15,4
N103	0,138	138,0	0,74	32,1	0,50	12,9	20,50	1136,5	0,12	9,6	0,87	43,3
N104	0,240	239,9	1,25	54,4	1,17	29,9	40,90	2267,4	0,60	49,0	7,86	392,2
N105	0,055	55,0	1,14	49,6	0,92	23,5	20,10	1114,3	0,47	38,4	5,70	284,4
N106	0,117	117,5	1,03	44,8	0,92	23,4	47,50	2633,3	0,18	14,6	1,35	67,4
N107	0,062	61,7	0,21	9,1	0,52	13,3	37,60	2084,4	0,06	5,0	0,89	44,6
N108	0,091	91,2	1,93	84,0	6,08	155,5	114,00	6319,8	0,65	53,8	5,74	286,4
N109	0,309	309,0	1,86	80,9	1,89	48,3	34,10	1890,4	0,36	29,7	2,23	111,3
N110	0,105	104,7	1,47	63,9	0,86	21,9	20,30	1125,4	0,25	20,9	1,74	86,8
N111	0,245	245,5	39,10	1700,8	3,66	93,6	59,10	3276,3	5,10	419,7	9,90	494,0
N112	0,017	17,0	0,32	13,7	<	<	0,57	31,5	<	<	0,31	15,5
N113	0,234	234,4	0,96	41,5	0,44	11,2	15,90	881,4	0,11	8,7	0,62	30,7
N114	0,054	53,7	0,80	34,7	0,98	24,9	23,90	1324,9	0,07	6,1	0,67	33,2
N115	0,129	128,8	4,13	179,6	0,35	8,8	4,41	244,5	0,43	35,5	0,35	17,6
N116	0,051	51,3	0,63	27,4	<	<	4,67	258,9	<	<	<	<
N117	0,017	17,4	<	<	<	<	1,86	103,1	<	<	0,29	14,4
N118	0,110	109,6	0,34	15,0	<	<	6,09	337,6	<	<	<	<
N119	0,120	120,2	<	<	<	<	12,50	693,0	<	<	0,30	14,8
N120	0,013	13,2	<	<	<	<	5,93	328,7	<	<	<	<
N121	0,008	7,8	<	<	<	<	7,69	426,3	<	<	<	<
N122	0,014	14,1	0,26	11,3	0,54	13,7	5,59	309,9	0,07	5,6	0,36	18,0
N123	0,021	21,4	<	<	0,46	11,8	6,22	344,8	<	<	0,21	10,6
N124	0,048	47,9	<	<	0,53	13,5	14,50	803,8	0,09	7,5	0,52	26,0
N125	0,030	29,5	0,20	8,9	0,68	17,5	11,10	615,4	0,13	10,5	0,71	35,4
N126			0,89	38,5	1,16	29,7	18,30	1014,5	0,43	35,1	2,05	102,3
N127	0,051	51,3	0,44	19,3	0,45	11,6	8,40	465,7	0,09	7,0	0,52	26,1
N128	0,039	38,9	8,53	371,0	0,61	15,6	4,42	245,0	0,98	80,3	0,89	44,6
N129	0,056	56,2	4,59	199,7	0,28	7,1	5,75	318,8	0,58	47,7	0,63	31,5
N130	0,011	11,5	11,80	513,3	0,79	20,2	2,53	140,3	1,20	98,7	1,33	66,4
N131	0,148	147,9	5,96	259,2	1,05	26,9	7,97	441,8	0,83	68,0	1,61	80,3
N132	0,135	134,9	3,03	131,8	0,61	15,7	12,00	665,2	0,43	35,7	1,29	64,4
N133	0,355	354,8	2,00	87,0	0,47	11,9	12,30	681,9	0,24	19,6	0,57	28,6
N134	0,851	851,1	5,21	226,6	1,04	26,6	20,30	1125,4	0,59	48,8	0,94	47,1
N135	0,457	457,1	1,61	70,0	2,37	60,6	63,50	3520,2	0,17	13,8	0,75	37,6
N136	0,269	269,2	0,44	19,2	1,78	45,5	35,60	1973,6	<	<	0,21	10,6
N137	0,135	134,9	<	<	0,94	24,0	16,70	925,8	<	<	<	<
N138	0,200	199,5	0,61	26,4	0,74	18,9	12,80	709,6	0,15	12,4	0,65	32,3

Probe	H ⁺		Na ⁺		K ⁺		NH ₄ ⁺		Mg ²⁺		Ca ²⁺	
	mg l ⁻¹	µeq l ⁻¹	mg l ⁻¹	µeq l ⁻¹	mg l ⁻¹	µeq l ⁻¹	mg l ⁻¹	µeq l ⁻¹	mg l ⁻¹	µeq l ⁻¹	mg l ⁻¹	µeq l ⁻¹
N139	0,407	407,4	6,07	264,0	1,89	48,3	30,20	1674,2	0,67	55,5	0,61	30,3
N140	0,200	199,5	1,34	58,3	1,05	26,9	14,50	803,8	0,21	17,4	0,48	23,8
N141	0,324	323,6	6,11	265,8	0,78	20,0	11,70	648,6	0,66	54,6	0,58	28,9
N142	0,091	91,2	1,32	57,4	0,34	8,8	2,15	119,2	0,19	15,6	0,35	17,6
N143	0,079	79,4	0,93	40,3	0,45	11,5	4,75	263,3	0,14	11,6	0,27	13,3
N144	0,295	295,1	1,87	81,3	0,58	14,8	14,50	803,8	0,30	24,3	0,56	28,1
N145	0,295	295,1	3,20	139,2	0,89	22,7	20,40	1130,9	0,39	31,8	0,52	26,1
N146	0,575	575,4	6,56	285,3	0,89	22,6	19,20	1064,4	0,79	64,6	0,96	48,1
N147	0,380	380,2	1,44	62,6	0,52	13,2	14,70	814,9	0,23	18,5	0,51	25,4
N148	0,427	426,6	2,38	103,5	1,23	31,5	32,80	1818,3	0,48	39,5	1,54	76,9
N149	0,302	302,0	4,64	201,8	0,77	19,8	30,30	1679,7	0,64	52,7	1,48	73,9
N150	0,162	162,2	1,59	69,2	<	<	3,26	180,7	<	<	<	<
N151	0,155	154,9	0,57	25,0	<	<	3,74	207,3	0,08	6,3	<	<
N152	0,098	97,7	<	<	<	<	2,77	153,6	0,12	9,7	0,60	30,1
N153	0,093	93,3	1,66	72,2	0,50	12,9	5,02	278,3	0,18	14,7	0,24	12,0
N154	0,224	223,9	1,07	46,5	0,59	15,1	20,10	1114,3	0,20	16,3	1,12	55,9
N155	0,015	15,5	0,76	33,0	0,26	6,7	5,21	288,8	0,11	9,4	0,39	19,6
N156	0,035	34,7	0,24	10,4	0,29	7,3	5,23	289,9	<	<	0,28	14,0
N157	0,162	162,2	1,74	75,7	0,34	8,6	19,00	1053,3	0,22	17,7	0,33	16,3
N158	0,347	346,7	3,29	143,1	1,36	34,8	49,50	2744,1	0,45	37,1	1,49	74,4
N159	0,257	257,0	1,05	45,7	0,74	18,9	26,60	1474,6	0,16	13,1	0,49	24,3
N160	0,100	100,0	17,50	761,2	1,54	39,4	42,40	2350,5	1,93	158,8	1,32	65,9
N161	0,302	302,0	3,05	132,7	0,66	17,0	39,60	2195,3	0,42	34,1	0,82	40,9
N162	0,182	182,0	0,54	23,5	0,33	8,3	22,80	1264,0	0,06	4,9	<	<
N163	0,240	239,9	0,53	23,2	0,39	10,1	7,75	429,6	0,08	6,6	0,65	32,4
N164	0,017	17,0	0,23	10,0	0,31	7,8	3,55	196,8	<	<	0,31	15,2
N165	0,014	14,1	0,59	25,8	<	<	1,55	85,9	0,07	6,0	0,22	11,0
N166	0,016	16,2	1,13	49,2	0,30	7,7	2,83	156,9	0,12	9,5	0,29	14,3
N167	0,072	72,4	0,23	10,1	<	<	2,63	145,8	<	<	<	<
N168	0,646	645,7	5,65	245,8	1,01	25,8	33,00	1829,4	0,77	63,4	3,35	167,2
N169	0,186	186,2	1,00	43,5	0,41	10,4	8,17	452,9	0,16	13,3	0,73	36,3
N170	0,123	123,0	0,44	19,3	0,37	9,5	10,10	559,9	0,18	14,4	0,92	46,1
N171	0,112	112,2	<	<	<	<	2,64	146,4	0,09	7,2	0,43	21,3
N172	0,182	182,0	0,24	10,5	<	<	5,39	298,8	0,18	14,9	0,87	43,2
N173	0,085	85,1	<	<	<	<	4,85	268,9	0,10	8,3	0,64	31,7
N174	0,044	43,7	<	<	<	<	4,04	224,0	0,10	8,2	0,52	25,7
N175	0,141	141,3	<	<	<	<	3,01	166,9	<	<	0,25	12,3
N176	0,355	354,8	0,46	19,8	0,37	9,4	9,42	522,2	0,07	5,9	0,52	25,8
N177	0,295	295,1	0,96	41,8	0,33	8,3	8,27	458,5	0,12	9,5	0,41	20,3
N178	0,079	79,4	0,22	9,4	<	<	2,69	149,1	0,23	18,5	1,08	53,9
N179	0,052	52,5	<	<	<	<	1,55	85,9	<	<	<	<
N180	1,202	1202,3	2,20	95,7	0,78	19,9	26,70	1480,2	0,36	29,4	0,85	42,2
N181	1,862	1862,1	4,39	191,0	0,64	16,4	38,60	2139,9	0,58	47,5	0,65	32,2
N182	0,182	182,0	1,07	46,5	0,33	8,4	6,39	354,2	0,29	23,6	0,98	48,9
N183	0,562	562,3	8,53	371,0	1,70	43,5	20,50	1136,5	1,59	130,8	4,09	204,1
N184	0,051	51,3	0,54	23,6	<	<	5,23	289,9	0,12	9,5	0,38	18,9
N185	0,022	22,4	<	<	<	<	4,89	271,1	0,08	6,6	0,48	24,0

Probe	H ⁺		Na ⁺		K ⁺		NH ₄ ⁺		Mg ²⁺		Ca ²⁺	
	mg l ⁻¹	µeq l ⁻¹	mg l ⁻¹	µeq l ⁻¹	mg l ⁻¹	µeq l ⁻¹	mg l ⁻¹	µeq l ⁻¹	mg l ⁻¹	µeq l ⁻¹	mg l ⁻¹	µeq l ⁻¹
N186	0,006	6,0	0,24	10,5	0,26	6,8	2,15	119,2	0,23	18,7	1,19	59,4
N187	0,019	18,6	<	<	<	<	3,97	220,1	<	<	<	<
N188	0,339	338,8	1,25	54,4	2,09	53,5	58,20	3226,4	0,32	26,2	1,80	89,8
N189	0,724	724,4	0,24	10,5	<	<	10,00	554,4	0,10	8,2	0,50	24,9
N190	0,036	36,3	4,69	204,0	1,32	33,8	36,90	2045,6	0,99	81,4	3,64	181,6
N191	0,049	49,0	3,47	150,9	0,82	20,8	27,80	1541,1	0,76	62,1	1,93	96,3
N192	0,037	37,2	0,40	17,2	<	<	12,00	665,2	0,18	14,9	0,73	36,4
N193	0,407	407,4	0,31	13,4	<	<	11,20	620,9	0,09	7,7	0,34	17,2
N194	0,065	64,6	2,05	89,2	0,35	8,9	8,54	473,4	0,27	22,5	0,51	25,5
N195	0,030	29,5	0,21	9,0	<	<	3,13	173,5	0,16	13,2	0,72	36,0
N196	0,026	25,7	<	<	<	<	3,05	169,1	0,14	11,1	0,63	31,6
N197	0,047	46,8	0,75	32,7	<	<	5,98	331,5	0,08	6,9	0,20	10,2
N198	0,023	22,9	0,57	24,6	0,37	9,4	11,60	643,1	0,17	13,6	0,73	36,5
N199	0,076	75,9	0,32	14,0	0,74	18,8	14,30	792,7	0,10	8,6	0,47	23,3
N200	0,079	79,4	0,35	15,1	0,57	14,6	17,30	959,1	<	<	<	<
N201	0,251	251,2	0,83	36,3	0,47	12,0	13,00	720,7	0,10	8,1	0,50	25,0
N202			2,44	106,1	0,29	7,4	7,46	413,6	0,26	21,2	0,49	24,4
N203	0,132	131,8	2,18	94,8	0,56	14,3	29,90	1657,6	0,27	22,1	0,45	22,6
N204	0,200	199,5	1,20	52,2	0,76	19,5	35,20	1951,4	0,14	11,8	0,46	22,9
N205	0,068	67,6	7,89	343,2	1,83	46,8	96,00	5322,0	1,01	83,1	3,34	166,7
N206	0,006	6,2	0,53	23,0	0,39	10,1	2,81	155,8	0,23	19,0	1,35	67,4
N207	0,003	3,4	1,01	43,9	0,70	17,8	24,60	1363,7	0,29	23,9	2,06	102,8
N208	0,002	1,9	0,21	9,3	<	<	14,40	798,3	0,05	4,2	0,31	15,4
N209	0,002	2,0	<	<	<	<	2,64	146,4	<	<	0,51	25,2
N210	0,003	3,0	<	<	<	<	1,62	89,8	0,10	8,3	0,58	29,1
N211	0,002	1,5	<	<	<	<	3,14	174,1	<	<	<	<
N212	0,009	8,7	<	<	<	<	2,13	118,1	<	<	<	<
N213	0,007	7,1	<	<	<	<	1,45	80,4	<	<	<	<
N214	0,132	131,8	<	<	<	<	3,72	206,2	0,06	4,8	0,64	32,1
N215	0,087	87,1	0,81	35,3	<	<	3,95	219,0	0,05	4,2	0,46	23,0
N216	0,078	77,6	<	<	<	<	7,35	407,5	<	<	0,21	10,4
N217	0,043	42,7	<	<	0,27	7,0	15,60	864,8	0,09	7,5	0,59	29,3
N218	0,178	177,8	1,19	51,8	1,20	30,7	62,30	3453,7	0,46	37,9	3,49	174,2
N219	0,030	29,5	1,07	46,5	2,74	70,1	41,90	2322,8	0,78	64,3	3,99	199,1
N220	0,174	173,8	1,93	84,0	0,78	19,8	32,50	1801,7	0,37	30,6	1,56	77,8
N221	0,288	288,4	1,73	75,3	0,88	22,5	30,20	1674,2	0,33	27,2	1,33	66,4
N222	0,017	17,4	2,27	98,7	1,54	39,4	3,96	219,5	0,29	24,1	2,24	111,8
N223	0,013	13,5	4,03	175,3	2,01	51,4	22,00	1219,6	0,70	57,4	2,73	136,2
N224	0,009	8,7	2,07	90,0	1,20	30,7	19,10	1058,8	0,46	37,8	2,76	137,7
N225	0,007	6,6	6,92	301,0	0,83	21,1	10,80	598,7	0,67	54,8	1,20	59,9
N226	0,004	4,5	3,88	168,8	0,28	7,1	4,69	260,0	0,43	35,7	0,51	25,6
N227	0,009	9,1	22,40	974,3	1,79	45,8	8,65	479,5	2,81	231,2	3,38	168,7
N228	0,020	20,4	1,78	77,4	0,41	10,4	10,60	587,6	0,34	27,9	1,08	53,9
N229	0,102	102,3	0,35	15,1	0,28	7,2	14,70	814,9	0,09	7,1	0,38	18,9
N230	0,020	20,4	0,30	12,8	<	<	9,61	532,7	0,07	5,9	0,36	17,9
N231	0,016	16,2	0,56	24,4	<	<	5,85	324,3	0,10	7,9	0,72	35,7
N232	0,021	21,4	0,40	17,4	<	<	13,90	770,6	0,05	4,4	0,45	22,4

Probe	H ⁺		Na ⁺		K ⁺		NH ₄ ⁺		Mg ²⁺		Ca ²⁺	
	mg l ⁻¹	µeq l ⁻¹	mg l ⁻¹	µeq l ⁻¹	mg l ⁻¹	µeq l ⁻¹	mg l ⁻¹	µeq l ⁻¹	mg l ⁻¹	µeq l ⁻¹	mg l ⁻¹	µeq l ⁻¹
N233	0,098	97,7	0,30	12,9	0,27	6,9	22,50	1247,3	0,06	4,5	0,38	19,1
N234												
N235	0,708	707,9	1,33	57,9	1,53	39,1	49,40	2738,6	0,50	41,5	3,62	180,6
N236	0,078	77,6	1,52	66,1	1,28	32,7	21,40	1186,4	0,42	34,4	2,17	108,3
N237	0,112	112,2	1,55	67,4	0,82	20,8	22,20	1230,7	0,32	26,1	1,48	73,9
N238	0,043	42,7	0,38	16,4	<	<	5,67	314,3	0,08	6,6	0,49	24,5
N239	0,025	25,1	<	<	<	<	6,60	365,9	0,06	4,9	0,48	24,0
N240	0,021	20,9	0,37	16,2	<	<	7,53	417,4	0,08	6,7	0,49	24,4
N241	0,005	5,0	12,80	556,8	1,16	29,7	29,20	1618,8	1,31	107,8	1,31	65,4
N242	0,005	5,5	15,90	691,6	1,60	40,9	37,40	2073,3	1,73	142,4	2,70	134,7
N243	0,005	4,9	8,33	362,3	1,74	44,5	24,00	1330,5	1,08	88,9	2,65	132,2
N244	0,020	20,0	0,82	35,6	0,83	21,2	36,10	2001,3	0,24	19,8	1,73	86,3
N245	0,010	9,5	0,47	20,3	0,64	16,3	12,20	676,3	0,18	14,7	0,85	42,6
N246	0,009	9,1	0,30	12,8	0,38	9,6	13,50	748,4	0,07	5,5	0,38	19,1
N247	0,004	3,7	0,31	13,3	0,42	10,8	2,35	130,3	0,11	9,1	0,98	49,0
N248	0,006	5,8	0,45	19,7	0,30	7,7	2,64	146,4	0,13	10,8	1,08	53,9
N249	0,010	10,2	6,32	274,9	1,37	35,0	8,72	483,4	0,83	68,3	3,86	192,6
N250	0,019	19,5	0,74	32,3	0,48	12,3	7,25	401,9	0,22	18,4	1,57	78,3
N251	0,009	9,1	0,22	9,5	0,40	10,3	9,56	530,0	0,07	6,0	0,57	28,6
N252	0,008	7,9	0,27	11,8	<	<	10,60	587,6	0,06	5,0	0,54	26,9
N253	0,004	4,3	<	<	<	<	3,41	189,0	<	<	0,31	15,7
N254	0,011	11,5	<	<	<	<	3,06	169,6	<	<	0,31	15,4
N255	0,016	16,2	<	<	<	<	4,44	246,1	<	<	<	<
N256	0,043	42,7	<	<	<	<	4,64	257,2	<	<	<	<
N257	0,052	52,5	<	<	<	<	7,11	394,2	<	<	0,27	13,2
N258	0,047	46,8	<	<	0,62	15,9	9,26	513,3	0,12	9,5	0,41	20,6
N259	0,018	18,2	<	<	<	<	5,97	331,0	<	<	<	<
N260	0,035	35,5	1,91	83,1	0,88	22,6	10,90	604,3	0,32	26,1	1,36	67,9
N261	0,065	64,6	4,75	206,6	3,65	93,4	33,40	1851,6	1,48	121,8	10,10	504,0
N262	0,005	5,4	0,36	15,7	0,79	20,2	13,60	753,9	0,19	15,4	1,48	73,9
N263	0,004	3,6	0,80	34,6	0,37	9,5	13,40	742,9	0,13	10,5	0,86	42,9
N264	0,006	6,0	7,12	309,7	1,92	49,1	66,30	3675,5	1,18	97,1	4,28	213,6
N265	0,004	3,9	4,00	174,0	1,37	35,0	50,70	2810,7	0,56	46,1	1,70	84,8
N266	0,004	4,1	4,11	178,8	1,15	29,4	10,30	571,0	0,68	55,8	3,68	183,6
N267	0,015	15,5	0,42	18,4	<	<	10,60	587,6	0,17	13,7	1,05	52,4
N268	0,025	24,5	0,60	25,9	0,41	10,4	24,10	1336,0	0,15	12,7	1,41	70,4
N269	0,016	16,2	0,32	13,8	<	<	16,80	931,3	0,07	6,0	0,74	37,1
N270	0,003	3,2	0,55	23,7	0,41	10,5	32,40	1796,2	0,10	8,5	0,61	30,3
N271	0,004	4,0	5,92	257,5	0,77	19,6	36,50	2023,4	0,63	52,1	1,20	59,9
N272	0,003	2,6	12,00	522,0	1,21	30,9	42,70	2367,2	1,50	123,4	2,98	148,7
N273	0,003	3,4	4,58	199,2	1,90	48,6	14,80	820,5	0,85	69,9	2,16	107,8
N274	0,003	3,4	0,23	9,9	<	<	1,81	100,3	0,08	6,8	0,66	33,0
N275	0,006	6,2	2,52	109,6	0,78	19,9	26,30	1458,0	0,30	24,6	1,49	74,4
N276	0,120	120,2	2,71	117,9	0,51	13,0	21,90	1214,1	0,39	32,0	1,17	58,4
N277	0,046	45,7	3,14	136,6	0,44	11,2	17,90	992,3	0,39	31,9	1,33	66,4
N278	0,013	12,6	0,95	41,4	<	<	9,92	549,9	0,21	16,9	0,46	23,0
N279	0,008	7,6	1,94	84,4	<	<	8,20	454,6	0,17	14,2	0,31	15,2

Probe	H ⁺		Na ⁺		K ⁺		NH ₄ ⁺		Mg ²⁺		Ca ²⁺	
	mg l ⁻¹	µeq l ⁻¹	mg l ⁻¹	µeq l ⁻¹	mg l ⁻¹	µeq l ⁻¹	mg l ⁻¹	µeq l ⁻¹	mg l ⁻¹	µeq l ⁻¹	mg l ⁻¹	µeq l ⁻¹
N280	0,047	46,8	1,69	73,5	<	<	11,20	620,9	0,31	25,8	0,68	33,7
N281	0,058	57,5	<	<	<	<	8,56	474,5	<	<	0,30	14,9
N282	0,417	416,9	2,42	105,3	1,43	36,6	81,30	4507,0	0,46	37,9	2,74	136,7
N283	0,076	75,9	0,80	34,7	<	<	8,86	491,2	0,11	9,2	0,48	23,9
N284	0,030	29,5	0,34	14,6	<	<	3,83	212,3	0,05	4,2	0,27	13,4
N285	0,060	60,3	6,32	274,9	1,32	33,8	19,30	1069,9	0,68	55,8	2,57	128,2
N286	0,030	29,5	10,70	465,4	0,51	12,9	7,97	441,8	1,02	83,9	1,00	49,7
N287	0,028	28,2	21,60	939,5	6,53	167,0	4,01	222,3	0,79	65,1	0,93	46,3
N288	0,011	11,5	0,65	28,1	<	<	1,83	101,4	0,09	7,7	<	<
N289	0,047	46,8	2,44	106,1	<	<	6,96	385,8	0,30	24,9	0,62	30,8
N290	0,363	363,1	2,07	90,0	0,48	12,1	19,40	1075,5	0,35	28,4	1,15	57,4
N291	0,200	199,5	1,15	50,0	<	<	12,20	676,3	0,19	15,4	0,86	43,0
N292	0,019	19,1	0,25	11,0	<	<	3,44	190,7	<	<	0,36	17,7
N293	0,023	23,4	<	<	<	<	3,62	200,7	<	<	0,35	17,2
N294	0,398	398,1	1,92	83,5	0,46	11,7	13,70	759,5	0,29	23,5	1,03	51,4
N295	0,617	616,6	2,60	113,1	0,34	8,6	14,00	776,1	0,35	28,6	0,76	37,9
N296	0,162	162,2	2,12	92,2	<	<	12,60	698,5	0,29	23,5	0,46	23,1
N297	0,083	83,2	1,09	47,4	<	<	7,22	400,3	0,20	16,0	0,67	33,4
N298	0,039	38,9	0,58	25,4	<	<	8,21	455,1	0,09	7,2	0,23	11,3
N299	0,037	37,2	1,18	51,3	<	<	8,45	468,4	0,18	14,4	0,47	23,6
N300	0,035	34,7	0,88	38,3	0,28	7,0	12,10	670,8	0,11	9,3	0,33	16,5
N301	0,447	446,7	1,27	55,2	0,82	21,0	15,80	875,9	0,28	23,3	1,38	68,9
N302	0,891	891,3	8,91	387,6	1,36	34,8	38,10	2112,1	1,07	88,0	1,97	98,3
N303	0,316	316,2	5,10	221,8	1,60	40,9	17,40	964,6	0,77	63,1	1,16	57,9
N304	0,095	95,5	0,62	26,9	0,27	7,0	11,10	615,4	0,14	11,5	0,45	22,7
N305	0,062	61,7	0,26	11,3	<	<	6,81	377,5	<	<	0,21	10,5
N306	0,068	67,6	<	<	<	<	3,94	218,4	<	<	<	<
N307	0,214	213,8	<	<	<	<	7,94	440,2	<	<	<	<
N308	1,047	1047,1	1,12	48,7	2,17	55,5	107,00	5931,8	0,82	67,8	8,28	413,2
N309	0,257	257,0	0,64	27,9	0,29	7,4	14,40	798,3	0,14	11,8	0,75	37,6
N310	0,372	371,5	5,00	217,5	0,76	19,4	22,80	1264,0	0,61	50,3	1,73	86,3
N311	0,158	158,5	1,35	58,7	0,49	12,5	11,60	643,1	0,29	23,8	1,29	64,4
N312	0,204	204,2	0,81	35,1	0,91	23,3	18,20	1009,0	0,30	24,6	1,67	83,3
N313	0,062	61,7	0,44	19,2	0,27	6,9	4,18	231,7	0,12	9,5	0,58	28,9
N314	0,049	49,0	0,29	12,6	<	<	4,89	271,1	0,08	6,6	0,49	24,3
N315	0,063	63,1	<	<	0,25	6,4	5,34	296,0	0,08	6,6	0,43	21,4
N316	0,047	46,8	<	<	<	<	4,37	242,3	0,06	5,3	0,39	19,2
N317	0,035	34,7	1,40	60,9	1,45	37,1	15,20	842,6	0,31	25,3	0,84	42,0
N318	0,014	13,8	<	<	<	<	6,51	360,9	<	<	0,25	12,3
N319	0,058	57,5	<	<	0,33	8,3	9,42	522,2	0,12	10,0	0,76	37,8
N320	0,026	25,7	0,31	13,4	<	<	5,02	278,3	0,06	5,2	0,61	30,2
N321	0,030	30,2	3,97	172,7	1,23	31,5	36,10	2001,3	0,77	63,3	4,74	236,5
N322	0,162	162,2	0,68	29,7	<	<	7,13	395,3	0,18	15,1	1,17	58,4
N323	0,054	53,7	0,43	18,9	<	<	5,16	286,1	0,15	12,4	0,81	40,2
N324	0,065	64,6	0,67	29,0	0,41	10,4	25,70	1424,7	0,21	17,4	0,98	49,0
N325	0,060	60,3	0,27	11,7	<	<	13,70	759,5	0,08	6,9	0,56	28,0
N326	0,240	239,9	0,40	17,2	0,46	11,8	17,20	953,5	0,13	10,7	1,22	60,9

Probe	H ⁺		Na ⁺		K ⁺		NH ₄ ⁺		Mg ²⁺		Ca ²⁺	
	mg l ⁻¹	µeq l ⁻¹	mg l ⁻¹	µeq l ⁻¹	mg l ⁻¹	µeq l ⁻¹	mg l ⁻¹	µeq l ⁻¹	mg l ⁻¹	µeq l ⁻¹	mg l ⁻¹	µeq l ⁻¹
N327	0,263	263,0	6,82	296,7	0,82	20,9	16,30	903,6	0,89	73,5	1,65	82,3
N328	0,132	131,8	2,33	101,3	0,33	8,4	9,98	553,3	0,39	32,1	1,26	62,9
N329	0,257	257,0	8,03	349,3	0,73	18,7	21,60	1197,4	1,13	93,0	2,51	125,3
N330	0,417	416,9	7,89	343,2	0,65	16,7	20,50	1136,5	1,16	95,5	2,19	109,3
N331												
N332	0,151	151,4	3,30	143,5	0,94	24,0	28,60	1585,5	0,55	45,4	1,30	64,9
N333	0,282	281,8	2,17	94,4	1,04	26,6	32,10	1779,5	0,38	31,4	1,70	84,8
N334	0,741	741,3	3,69	160,5	1,49	38,1	39,10	2167,6	0,68	56,2	2,35	117,3
N335	0,120	120,2	1,20	52,2	0,38	9,6	8,43	467,3	0,18	14,6	0,55	27,5
N336	0,019	18,6	0,36	15,7	<	<	5,16	286,1	0,08	6,6	0,33	16,3
N337	0,427	426,6	2,23	97,0	0,43	11,1	14,50	803,8	0,31	25,2	0,55	27,4
N338	0,501	501,2	1,43	62,2	0,41	10,5	17,20	953,5	0,32	26,2	1,31	65,4
N339	0,490	489,8	3,17	137,9	1,62	41,4	58,50	3243,1	0,70	57,4	4,26	212,6
N340												
N341	0,240	239,9	18,80	817,8	1,45	37,1	23,70	1313,9	2,14	176,1	5,16	257,5
N342	0,021	20,9	7,51	326,7	0,45	11,6	9,07	502,8	0,84	69,1	0,57	28,5
N343	0,015	14,8	9,94	432,4	0,61	15,6	12,90	715,1	1,13	93,0	0,87	43,5
N344	0,011	10,7	17,30	752,5	1,07	27,4	19,50	1081,0	2,11	173,6	2,30	114,8
N345	0,011	11,0	15,60	678,6	1,29	33,0	24,60	1363,7	2,21	181,9	4,75	237,0
N346	0,071	70,8	1,33	57,9	0,85	21,8	25,40	1408,1	0,35	29,0	1,29	64,4
N347	0,288	288,4	1,41	61,3	0,48	12,4	18,80	1042,2	0,22	17,7	0,46	23,2
N348	0,191	190,5	4,64	201,8	0,69	17,6	22,50	1247,3	0,62	51,1	1,01	50,4
N349	0,324	323,6	16,90	735,1	1,78	45,5	41,20	2284,0	2,29	188,4	3,74	186,6
N350	0,044	43,7	0,87	37,8	<	<	7,57	419,7	0,16	13,2	0,48	23,9
N351	0,200	199,5	4,26	185,3	0,49	12,6	15,10	837,1	0,54	44,1	0,70	35,0
N352	0,129	128,8	6,85	298,0	0,55	14,0	17,00	942,4	0,85	69,5	1,58	78,8
N353	0,054	53,7	1,35	58,7	0,36	9,1	10,80	598,7	0,21	17,6	0,93	46,4
N354	0,047	46,8	0,42	18,3	<	<	2,69	149,1	0,05	4,3	0,23	11,3
N355	0,012	11,7	<	<	<	<	0,35	19,2	<	<	<	<
N356	0,002	1,9	0,26	11,3	<	<	0,64	35,5	0,19	15,5	0,76	37,8
N357	0,162	162,2	4,98	216,6	1,09	27,9	8,31	460,7	0,67	55,1	1,16	57,9
N358	0,074	74,1	0,83	36,0	0,36	9,1	6,89	382,0	0,08	6,2	0,24	11,8
N359	0,062	61,7	<	<	<	<	2,89	160,2	<	<	<	<
N360	0,339	338,8	1,27	55,2	0,44	11,4	11,20	620,9	0,20	16,5	0,43	21,6
N361	0,457	457,1	1,49	64,8	0,59	15,2	19,30	1069,9	0,20	16,7	0,39	19,6
N362	0,275	275,4	7,89	343,2	0,65	16,7	18,10	1003,4	0,93	76,2	0,97	48,3
N363	0,229	229,1	9,53	414,5	0,45	11,6	12,30	681,9	1,17	96,3	0,86	43,1
N364a												
N364	0,234	234,4	12,40	539,4	0,84	21,6	17,00	942,4	1,66	136,6	2,17	108,3
N365	0,355	354,8	5,68	247,1	0,41	10,5	17,30	959,1	0,73	60,2	0,53	26,4
N366	0,162	162,2	6,54	284,5	0,55	13,9	30,80	1707,5	0,58	47,4	1,15	57,4
N367	0,501	501,2	1,42	61,8	<	<	18,80	1042,2	0,19	15,5	0,36	17,9
N368	0,339	338,8	0,58	25,2	<	<	10,60	587,6	0,08	6,7	<	<
N369	0,068	67,6	0,62	26,8	<	<	10,20	565,5	<	<	<	<
N370	0,049	49,0	1,71	74,4	<	<	9,75	540,5	<	<	<	<
N371	0,085	85,1	2,81	122,2	0,39	10,0	17,20	953,5	0,25	20,7	0,31	15,6
N372	0,046	45,7	6,37	277,1	1,32	33,8	31,00	1718,5	0,76	62,3	1,80	89,8

Probe	H ⁺		Na ⁺		K ⁺		NH ₄ ⁺		Mg ²⁺		Ca ²⁺	
	mg l ⁻¹	µeq l ⁻¹	mg l ⁻¹	µeq l ⁻¹	mg l ⁻¹	µeq l ⁻¹	mg l ⁻¹	µeq l ⁻¹	mg l ⁻¹	µeq l ⁻¹	mg l ⁻¹	µeq l ⁻¹
N373	0,115	114,8	1,92	83,5	0,70	17,9	19,40	1075,5	0,30	24,5	1,06	52,9
N374	0,295	295,1	1,00	43,5	0,50	12,9	18,60	1031,1	0,18	14,4	0,86	43,0
N375	0,513	512,9	2,76	120,1	1,91	48,9	59,60	3304,0	0,55	45,2	3,19	159,2
N376	0,107	107,2	0,29	12,7	<	<	6,93	384,2	<	<	0,32	16,0
N377	0,055	55,0	1,51	65,7	<	<	2,90	160,8	0,20	16,5	0,24	11,8
N378	0,030	29,5	0,50	21,8	0,48	12,4	13,40	742,9	0,27	21,9	0,95	47,6
N379	0,129	128,8	0,57	24,6	<	<	6,18	342,6	0,07	6,0	0,27	13,4
N380	0,309	309,0	7,12	309,7	0,47	11,9	10,40	576,5	0,82	67,1	0,54	26,8
N381	0,479	478,6	16,10	700,3	1,04	26,6	17,80	986,8	1,96	161,3	1,86	92,8
N382	0,151	151,4	22,80	991,7	0,97	24,7	7,85	435,2	2,81	231,2	2,42	120,8
N383	0,060	60,3	2,57	111,8	<	<	3,10	171,9	0,30	24,5	0,33	16,6
N384	0,023	22,9	0,29	12,4	<	<	2,25	124,7	<	<	<	<
N385	0,039	38,9	0,27	11,7	<	<	3,19	176,8	<	<	<	<
N386	0,162	162,2	0,26	11,2	<	<	9,20	510,0	<	<	<	<
N387	0,195	195,0	0,46	19,8	<	<	10,70	593,2	<	<	<	<
N388	0,186	186,2	0,58	25,4	0,42	10,8	10,40	576,5	0,07	6,1	<	<
N389	0,032	31,6	<	<	<	<	5,78	320,4	0,18	14,4	0,78	38,9
N390	0,025	25,1	<	<	<	<	4,97	275,5	0,19	15,2	0,86	42,9
N391	0,024	24,0	<	<	<	<	7,03	389,7	0,06	5,1	0,22	11,1
N392	0,001	0,8	<	<	<	<	4,63	256,7	0,53	43,7	2,49	124,3
N393	0,001	1,2	0,33	14,4	<	<	7,50	415,8	0,36	29,8	1,72	85,8
N394	0,072	72,4	2,19	95,3	0,67	17,0	11,80	654,2	0,34	27,8	1,02	50,9
N395	0,240	239,9	7,27	316,2	5,43	138,9	13,80	765,0	1,24	102,0	0,86	43,1
N396	0,479	478,6	2,31	100,5	2,59	66,2	12,10	670,8	0,45	37,4	0,39	19,4
N397	0,398	398,1	0,95	41,4	0,53	13,5	8,90	493,4	0,07	5,4	<	<
N398	0,631	631,0	1,20	52,2	0,82	21,0	12,70	704,0	0,13	10,6	0,40	19,8
N399	0,513	512,9	0,95	41,4	0,81	20,8	16,60	920,3	0,17	14,2	0,30	15,1
N400	0,245	245,5	0,21	9,3	0,26	6,6	8,61	477,3	0,05	4,5	<	<
N401	0,955	955,0	1,77	77,0	1,50	38,4	34,40	1907,0	0,27	22,5	0,47	23,4
N402	0,209	208,9	1,44	62,6	0,38	9,6	7,91	438,5	0,15	12,3	<	<
N403	0,145	144,5	2,81	122,2	0,27	6,8	5,70	316,0	0,30	24,6	<	<
N404	0,138	138,0	5,88	255,8	0,47	11,9	7,79	431,9	0,64	52,9	0,38	18,8
N405	0,027	26,9	2,08	90,5	<	<	3,99	221,2	0,27	22,3	0,40	19,9
N406	0,015	15,5	0,46	20,1	<	<	1,35	74,8	<	<	<	<
N407	0,098	97,7	8,91	387,6	0,44	11,3	6,25	346,5	0,90	74,4	0,79	39,5
N408	0,049	49,0	1,11	48,3	<	<	2,58	143,0	0,11	8,8	<	<
N409	0,025	24,5	0,46	20,1	<	<	1,14	63,2	<	<	<	<
N410	0,015	14,8	<	<	<	<	0,28	15,7	<	<	<	<
N411	0,013	13,5	<	<	<	<	0,73	40,5	<	<	<	<
N412	0,012	11,7	1,47	63,9	<	<	0,69	38,5	0,07	6,1	<	<
N413	0,575	575,4	5,66	246,2	1,15	29,4	21,60	1197,4	0,79	64,6	1,67	83,3
N414	0,427	426,6	1,70	73,9	0,49	12,6	7,90	438,0	0,22	18,2	0,49	24,3
N415	0,155	154,9	10,50	456,7	1,14	29,2	25,50	1413,6	1,26	103,7	1,87	93,3
N416	0,295	295,1	12,90	561,1	1,27	32,5	33,00	1829,4	1,70	139,9	2,17	108,3
N417	0,275	275,4	11,60	504,6	1,51	38,6	44,00	2439,2	1,42	116,8	2,33	116,3
N418	0,063	63,1	1,02	44,4	<	<	4,78	265,0	0,17	13,9	0,56	27,9
N419	0,110	109,6	0,88	38,2	<	<	6,24	345,9	0,10	8,5	0,29	14,3

Anhang C: Chemische Zusammensetzung der Nebelwasserproben – pH-Wert, Anionen und elektrische Leitfähigkeit

Probe	pH	Cl ⁻		NO ₃ ⁻		SO ₄ ²⁻		PO ₄ ³⁻		λ μS cm ⁻¹	λ _{ber} μS cm ⁻¹	$\frac{\lambda}{\lambda_{ber}}$
		mg l ⁻¹	μeq l ⁻¹	mg l ⁻¹	μeq l ⁻¹	mg l ⁻¹	μeq l ⁻¹	mg l ⁻¹	μeq l ⁻¹			
N001	3,78	1,89	53,3	23,10	372,6	13,70	285,2	<	<	162	151	93,01%
N002	3,63	3,87	109,2	57,70	930,6	25,40	528,8	<	<	283	291	102,88%
N003	3,73	2,66	75,0	35,10	566,1	14,40	299,8	<	<	187	187	99,99%
N004	3,88	2,47	69,7	28,20	454,8	13,80	287,3	<	<	150	156	103,74%
N005												
N006	4,29	10,40	293,3	28,40	458,0	18,50	385,2	<	<	166	181	108,82%
N007	4,61	3,52	99,3	12,60	203,2	10,50	218,6	<	<	76	81	107,20%
N008	3,79	4,59	129,5	29,30	472,5	13,90	289,4	<	<	170	170	100,12%
N009												
N010	3,42	3,21	90,5	48,50	782,2	14,70	306,0	<	<	276	266	96,23%
N011	4,55	<	<	2,39	38,5	1,08	22,5	<	<	25	17	66,51%
N012	5,37	<	<	<	<	<	<	<	<	4	2	44,08%
N013												
N014	3,69	5,41	152,6	35,50	572,5	20,10	418,5	<	<	214	216	101,13%
N015	3,88	5,94	167,5	25,20	406,4	13,80	287,3	<	<	147	158	107,39%
N016	3,68	7,29	205,6	44,30	714,5	14,30	297,7	<	<	222	228	102,82%
N017	4,22	1,42	40,1	19,40	312,9	14,40	299,8	<	<	106	115	108,72%
N018	4,52	0,29	8,1	12,20	196,8	5,64	117,4	<	<	53	54	102,46%
N019	4,81	0,92	25,9	11,80	190,3	14,10	293,6	<	<	75	79	105,74%
N020	5,07	2,37	66,8	2,90	46,8	2,60	54,1	<	<	26	26	100,51%
N021	3,99	2,15	60,6	32,90	530,6	22,40	466,4	<	<	180	188	104,22%
N022	3,61	0,66	18,7	54,30	875,7	13,10	272,7	<	<	227	231	101,83%
N023	4,12	1,14	32,2	28,40	458,0	13,60	283,1	<	<	125	135	108,01%
N024	4,68	1,51	42,6	28,60	461,3	15,90	331,0	<	<	123	135	109,45%
N025	5,16	1,72	48,5	3,22	51,9	1,67	34,8	<	<	21	21	99,69%
N026	4,89	3,10	87,4	8,91	143,7	5,12	106,6	<	<	48	50	103,95%
N027	4,04	1,01	28,5	17,70	285,5	14,80	308,1	<	<	121	121	100,06%
N028	4,09	4,03	113,7	90,00	1451,5	35,70	743,3	<	<	336	373	110,94%
N029	4,72	0,74	20,9	18,40	296,8	9,62	200,3	<	<	72	80	110,94%
N030	3,61	4,58	129,2	94,60	1525,7	33,30	693,3	<	<	387	406	104,97%
N031	4,51	1,70	48,0	117,00	1886,9	51,80	1078,5	<	<	408	462	113,14%
N032	4,81	0,60	16,8	44,80	722,5	29,60	616,3	<	<	202	210	104,18%
N033	4,72	0,73	20,4	18,90	304,8	47,00	978,5	<	<	195	207	106,30%
N034	4,16	0,89	25,2	35,90	579,0	106,00	2206,9	<	<	399	449	112,63%
N035	4,59	0,79	22,2	12,50	201,6	19,50	406,0	<	<	105	104	99,11%
N036	5,29	1,00	28,2	30,30	488,7	41,80	870,3	<	<	203	216	106,54%
N037	4,45	0,64	18,1	75,40	1216,0	23,70	493,4	<	<	262	271	103,42%
N038	4,89	1,33	37,5	44,30	714,5	15,10	314,4	<	<	149	159	106,71%
N039	5,33	<	<	8,10	130,6	2,62	54,5	<	<	29	28	96,16%
N040	5,56	0,48	13,6	2,51	40,5	1,10	22,9	<	<	15	12	81,08%
N041	3,99	0,73	20,5	51,90	837,0	18,80	391,4	<	<	213	214	100,57%
N042	4,29	0,83	23,3	51,90	837,0	18,80	391,4	<	<	196	206	104,93%
N043	5,04	<	<	7,82	126,1	2,41	50,2	<	<	29	28	96,87%
N044	5,44	0,42	11,9	15,50	250,0	8,81	183,4	<	<	65	67	102,59%

Probe	pH	Cl ⁻		NO ₃ ⁻		SO ₄ ²⁻		PO ₄ ³⁻		λ μS cm ⁻¹	λ _{ber} μS cm ⁻¹	$\frac{\lambda}{\lambda_{ber}}$
		mg l ⁻¹	μeq l ⁻¹	mg l ⁻¹	μeq l ⁻¹	mg l ⁻¹	μeq l ⁻¹	mg l ⁻¹	μeq l ⁻¹			
N045	5,64	<	<	3,97	64,0	1,61	33,5	<	<	17	15	89,18%
N046	5,50	<	<	6,77	109,2	4,55	94,7	<	<	36	35	96,26%
N047	5,58	<	<	7,03	113,4	5,87	122,2	<	<	41	40	96,91%
N048	5,78	0,44	12,5	3,15	50,8	1,76	36,6	<	<	19	17	91,10%
N049	4,75	0,87	24,5	39,00	629,0	17,90	372,7	<	<	150	159	105,94%
N050	5,24	<	<	4,92	79,3	2,23	46,4	<	<	23	20	87,51%
N051												
N052	4,28	0,48	13,5	27,30	440,3	19,00	395,6	<	<	145	143	98,66%
N053	3,38	0,97	27,4	113,00	1822,4	80,90	1684,3	<	<	593	625	105,44%
N054	4,20	0,41	11,5	28,10	453,2	31,20	649,6	<	<	185	195	105,20%
N055	4,47	0,56	15,9	31,50	508,0	26,80	558,0	<	<	169	181	106,84%
N056	4,34	0,56	15,8	44,20	712,8	38,00	791,1	<	<	222	242	108,85%
N057	4,90	5,61	158,2	105,00	1693,4	51,40	1070,1	<	<	383	440	114,96%
N058	4,66	1,24	35,0	29,10	469,3	18,60	387,2	<	<	142	146	103,03%
N059	5,19	1,18	33,3	4,36	70,3	2,14	44,6	<	<	23	23	100,05%
N060	5,23	0,74	20,9	10,50	169,3	6,30	131,2	<	<	45	45	100,74%
N061	5,44	0,34	9,7	17,80	287,1	8,87	184,7	<	<	68	67	98,27%
N062	5,79	<	<	1,55	25,0	1,61	33,5	<	<	12	8	65,93%
N063												
N064	4,25	0,34	9,5	17,30	279,0	8,75	182,2	<	<	90	84	92,81%
N065	4,35	0,47	13,2	18,40	296,8	7,51	156,4	<	<	77	78	101,66%
N066	4,31	<	<	14,70	237,1	5,69	118,5	<	<	65	65	100,60%
N067	4,93	<	<	3,61	58,2	1,31	27,3	<	<	17	16	92,68%
N068	4,98	1,30	36,7	11,00	177,4	6,71	139,7	<	<	55	52	94,19%
N069	4,06	0,40	11,2	39,10	630,6	15,20	316,5	<	<	173	168	96,87%
N070	3,65	1,29	36,4	55,20	890,3	53,20	1107,6	<	<	379	368	97,21%
N071	4,23	0,62	17,5	19,70	317,7	18,00	374,8	<	<	134	125	93,31%
N072	3,71	1,44	40,6	65,90	1062,8	25,70	535,1	<	<	309	296	95,85%
N073	4,30	0,82	23,0	31,80	512,9	24,60	512,2	<	<	198	182	91,87%
N074	4,84	<	<	4,51	72,7	3,18	66,2	<	<	28	25	87,82%
N075	3,91	0,50	14,2	59,50	959,6	21,80	453,9	<	<	269	252	93,86%
N076	4,29	0,77	21,6	18,20	293,5	17,00	353,9	<	<	139	120	86,15%
N077	4,26	0,57	16,0	34,50	556,4	17,70	368,5	<	<	168	161	95,94%
N078	3,65	2,59	73,1	42,30	682,2	23,00	478,8	<	<	274	251	91,75%
N079	4,12	15,70	442,8	30,90	498,3	28,80	599,6	<	<	259	252	97,41%
N080	3,96	4,53	127,8	26,50	427,4	15,40	320,6	<	<	170	160	94,09%
N081	4,22	1,97	55,6	38,40	619,3	11,60	241,5	<	<	163	153	94,03%
N082	3,03	1,27	35,8	198,00	3193,3	66,50	1384,5	<	<	1010	938	92,87%
N083	4,09	<	<	21,30	343,5	8,60	179,0	<	<	92	96	104,27%
N084	3,66	0,35	9,9	30,20	487,1	15,90	331,0	<	<	200	188	94,00%
N085	4,02	0,45	12,6	22,10	356,4	9,24	192,4	<	<	109	108	98,71%
N086	4,71	<	<	2,88	46,4	1,15	23,9	<	<	18	17	91,85%
N087	3,77	0,55	15,5	41,60	670,9	27,60	574,6	<	<	260	246	94,62%
N088	4,04	0,65	18,4	27,70	446,7	27,70	576,7	<	<	208	195	93,77%
N089	3,68	0,94	26,5	47,70	769,3	38,80	807,8	<	<	318	306	96,28%
N090	3,84	0,97	27,4	28,10	453,2	34,90	726,6	<	<	241	230	95,27%
N091	4,12	<	<	14,60	235,5	5,69	118,5	<	<	77	73	94,31%

Probe	pH	Cl ⁻		NO ₃ ⁻		SO ₄ ²⁻		PO ₄ ³⁻		λ μS cm ⁻¹	λ _{ber} μS cm ⁻¹	$\frac{\lambda}{\lambda_{ber}}$
		mg l ⁻¹	μeq l ⁻¹	mg l ⁻¹	μeq l ⁻¹	mg l ⁻¹	μeq l ⁻¹	mg l ⁻¹	μeq l ⁻¹			
N092	3,23	1,37	38,6	65,50	1056,4	39,90	830,7	<	<	484	450	92,97%
N093	3,74	1,56	44,0	33,70	543,5	29,30	610,0	<	<	251	241	96,04%
N094	4,00	0,32	8,9	15,30	246,8	17,00	353,9	<	<	127	120	94,55%
N095	3,83	1,05	29,6	65,60	1058,0	37,40	778,7	<	<	339	327	96,55%
N096	3,61	1,04	29,3	116,00	1870,8	40,00	832,8	<	<	508	487	95,83%
N097	3,39	0,37	10,4	43,50	701,6	22,00	458,0	<	<	314	292	93,02%
N098	3,40	2,59	73,1	75,40	1216,0	23,80	495,5	<	<	385	374	97,11%
N099	3,15	2,01	56,7	128,00	2064,4	42,00	874,4	<	<	672	634	94,28%
N100	3,55	2,64	74,5	88,90	1433,8	81,00	1686,4	<	<	520	558	107,31%
N101	3,51	0,81	23,0	72,60	1170,9	22,90	476,8	<	<	309	326	105,43%
N102	4,14	1,09	30,7	22,80	367,7	10,20	212,4	<	<	104	113	108,18%
N103	3,86	1,50	42,3	56,20	906,4	21,00	437,2	<	<	224	240	107,31%
N104	3,62	2,02	57,0	151,00	2435,3	21,90	455,9	<	<	450	496	110,25%
N105	4,26	1,27	35,8	52,30	843,5	27,60	574,6	<	<	211	233	110,53%
N106	3,93	2,00	56,4	111,00	1790,2	47,40	986,8	<	<	416	454	109,25%
N107	4,21	1,10	31,0	102,00	1645,0	21,30	443,5	<	<	304	334	110,02%
N108	4,04	3,12	88,0	155,00	2499,8	182,00	3789,2	<	<	841	1020	121,32%
N109	3,51	3,17	89,4	85,20	1374,1	42,50	884,8	<	<	420	439	104,41%
N110	3,98	1,82	51,3	39,80	641,9	33,70	701,6	<	<	219	236	107,90%
N111	3,61	44,10	1243,9	252,00	4064,2	59,50	1238,8	<	<	807	955	118,29%
N112	4,77	0,80	22,6	2,33	37,6	2,95	61,4	<	<	18	19	106,55%
N113	3,63	1,30	36,7	71,80	1158,0	10,70	222,8	<	<	244	255	104,62%
N114	4,27	1,86	52,5	46,90	756,4	29,70	618,3	<	<	209	230	109,82%
N115	3,89	6,05	170,6	14,60	235,5	9,66	201,1	<	<	116	122	104,76%
N116	4,29	1,68	47,4	8,20	132,2	7,23	150,5	<	<	58	63	109,37%
N117	4,76	0,49	13,9	3,19	51,4	3,08	64,1	<	<	24	24	101,58%
N118	3,96	0,98	27,8	17,80	287,1	7,64	159,1	<	<	95	99	104,47%
N119	3,92	0,95	26,8	38,50	620,9	13,30	276,9	<	<	165	162	98,42%
N120	4,88	0,60	16,8	10,60	171,0	8,27	172,2	<	<	59	56	94,98%
N121	5,11	0,37	10,5	14,60	235,5	7,53	156,8	<	<	67	64	95,84%
N122	4,85	0,41	11,4	11,80	190,3	6,26	130,3	<	<	57	56	97,44%
N123	4,67	0,54	15,3	11,30	182,2	8,15	169,7	<	<	61	62	101,77%
N124	4,32	0,91	25,5	22,60	364,5	18,90	393,5	<	<	135	138	102,38%
N125	4,53	0,95	26,8	23,00	370,9	12,90	268,6	<	<	109	110	100,88%
N126		2,04	57,5	44,60	719,3	19,10	397,7	<	<	<	174	
N127	4,29	0,59	16,7	27,00	435,4	5,61	116,8	<	<	98	98	99,61%
N128	4,41	13,40	378,0	12,90	208,0	8,48	176,5	<	<	111	116	104,57%
N129	4,25	6,10	172,1	16,80	270,9	9,63	200,5	<	<	102	107	104,45%
N130	4,94	21,50	606,4	9,38	151,3	6,78	141,2	<	<	106	119	112,33%
N131	3,83	7,76	218,9	38,80	625,8	10,10	210,3	<	<	174	186	106,75%
N132	3,87	3,39	95,6	39,90	643,5	16,60	345,6	<	<	178	190	106,99%
N133	3,45	2,20	62,1	50,50	814,5	17,80	370,6	<	<	249	275	110,32%
N134	3,07	3,40	95,9	97,50	1572,5	38,30	797,4	<	<	513	582	113,53%
N135	3,34	4,01	113,1	120,00	1935,3	101,00	2102,8	<	<	652	745	114,20%
N136	3,57	1,72	48,5	76,80	1238,6	52,40	1090,9	<	<	401	424	105,62%
N137	3,87	0,86	24,2	38,60	622,5	21,60	449,7	<	<	189	199	105,43%
N138	3,70	1,29	36,4	37,90	611,2	17,40	362,3	<	<	187	203	108,35%

Probe	pH	Cl ⁻		NO ₃ ⁻		SO ₄ ²⁻		PO ₄ ³⁻		λ μS cm ⁻¹	λ _{ber} μS cm ⁻¹	$\frac{\lambda}{\lambda_{ber}}$
		mg l ⁻¹	μeq l ⁻¹	mg l ⁻¹	μeq l ⁻¹	mg l ⁻¹	μeq l ⁻¹	mg l ⁻¹	μeq l ⁻¹			
N139	3,39	4,38	123,5	81,50	1314,4	52,00	1082,6	<	<	401	477	118,93%
N140	3,70	1,78	50,2	50,10	808,0	11,70	243,6	<	<	186	217	116,72%
N141	3,49	6,85	193,2	54,60	880,6	10,80	224,9	<	<	231	276	119,41%
N142	4,04	1,62	45,7	11,10	179,0	3,92	81,6	<	<	61	69	112,86%
N143	4,10	1,37	38,6	12,70	204,8	6,40	133,2	<	<	80	80	99,54%
N144	3,53	2,53	71,4	59,00	951,5	13,00	270,7	<	<	247	265	107,47%
N145	3,53	5,43	153,2	66,10	1066,0	22,80	474,7	<	<	288	324	112,50%
N146	3,24	6,42	181,1	85,10	1372,5	22,00	458,0	<	<	405	450	111,15%
N147	3,42	3,30	93,1	56,50	911,2	17,40	362,3	<	<	270	301	111,33%
N148	3,37	3,06	86,3	119,00	1919,2	34,90	726,6	<	<	444	499	112,33%
N149	3,52	7,32	206,5	80,80	1303,1	41,60	866,1	<	<	392	426	108,65%
N150	3,79	0,73	20,7	14,40	232,2	5,54	115,3	0,96	30,5	97	103	106,13%
N151	3,81	1,28	36,1	13,10	211,3	7,87	163,8	<	<	100	102	101,93%
N152	4,01	0,84	23,7	9,81	158,2	5,03	104,7	<	<	68	69	101,83%
N153	4,03	1,58	44,6	13,60	219,3	9,32	194,0	<	<	90	94	104,15%
N154	3,65	1,47	41,5	66,30	1069,3	23,80	495,5	<	<	262	287	109,53%
N155	4,81	0,44	12,3	11,20	180,6	7,73	160,9	<	<	56	57	102,07%
N156	4,46	0,53	14,9	10,10	162,9	8,40	174,9	<	<	61	62	101,78%
N157	3,79	3,37	95,1	25,20	406,4	41,00	853,6	<	<	220	245	111,37%
N158	3,46	7,89	222,6	115,00	1854,7	74,90	1559,4	<	<	557	613	110,10%
N159	3,59	3,12	88,0	47,90	772,5	49,40	1028,5	<	<	321	348	108,48%
N160	4,00	26,00	733,4	103,00	1661,2	62,60	1303,3	<	<	495	540	109,08%
N161	3,52	4,27	120,4	102,00	1645,0	54,60	1136,7	<	<	459	497	108,21%
N162	3,74	1,45	40,9	62,10	1001,5	24,90	518,4	<	<	249	275	110,32%
N163	3,62	0,81	22,8	33,00	532,2	9,54	198,6	<	<	168	175	104,33%
N164	4,77	0,44	12,4	18,20	293,5	5,44	113,3	<	<	103	53	51,80%
N165	4,85	0,99	27,8	6,50	104,8	4,49	93,5	<	<	35	31	87,45%
N166	4,79	1,08	30,5	10,40	167,7	5,18	107,8	<	<	47	45	94,70%
N167	4,14	0,36	10,1	13,60	219,3	2,94	61,2	<	<	64	58	90,44%
N168	3,19	3,18	89,7	130,00	2096,6	44,70	930,6	<	<	592	619	104,52%
N169	3,73	0,84	23,6	29,30	472,5	11,90	247,8	<	<	156	160	102,29%
N170	3,91	1,08	30,5	27,20	438,7	12,70	264,4	<	<	143	144	100,80%
N171	3,95	0,40	11,4	11,40	183,9	4,22	87,9	<	<	76	73	95,61%
N172	3,74	0,58	16,3	21,50	346,7	7,44	154,9	<	<	126	128	101,49%
N173	4,07	0,39	11,0	13,20	212,9	7,59	158,0	<	<	86	81	93,64%
N174	4,36	0,42	11,9	9,28	149,7	6,23	129,7	<	<	59	56	94,35%
N175	3,85	0,31	8,6	13,60	219,3	4,36	90,8	<	<	89	86	96,60%
N176	3,45	0,98	27,6	44,50	717,7	10,30	214,4	<	<	226	236	104,64%
N177	3,53	1,27	35,8	30,90	498,3	14,80	308,1	<	<	196	204	104,22%
N178	4,10	0,58	16,4	11,20	180,6	6,78	141,2	<	<	70	69	98,34%
N179	4,28	0,27	7,7	7,85	126,6	2,28	47,5	<	<	41	38	92,91%
N180	2,92	2,15	60,6	119,00	1919,2	51,10	1063,9	<	<	687	766	111,54%
N181	2,73	5,12	144,4	161,00	2596,6	76,40	1590,6	<	<	973	1147	117,91%
N182	3,74	1,39	39,2	22,00	354,8	10,30	214,4	<	<	134	142	106,16%
N183	3,25	7,57	213,5	112,00	1806,3	31,80	662,1	<	<	490	519	105,97%
N184	4,29	0,82	23,2	14,00	225,8	6,70	139,5	<	<	77	71	92,35%
N185	4,65	0,38	10,6	12,10	195,1	5,13	106,8	<	<	58	53	91,08%

Probe	pH	Cl ⁻		NO ₃ ⁻		SO ₄ ²⁻		PO ₄ ³⁻		λ μS cm ⁻¹	λ _{ber} μS cm ⁻¹	$\frac{\lambda}{\lambda_{ber}}$
		mg l ⁻¹	μeq l ⁻¹	mg l ⁻¹	μeq l ⁻¹	mg l ⁻¹	μeq l ⁻¹	mg l ⁻¹	μeq l ⁻¹			
N186	5,22	0,47	13,2	5,04	81,3	4,69	97,6	<	<	36	31	86,21%
N187	4,73	<	<	8,57	138,2	5,50	114,5	<	<	48	42	86,91%
N188	3,47	2,08	58,7	94,20	1519,2	114,00	2373,4	<	<	635	672	105,80%
N189	3,14	0,44	12,5	76,00	1225,7	10,10	210,3	<	<	380	402	105,74%
N190	4,44	5,79	163,3	111,00	1790,2	40,30	839,0	<	<	392	398	101,61%
N191	4,31	4,37	123,3	83,40	1345,1	23,00	478,8	<	<	294	292	99,42%
N192	4,43	0,91	25,6	30,30	488,7	11,50	239,4	<	<	127	122	95,83%
N193	3,39	0,56	15,7	60,80	980,6	8,28	172,4	<	<	267	275	103,07%
N194	4,19	3,37	95,1	24,20	390,3	8,39	174,7	<	<	116	114	98,54%
N195	4,53	0,70	19,7	9,37	151,1	4,80	99,9	<	<	50	47	93,31%
N196	4,59	0,44	12,5	9,57	154,3	4,31	89,7	<	<	48	43	89,67%
N197	4,33	1,16	32,7	11,70	188,7	9,07	188,8	<	<	82	74	90,74%
N198	4,64	0,89	25,1	23,40	377,4	12,90	268,6	<	<	115	110	96,04%
N199	4,12	1,46	41,2	36,20	583,8	11,80	245,7	<	<	157	153	97,58%
N200	4,10	1,68	47,4	42,30	682,2	16,60	345,6	<	<	186	180	96,82%
N201	3,60	1,23	34,7	43,20	696,7	19,50	406,0	<	<	232	230	99,27%
N202		2,52	71,1	30,20	487,1	8,89	185,1	<	<	<	94	
N203	3,88	2,07	58,4	82,40	1328,9	29,10	605,8	<	<	317	324	102,23%
N204	3,70	3,44	97,0	79,80	1287,0	46,30	963,9	<	<	388	396	101,98%
N205	4,17	8,50	239,8	190,00	3064,3	143,00	2977,2	<	<	846	925	109,35%
N206	5,21	0,32	8,9	9,21	148,5	6,34	132,0	<	<	46	42	92,08%
N207	5,47	1,83	51,6	61,30	988,6	29,10	605,8	<	<	237	235	99,29%
N208	5,73	1,23	34,7	26,70	430,6	15,40	320,6	<	<	129	120	93,01%
N209	5,70	0,55	15,4	6,85	110,5	6,51	135,5	<	<	42	33	78,25%
N210	5,52	0,37	10,4	3,64	58,7	4,31	89,7	<	<	28	22	78,55%
N211	5,82	0,32	9,0	4,63	74,7	4,22	87,9	<	<	32	26	82,41%
N212	5,06	0,37	10,5	5,02	81,0	3,70	77,0	<	<	31	24	78,94%
N213	5,15	<	<	4,05	65,3	2,62	54,5	<	<	23	17	75,71%
N214	3,88	0,28	7,9	5,89	95,0	13,40	279,0	<	<	96	93	97,00%
N215	4,06	1,16	32,7	7,28	117,4	11,60	241,5	<	<	83	80	96,51%
N216	4,11	0,41	11,6	22,30	359,6	7,96	165,7	<	<	104	98	93,79%
N217	4,37	0,72	20,2	38,50	620,9	17,20	358,1	<	<	160	156	97,29%
N218	3,75	2,72	76,7	144,00	2322,4	76,20	1586,4	<	<	589	632	107,28%
N219	4,53	1,06	29,9	114,00	1838,6	39,60	824,5	<	<	435	403	92,72%
N220	3,76	1,72	48,5	79,20	1277,3	41,10	855,7	<	<	373	368	98,79%
N221	3,54	2,33	65,7	75,00	1209,6	42,10	876,5	<	<	405	396	97,84%
N222	4,76	0,81	22,8	12,60	203,2	6,92	144,1	<	<	58	66	113,38%
N223	4,87	4,58	129,2	51,70	833,8	26,60	553,8	0,37	11,8	218	233	106,69%
N224	5,06	2,84	80,1	36,00	580,6	29,70	618,3	<	<	189	195	103,11%
N225	5,18	10,70	301,8	16,80	270,9	19,70	410,1	<	<	140	145	103,29%
N226	5,35	5,30	149,5	7,55	121,8	9,74	202,8	<	<	71	69	97,73%
N227	5,04	24,10	679,8	44,10	711,2	22,70	472,6	2,34	73,9	227	258	113,86%
N228	4,69	1,48	41,7	31,60	509,6	11,20	233,2	<	<	124	118	95,07%
N229	3,99	0,47	13,2	45,10	727,4	12,50	260,2	<	<	185	172	93,10%
N230	4,69	0,51	14,4	16,90	272,6	14,00	291,5	<	<	90	92	102,44%
N231	4,79	0,52	14,6	12,20	196,8	9,36	194,9	<	<	65	64	98,51%
N232	4,67	0,78	22,1	24,80	400,0	19,70	410,1	<	<	127	130	102,05%

Probe	pH	Cl ⁻		NO ₃ ⁻		SO ₄ ²⁻		PO ₄ ³⁻		λ μS cm ⁻¹	λ _{ber} μS cm ⁻¹	$\frac{\lambda}{\lambda_{ber}}$
		mg l ⁻¹	μeq l ⁻¹	mg l ⁻¹	μeq l ⁻¹	mg l ⁻¹	μeq l ⁻¹	mg l ⁻¹	μeq l ⁻¹			
N233	4,01	1,00	28,1	54,00	870,9	26,50	551,7	<	<	233	237	101,66%
N234												
N235	3,15	1,40	39,5	187,00	3015,9	59,70	1242,9	<	<	804	785	97,68%
N236	4,11	0,99	27,8	47,80	770,9	34,40	716,2	0,37	11,8	233	244	104,55%
N237	3,95	1,37	38,6	55,00	887,0	31,10	647,5	<	<	247	258	104,64%
N238	4,37	0,45	12,6	15,60	251,6	8,59	178,8	0,42	13,1	77	75	97,12%
N239	4,60	0,32	9,0	14,10	227,4	10,00	208,2	<	<	70	71	101,34%
N240	4,68	0,41	11,6	15,10	243,5	9,48	197,4	<	<	73	75	102,28%
N241	5,30	15,80	445,7	59,20	954,8	39,80	828,6	<	<	288	329	114,20%
N242	5,26	20,80	586,7	93,40	1506,3	46,50	968,1	<	<	376	437	116,31%
N243	5,31	9,21	259,8	64,40	1038,6	28,80	599,6	<	<	247	275	111,52%
N244	4,70	1,21	34,1	69,90	1127,3	51,70	1076,4	<	<	296	333	112,44%
N245	5,02	0,84	23,7	19,50	314,5	20,30	422,6	0,35	11,0	115	117	102,10%
N246	5,04	0,70	19,6	19,50	314,5	22,40	466,4	<	<	114	122	107,23%
N247	5,43	0,62	17,5	5,26	84,8	5,79	120,5	0,32	10,0	37	33	90,43%
N248	5,24	0,94	26,4	7,15	115,3	6,56	136,6	<	<	43	39	91,34%
N249	4,99	7,12	200,8	33,00	532,2	16,40	341,4	0,56	17,8	137	152	111,24%
N250	4,71	0,64	18,1	13,70	221,0	15,80	328,9	<	<	95	88	92,62%
N251	5,04	0,61	17,1	17,40	280,6	12,80	266,5	<	<	84	88	104,84%
N252	5,10	0,73	20,7	19,40	312,9	15,30	318,5	0,35	11,0	94	99	104,88%
N253	5,37	<	<	6,86	110,6	5,96	124,1	<	<	37	34	92,29%
N254	4,94	<	<	5,70	91,9	6,91	143,9	<	<	40	35	88,68%
N255	4,79	<	<	9,29	149,8	6,64	138,2	<	<	47	46	96,86%
N256	4,37	<	<	11,00	177,4	8,26	172,0	<	<	65	60	92,69%
N257	4,28	<	<	13,20	212,9	13,70	285,2	<	<	86	86	100,15%
N258	4,33	0,48	13,5	23,90	385,5	10,70	222,8	<	<	100	103	103,36%
N259	4,74	<	<	14,50	233,9	5,66	117,8	<	<	56	57	101,46%
N260	4,45	3,49	98,4	33,30	537,1	15,10	314,4	0,87	27,5	158	141	89,22%
N261	4,19	3,68	103,8	103,00	1661,2	48,70	1013,9	1,02	32,2	397	422	106,35%
N262	5,27	0,70	19,6	25,40	409,6	16,90	351,9	0,40	12,7	132	125	94,35%
N263	5,44	1,14	32,2	28,10	453,2	14,40	299,8	<	<	122	120	98,53%
N264	5,22	6,35	179,1	138,00	2225,6	90,70	1888,3	<	<	556	633	113,83%
N265	5,41	3,67	103,5	126,00	2032,1	48,70	1013,9	<	<	432	461	106,68%
N266	5,39	6,34	178,8	37,50	604,8	18,10	376,8	<	<	172	155	90,33%
N267	4,81	0,99	27,9	32,70	527,4	8,15	169,7	<	<	118	107	90,45%
N268	4,61	1,02	28,8	65,80	1061,2	22,40	466,4	<	<	225	229	101,77%
N269	4,79	0,86	24,1	39,40	635,4	17,90	372,7	<	<	161	154	95,89%
N270	5,49	1,82	51,3	69,40	1119,3	31,60	657,9	<	<	272	274	100,68%
N271	5,40	8,33	235,0	76,20	1228,9	41,50	864,0	<	<	333	346	103,78%
N272	5,58	17,80	502,1	92,40	1490,2	51,90	1080,5	0,35	11,1	429	451	105,05%
N273	5,47	4,64	130,9	40,10	646,7	21,80	453,9	0,41	12,8	184	179	97,02%
N274	5,47	0,62	17,6	6,86	110,6	4,84	100,8	<	<	41	29	69,96%
N275	5,21	1,50	42,3	65,70	1059,6	26,40	549,6	1,45	45,8	233	248	106,45%
N276	3,92	2,94	82,9	72,40	1167,6	18,50	385,2	<	<	271	264	97,36%
N277	4,34	3,90	110,0	51,10	824,1	16,60	345,6	<	<	192	197	102,67%
N278	4,90	1,24	35,0	20,60	332,2	11,00	229,0	<	<	94	94	99,87%
N279	5,12	2,75	77,6	16,60	267,7	9,64	200,7	<	<	83	83	100,05%

Probe	pH	Cl ⁻		NO ₃ ⁻		SO ₄ ²⁻		PO ₄ ³⁻		λ μS cm ⁻¹	λ _{ber} μS cm ⁻¹	$\frac{\lambda}{\lambda_{ber}}$
		mg l ⁻¹	μeq l ⁻¹	mg l ⁻¹	μeq l ⁻¹	mg l ⁻¹	μeq l ⁻¹	mg l ⁻¹	μeq l ⁻¹			
N280	4,33	2,21	62,3	31,00	500,0	13,70	285,2	0,66	20,8	145	134	92,25%
N281	4,24	0,36	10,2	24,90	401,6	8,65	180,1	<	<	105	100	95,00%
N282	3,38	5,14	145,0	215,00	3467,5	86,00	1790,5	<	<	887	897	101,14%
N283	4,12	1,37	38,6	19,70	317,7	15,20	316,5	<	<	134	117	87,48%
N284	4,53	0,58	16,5	8,49	136,9	7,33	152,6	<	<	54	51	94,30%
N285	4,22	7,60	214,4	40,50	653,2	32,60	678,7	<	<	225	244	108,38%
N286	4,53	16,10	454,1	17,50	282,2	15,50	322,7	<	<	145	155	106,95%
N287	4,55	9,66	272,5	10,30	166,1	9,06	188,6	<	<	94	139	148,37%
N288	4,94	0,92	25,9	2,59	41,8	3,80	79,1	<	<	43	25	57,14%
N289	4,33	2,85	80,4	19,60	316,1	11,80	245,7	<	<	114	102	89,08%
N290	3,44	3,08	86,9	64,70	1043,5	33,60	699,5	<	<	374	353	94,50%
N291	3,70	1,76	49,6	36,80	593,5	20,40	424,7	<	<	219	206	93,84%
N292	4,72	0,58	16,3	8,08	130,3	5,39	112,2	0,57	18,1	46	43	93,62%
N293	4,63	<	<	9,81	158,2	6,13	127,6	<	<	50	45	90,96%
N294	3,40	1,50	42,3	69,90	1127,3	19,20	399,7	<	<	349	320	91,71%
N295	3,21	2,40	67,7	82,90	1337,0	20,10	418,5	<	<	472	417	88,31%
N296	3,79	2,18	61,5	31,00	500,0	21,60	449,7	<	<	198	192	96,80%
N297	4,08	1,01	28,5	16,90	272,6	14,10	293,6	<	<	113	109	96,32%
N298	4,41	0,68	19,3	18,70	301,6	12,40	258,2	<	<	114	93	81,62%
N299	4,43	1,21	34,1	21,00	338,7	11,90	247,8	<	<	104	99	94,97%
N300	4,46	1,42	40,1	27,20	438,7	14,10	293,6	<	<	125	123	98,56%
N301	3,35	2,14	60,4	70,90	1143,5	25,60	533,0	<	<	392	359	91,61%
N302	3,05	9,16	258,4	155,00	2499,8	58,60	1220,0	<	<	858	795	92,68%
N303	3,50	4,16	117,3	64,10	1033,8	27,30	568,4	0,71	22,3	347	332	95,72%
N304	4,02	0,94	26,5	23,70	382,2	16,60	345,6	<	<	143	139	97,49%
N305	4,21	0,47	13,2	12,80	206,4	12,40	258,2	<	<	91	87	95,49%
N306	4,17	<	<	11,60	187,1	5,50	114,5	0,38	12,0	69	63	91,36%
N307	3,67	0,32	9,1	28,40	458,0	11,70	243,6	<	<	175	160	91,43%
N308	2,98	2,14	60,4	385,00	6209,2	114,00	2373,4	<	<	1520	1475	97,02%
N309	3,59	1,81	51,1	44,50	717,7	21,20	441,4	<	<	250	244	97,52%
N310	3,43	4,63	130,6	69,00	1112,8	38,90	809,9	<	<	412	397	96,40%
N311	3,80	1,54	43,4	34,70	559,6	18,30	381,0	0,40	12,7	193	186	96,51%
N312	3,69	1,42	40,1	38,00	612,9	34,90	726,6	<	<	271	260	96,03%
N313	4,21	0,83	23,4	12,10	195,1	10,50	218,6	1,72	54,3	83	79	95,47%
N314	4,31	0,38	10,6	11,80	190,3	9,49	197,6	<	<	75	70	92,90%
N315	4,20	0,28	7,8	15,10	243,5	8,21	170,9	<	<	88	78	88,16%
N316	4,33	0,34	9,7	13,10	211,3	5,52	114,9	<	<	69	61	87,84%
N317	4,46	2,06	58,1	32,10	517,7	19,40	403,9	1,64	51,8	168	161	95,81%
N318	4,86	0,36	10,2	15,00	241,9	7,35	153,0	<	<	75	62	83,17%
N319	4,24	0,68	19,2	25,90	417,7	10,20	212,4	<	<	124	110	88,85%
N320	4,59	2,07	58,4	10,70	172,6	8,36	174,1	<	<	70	63	89,84%
N321	4,52	5,69	160,5	105,00	1693,4	44,50	926,5	<	<	365	393	107,76%
N322	3,79	1,43	40,3	30,30	488,7	9,67	201,3	<	<	155	146	93,94%
N323	4,27	2,41	68,0	15,30	246,8	6,78	141,2	<	<	80	78	97,37%
N324	4,19	2,74	77,3	68,80	1109,6	25,70	535,1	<	<	257	261	101,67%
N325	4,22	2,81	79,3	34,20	551,6	14,30	297,7	<	<	147	149	101,20%
N326	3,62	3,02	85,2	66,10	1066,0	15,00	312,3	<	<	284	267	94,19%

Probe	pH	Cl ⁻		NO ₃ ⁻		SO ₄ ²⁻		PO ₄ ³⁻		λ μS cm ⁻¹	λ _{ber} μS cm ⁻¹	$\frac{\lambda}{\lambda_{ber}}$
		mg l ⁻¹	μeq l ⁻¹	mg l ⁻¹	μeq l ⁻¹	mg l ⁻¹	μeq l ⁻¹	mg l ⁻¹	μeq l ⁻¹			
N327	3,58	8,80	248,2	69,30	1117,7	19,40	403,9	<	<	331	315	95,06%
N328	3,88	4,88	137,6	30,80	496,7	14,10	293,6	<	<	174	167	96,18%
N329	3,59	9,88	278,7	80,90	1304,7	27,90	580,9	<	<	373	370	99,21%
N330	3,38	10,40	293,3	90,50	1459,6	27,30	568,4	<	<	454	431	95,01%
N331												
N332	3,82	5,09	143,6	101,00	1628,9	25,40	528,8	<	<	355	354	99,79%
N333	3,55	4,40	124,1	99,10	1598,3	42,90	893,2	<	<	443	438	98,83%
N334	3,13	5,37	151,5	168,00	2709,5	58,50	1217,9	<	<	777	742	95,47%
N335	3,92	1,79	50,5	25,10	404,8	14,20	295,6	<	<	151	139	91,74%
N336	4,73	0,80	22,6	12,70	204,8	5,79	120,5	<	<	63	56	88,31%
N337	3,37	4,02	113,4	58,90	949,9	20,00	416,4	<	<	365	327	89,50%
N338	3,30	4,13	116,5	70,00	1128,9	23,80	495,5	<	<	435	384	88,19%
N339	3,31	6,23	175,7	171,00	2757,8	91,40	1902,9	<	<	840	798	94,98%
N340												
N341	3,62	31,70	894,1	83,80	1351,5	38,30	797,4	<	<	511	477	93,41%
N342	4,68	10,70	301,8	22,60	364,5	12,60	262,3	<	<	150	137	91,25%
N343	4,83	15,80	445,7	26,30	424,2	18,40	383,1	<	<	198	183	92,42%
N344	4,97	26,30	741,8	53,60	864,4	23,50	489,3	<	<	312	296	95,00%
N345	4,96	17,90	504,9	101,00	1628,9	23,80	495,5	<	<	397	359	90,36%
N346	4,15	2,59	73,1	78,00	1258,0	17,50	364,3	<	<	282	263	93,15%
N347	3,54	3,23	91,1	63,40	1022,5	20,10	418,5	<	<	325	297	91,44%
N348	3,72	7,45	210,1	68,80	1109,6	24,10	501,8	<	<	327	311	95,06%
N349	3,49	22,00	620,5	164,00	2645,0	42,20	878,6	<	<	<	649	
N350	4,36	1,83	51,6	17,80	287,1	10,30	214,4	<	<	99	92	92,64%
N351	3,70	6,20	174,9	47,80	770,9	18,60	387,2	<	<	263	245	93,27%
N352	3,89	9,60	270,8	48,90	788,6	23,20	483,0	<	<	267	254	95,23%
N353	4,27	1,82	51,3	27,50	443,5	14,20	295,6	<	<	138	129	93,71%
N354	4,33	0,84	23,6	8,90	143,5	4,08	84,9	<	<	52	48	92,26%
N355	4,93	0,57	16,2	1,11	17,9	1,06	22,1	<	<	<	10	
N356	5,72	0,65	18,3	2,98	48,1	2,27	47,3	<	<	<	16	
N357	3,79	9,26	261,2	29,30	472,5	15,20	316,5	<	<	209	189	90,34%
N358	4,13	2,43	68,5	15,80	254,8	7,38	153,6	<	<	100	93	93,22%
N359	4,21	0,76	21,4	9,54	153,9	4,43	92,2	<	<	59	53	90,40%
N360	3,47	2,26	63,7	45,70	737,0	16,90	351,9	<	<	283	256	90,29%
N361	3,34	2,35	66,3	76,60	1235,4	23,00	478,8	<	<	420	376	89,64%
N362	3,56	12,70	358,2	63,40	1022,5	22,70	472,6	<	<	346	334	96,40%
N363	3,64	14,80	417,5	47,10	759,6	16,40	341,4	<	<	288	273	94,76%
N364a												
N364	3,63	24,60	693,9	67,20	1083,8	29,80	620,4	<	<	408	373	91,54%
N365	3,45	8,22	231,9	55,00	887,0	32,30	672,5	<	<	398	347	87,26%
N366	3,79	8,78	247,7	55,10	888,6	31,80	662,1	<	<	403	339	84,05%
N367	3,30	3,50	98,7	47,30	762,8	48,00	999,3	<	<	452	399	88,23%
N368	3,47	2,19	61,8	27,20	438,7	28,00	582,9	<	<	277	246	88,80%
N369	4,17	1,70	48,0	15,30	246,8	18,60	387,2	<	<	122	119	97,38%
N370	4,31	3,02	85,2	20,00	322,6	13,20	274,8	<	<	116	112	96,64%
N371	4,07	4,45	125,5	45,10	727,4	19,70	410,1	<	<	215	203	94,45%
N372	4,34	9,49	267,7	77,10	1243,4	34,20	712,0	<	<	335	333	99,55%

Probe	pH	Cl ⁻		NO ₃ ⁻		SO ₄ ²⁻		PO ₄ ³⁻		λ μS cm ⁻¹	λ _{ber} μS cm ⁻¹	$\frac{\lambda}{\lambda_{ber}}$
		mg l ⁻¹	μeq l ⁻¹	mg l ⁻¹	μeq l ⁻¹	mg l ⁻¹	μeq l ⁻¹	mg l ⁻¹	μeq l ⁻¹			
N373	3,94	4,34	122,4	46,10	743,5	25,70	535,1	<	<	247	234	94,89%
N374	3,53	3,70	104,4	52,60	848,3	27,50	572,5	<	<	334	300	89,75%
N375	3,29	5,60	158,0	157,00	2532,1	95,70	1992,4	<	<	828	796	96,13%
N376	3,97	1,24	35,0	2,63	42,4	2,40	50,0	0,85	26,8	118	79	66,81%
N377	4,26	2,39	67,4	9,32	150,3	4,64	96,6	<	<	67	60	88,82%
N378	4,53	1,27	35,8	17,40	280,6	30,20	628,8	<	<	151	144	95,35%
N379	3,89	1,08	30,5	17,30	279,0	26,10	543,4	<	<	127	138	108,89%
N380	3,51	9,43	266,0	46,20	745,1	14,40	299,8	<	<	302	269	89,23%
N381	3,32	25,70	724,9	14,40	232,2	28,10	585,0	<	<	540	410	75,87%
N382	3,82	22,90	645,9	69,60	1122,5	12,20	254,0	<	<	329	306	92,89%
N383	4,22	2,94	82,9	12,70	204,8	6,71	139,7	<	<	80	74	92,14%
N384	4,64	0,61	17,3	5,05	81,4	4,16	86,6	<	<	36	32	88,52%
N385	4,41	0,74	20,9	9,92	160,0	3,88	80,8	<	<	54	47	86,43%
N386	3,79	1,92	54,2	24,60	396,7	12,90	268,6	<	<	170	149	87,48%
N387	3,71	2,65	74,7	25,90	417,7	18,90	393,5	<	<	205	180	87,70%
N388	3,73	1,14	32,2	26,50	427,4	16,30	339,4	<	<	196	170	86,74%
N389	4,50	0,75	21,2	9,59	154,7	11,70	243,6	<	<	77	70	90,69%
N390	4,60	0,64	18,0	8,74	141,0	10,40	216,5	0,52	16,3	67	62	92,95%
N391	4,62	0,62	17,5	6,06	97,7	15,70	326,9	<	<	81	72	89,42%
N392	6,09	0,81	22,7	6,83	110,2	13,30	276,9	<	<	65	61	93,24%
N393	5,91	0,79	22,2	5,07	81,8	11,30	235,3	<	<	87	65	74,42%
N394	4,14	2,96	83,5	26,20	422,5	21,60	449,7	<	<	176	156	88,90%
N395	3,62	9,86	278,1	45,10	727,4	29,90	622,5	<	<	<	297	
N396	3,32	2,12	59,8	52,50	846,7	24,30	505,9	<	<	395	335	84,86%
N397	3,40	2,17	61,2	43,10	695,1	14,50	301,9	<	<	291	257	88,41%
N398	3,20	1,59	44,8	54,20	874,1	31,60	657,9	<	<	470	397	84,41%
N399	3,29	2,03	57,3	44,00	709,6	35,40	737,0	<	<	427	366	85,77%
N400	3,61	0,82	23,1	22,30	359,6	20,30	422,6	<	<	197	183	93,08%
N401	3,02	3,30	93,1	106,00	1709,5	81,40	1694,7	<	<	892	748	83,87%
N402	3,68	2,74	77,3	19,30	311,3	13,20	274,8	<	<	182	160	87,85%
N403	3,84	5,03	141,9	16,40	264,5	9,25	192,6	<	<	142	127	89,30%
N404	3,86	9,78	275,9	18,50	298,4	14,60	304,0	<	<	182	164	90,27%
N405	4,57	3,49	98,4	9,43	152,1	9,24	192,4	<	<	75	66	88,44%
N406	4,81	0,73	20,7	2,93	47,3	3,33	69,3	<	<	27	22	83,05%
N407	4,01	8,89	250,8	26,00	419,3	11,80	245,7	<	<	170	155	91,12%
N408	4,31	1,62	45,7	7,77	125,3	4,89	101,8	0,62	19,5	56	52	93,66%
N409	4,61	0,76	21,3	2,02	32,6	2,36	49,1	0,99	31,2	26	24	93,36%
N410	4,83	<	<	1,32	21,3	0,69	14,3	<	<	11	9	81,71%
N411	4,87	0,30	8,5	2,08	33,5	1,35	28,1	<	<	15	13	86,57%
N412	4,93	1,89	53,3	2,33	37,6	1,22	25,4	<	<	22	19	87,49%
N413	3,24	6,00	169,2	85,60	1380,5	37,60	782,8	<	<	553	486	87,92%
N414	3,37	3,16	89,1	33,80	545,1	19,00	395,6	0,67	21,1	311	267	85,92%
N415	3,81	11,90	335,7	73,80	1190,2	28,00	582,9	0,82	25,9	376	353	93,93%
N416	3,53	10,50	296,2	131,00	2112,7	34,00	707,9	<	<	553	512	92,61%
N417	3,56	9,39	264,9	148,00	2386,9	49,20	1024,3	1,26	39,8	632	592	93,70%
N418	4,20	1,37	38,6	14,30	230,6	7,35	153,0	<	<	85	78	91,55%
N419	3,96	1,70	48,0	16,00	258,0	9,55	198,8	<	<	117	105	89,72%

Anhang D: Gemessene Nebelwasserflüsse, Verteilungsmaxima, Flüssigwassergehalte und Sichtweiten für die Nebelereignisse

Ereignis	Sedimentativer Fluss [g m ⁻²]	Turbulenter Fluss [g m ⁻²]	Gesamtfluss [g m ⁻²]	$d_{\max,N}$ [μm]	$d_{\max,LWC}$ [μm]	Flüssigwassergehalt [mg m ⁻³]	Sichtweite [m]
N190	-1,2	--	-1,2	9	--	184	0
N191	-7,9	+25,9	+18,0	9	15	131	0
N192	-7,5	+3,3	-4,1	2	49	47	377
N193	-96,5	+7,4	-89,1	9	22	156	151
N194	--	--	--	--	--	--	193
N195	--	--	--	--	--	--	134
N196	--	--	--	--	--	--	121
N197	--	--	--	--	--	--	244
N198	--	--	--	--	--	--	259
N199	-1,8	--	-1,8	2	--	187	0
N200	-10,1	-33,5	-43,6	2	9	0	0
N201	-0,1	-1,2	-1,3	2	34	2	0
N202	-0,0	0	-0,0	2	17	0	332
N203	-0,2	-38,2	-38,4	2	34	2	122
N204	-0,2	-39,3	-39,5	2	37	2	0
N205	-0,1	-21,2	-21,3	2	28	1	281
N207	-44,7	-752,7	-797,4	2	6	196	166
N208	-58,1	-1348,3	-1406,4	9	6	245	145
N209	-53,8	-818,2	-872,0	14	6	258	171
N210	--	--	--	--	--	--	168
N211	-55,3	-624,3	-679,6	14	6	0	188
N212	-191,6	-1232,2	-1423,8	15	9	412	128
N213	-137,7	0	-698,1	2	6	437	132
N214	--	--	--	--	--	--	0
N215	--	--	--	--	--	--	0
N216	--	--	--	--	--	--	117
N217	-85,6	0	-275,8	2	6	258	0
N218	-20,5	-73,9	-94,4	2	9	0	177
N219	-5,7	-16,3	-22,1	2	6	138	277
N220	-58,6	0	-539,0	9	6	299	0
N221	-3,8	-18,6	-22,4	2	6	61	187
N223	-7,1	-98,1	-105,3	2	6	0	0
N224	-11,5	-262,9	-274,4	2	6	51	0
N225	-11,4	0	-171,9	9	6	118	258
N226	-32,0	-863,9	-895,9	9	6	172	237
N227	-6,8	0	-57,4	9	6	131	255
N228	-24,6	-95,2	-119,8	9	9	155	254
N229	-26,6	0	-98,6	9	9	256	156
N230	-55,3	0	-359,4	9	6	223	234
N231	-11,4	-22,8	-34,2	9	9	0	316
N232	-36,3	-93,9	-130,2	9	9	0	229
N233	-48,4	0	-109,4	9	9	0	136
N234	-0,8	--	-0,8	2	--	54	352

Ereignis	Sedimentativer Fluss [g m ⁻²]	Turbulenter Fluss [g m ⁻²]	Gesamtfluss [g m ⁻²]	$d_{\max,N}$ [μm]	$d_{\max,LWC}$ [μm]	Flüssigwasser- gehalt [mg m ⁻³]	Sichtweite [m]
N235	-14,6	-75,8	-90,3	2	6	116	282
N236	-24,3	-135,6	-159,8	2	5	0	119
N237	-19,9	-194,9	-214,7	9	6	0	0
N238	-32,6	0	-237,5	9	9	328	156
N239	-15,8	-95,5	-111,4	9	6	0	291
N240	-48,8	0	-393,8	9	6	286	167
N241	-34,0	-178,7	-212,7	9	6	165	238
N242	-9,2	-25,1	-34,3	9	9	154	231
N243	-23,4	-249,8	-273,2	9	6	156	141
N244	-116,7	-147,7	-264,4	2	9	272	--
N245	-33,3	0	-303,7	9	6	293	--
N246	-17,7	0	-164,7	9	6	243	--
N247	--	--	--	--	--	--	0
N248	-2,2	0	-17,2	2	6	26	147
N249	-7,6	0	-110,3	9	6	68	237
N250	-18,9	0	-127,5	9	9	132	0
N251	-30,9	-367,8	-398,8	9	6	189	182
N252	-45,7	0	-626,7	9	6	174	164
N253	-68,0	0	-652,0	12	9	252	168
N254	-40,1	-296,6	-336,7	9	6	166	0
N255	-129,4	0	-680,0	13	6	435	111
N256	-403,9	-926,6	-1330,5	15	9	0	89
N257	--	--	--	--	--	--	--
N258	-22,8	-67,5	-90,3	9	6	125	189
N259	-26,8	-75,7	-102,5	9	6	166	0
N260	--	--	--	--	--	--	--
N261	-4,9	0	-25,5	2	6	0	237
N262	-13,5	-65,2	-78,7	9	6	57	159
N263	-20,8	-79,5	-100,3	9	6	93	171
N264	-9,4	0	-79,9	2	6	45	237
N265	-20,1	-115,7	-135,8	2	6	168	136
N266	-32,9	-188,9	-221,8	9	6	151	189
N267	-36,6	-228,5	-265,1	9	9	198	93
N268	-29,5	-162,1	-191,6	2	6	172	122
N269	-23,0	-63,8	-86,9	9	10	138	186
N270	-64,2	-297,9	-362,1	9	6	278	96
N271	-46,3	-99,3	-145,6	9	6	221	163
N272	-8,1	0	-55,1	2	6	0	292
N273	--	--	--	--	--	--	192
N274	--	--	--	--	--	--	--
N275	-14,0	0	-117,8	9	6	0	257
N276	-64,7	-335,5	-400,2	9	9	279	167
N277	-5,6	-34,3	-39,9	9	9	111	272
N278	-33,1	-167,3	-200,3	11	6	316	115
N279	-62,4	-331,7	-394,1	9	9	282	174
N280	-48,9	-371,3	-420,2	2	6	0	164

Ereignis	Sedimentativer Fluss [g m ⁻²]	Turbulenter Fluss [g m ⁻²]	Gesamtfluss [g m ⁻²]	$d_{\max,N}$ [μm]	$d_{\max,LWC}$ [μm]	Flüssigwasser- gehalt [mg m ⁻³]	Sichtweite [m]
N281	-106,0	0	-686,6	9	9	371	136
N282	-9,7	-93,1	-102,8	2	6	73	0
N283	-64,4	-988,8	-1053,3	9	9	329	174
N284	-75,8	0	-1855,8	9	9	364	158
N285	-10,4	-163,8	-174,1	9	6	123	289
N286	-7,2	-293,3	-300,5	9	5	83	339
N287	-27,5	-865,1	-892,5	9	6	286	193
N288	-25,1	0	-829,7	9	6	236	289
N289	--	--	--	--	--	--	--
N290	-40,7	0	-442,3	9	6	262	179
N291	-1,7	-14,2	-15,8	2	6	46	393
N292	-15,8	-161,5	-177,2	2	6	155	242
N293	-0,2	--	-0,2	2	--	48	--
N294	-80,3	-423,3	-503,6	9	6	238	186
N295	-74,0	-364,6	-438,6	9	9	284	155
N296	-38,9	0	-247,0	9	6	244	178
N297	-20,6	-65,3	-85,9	9	9	197	239
N298	-107,1	-285,1	-392,2	9	9	253	185
N299	-4,3	+4,5	+0,3	9	9	82	269
N300	-22,8	-132,5	-155,3	9	6	0	176
N301	-21,0	-157,5	-178,6	2	6	111	248
N302	-29,0	0	-157,0	2	6	138	223
N303	-32,6	-191,1	-223,7	2	6	176	222
N304	-38,5	-174,8	-213,3	2	9	532	0
N305	-144,3	-444,1	-588,4	9	9	423	119
N306	-187,0	0	-586,0	9	6	479	116
N307	-163,6	-233,8	-397,5	9	9	452	134
N308	-13,3	+5,5	-7,9	2	9	58	0
N309	--	--	--	--	--	--	225
N310	--	--	--	--	--	--	0
N311	--	--	--	--	--	--	237
N312	--	--	--	--	--	--	0
N313	-0,5	--	-0,5	2	--	61	322
N314	-10,5	-195,2	-205,8	2	6	89	285
N315	-27,1	0	-235,2	9	6	137	217
N316	-2,6	-11,9	-14,5	2	6	44	343
N317	-11,7	-36,7	-48,4	2	6	229	0
N318	-117,7	-186,4	-304,1	2	6	285	153
N319	-15,6	-62,3	-77,9	2	6	134	161
N320	-34,7	-267,4	-302,2	9	6	192	225
N321	-32,9	0	-178,9	9	6	0	0
N322	-290,7	-292,5	-583,2	9	9	572	0
N323	-20,4	-42,7	-63,1	9	6	197	225
N324	-116,6	-162,7	-279,3	9	9	388	148
N325	-97,5	-164,2	-261,7	9	9	247	0
N326	-9,7	-42,3	-51,9	9	9	166	0

Ereignis	Sedimentativer Fluss [g m ⁻²]	Turbulenter Fluss [g m ⁻²]	Gesamtfluss [g m ⁻²]	$d_{\max,N}$ [μm]	$d_{\max,LWC}$ [μm]	Flüssigwasser- gehalt [mg m ⁻³]	Sichtweite [m]
N327	-57,0	-215,1	-272,1	2	6	131	0
N328	-4,8	-28,9	-33,6	2	6	96	317
N329	-32,3	-96,3	-128,7	9	9	199	213
N330	-9,7	0	-9,6	2	9	76	357
N332	-23,1	+6,3	-16,8	--	--	--	218
N333	-41,2	-216,1	-257,4	--	--	--	144
N334	-15,3	+3,6	-11,7	2	9	192	0
N335	-44,4	-192,1	-236,6	9	9	297	238
N336	-75,1	-556,2	-631,3	2	9	98	145
N337	-71,0	-615,6	-686,6	9	9	0	124
N338	-36,4	-389,5	-425,8	9	6	0	187
N339	-24,6	-572,4	-597,0	9	6	358	234
N341	-14,6	-247,4	-262,0	2	6	121	245
N342	-88,8	0	-859,6	--	--	--	132
N343	-41,7	-233,7	-275,3	2	6	0	0
N344	-74,7	-211,9	-286,6	9	6	385	0
N345	-26,2	-13,2	-39,4	9	6	223	181
N346	-49,0	-594,2	-643,2	9	6	299	143
N347	-148,1	0	-1353,1	9	9	286	98
N348	-55,2	-485,5	-540,7	2	2	0	112
N349	-3,4	0	-112,2	9	9	485	425
N350	-94,8	-1423,8	-1518,6	9	9	372	147
N351	-45,0	-721,3	-766,3	2	2	68	169
N352	-21,2	0	-310,3	9	6	432	233
N353	-17,9	-368,8	-386,7	9	6	247	0
N354	-14,9	-296,7	-311,6	9	6	142	282
N355	-0,6	--	-0,6	9	6	128	--
N356	-4,1	-64,8	-68,9	9	6	0	367
N357	-8,5	-41,2	-49,7	9	--	44	324
N358	-191,7	-698,5	-890,2	2	2	59	149
N359	-123,7	-731,7	-855,4	2	6	142	178
N360	-87,0	0	-325,0	9	6	424	0
N361	-50,3	0	-155,1	9	5	326	168
N362	-18,1	-28,5	-46,6	9	5	312	0
N363	-252,0	-52,5	-304,6	2	6	286	194
N364a	-35,1	-35,3	-70,5	2	9	237	331
N364	-44,7	-32,4	-77,1	2	49	0	318
N365	-191,4	-148,3	-339,7	2	--	128	257
N366	-34,7	-32,9	-67,6	2	49	0	198
N367	-100,7	-163,2	-263,9	2	46	269	0
N368	-31,5	-21,4	-52,9	2	9	223	0
N369	-182,6	-279,7	-462,3	2	9	0	154
N370	-77,8	-252,1	-329,9	15	49	553	172
N371	-48,0	-66,3	-114,3	9	49	434	175
N372	-25,5	-88,3	-113,8	9	6	315	159
N373	-104,2	-674,8	-779,0	9	6	237	124

Ereignis	Sedimentativer Fluss [g m ⁻²]	Turbulenter Fluss [g m ⁻²]	Gesamtfluss [g m ⁻²]	$d_{\max,N}$ [μm]	$d_{\max,LWC}$ [μm]	Flüssigwasser- gehalt [mg m ⁻³]	Sichtweite [m]
N374	-26,2	-139,7	-165,9	2	6	166	226
N375	-2,6	-133,8	-136,5	9	6	387	183
N376	--	--	--	2	9	0	183
N377	--	--	--	2	2	166	--
N378	--	--	--	--	--	--	256
N379	--	--	--	--	--	--	138
N380	--	--	--	--	--	--	137
N381	-5,3	-61,3	-66,6	--	--	--	0
N382	-5,6	-16,9	-22,5	--	--	--	294
N383	-17,3	-436,7	-454,0	2	5	124	246
N384	-27,0	-587,3	-614,2	2	6	0	214
N385	-42,2	0	-557,2	6	5	112	134
N386	-83,0	-767,6	-850,6	9	5	172	126
N387	-39,0	0	-209,7	9	5	233	0
N388	-32,5	-216,9	-249,3	9	6	284	151
N389	-136,2	0	-679,2	2	6	138	131
N390	-140,7	-454,3	-595,0	9	49	318	239
N391	-58,5	-383,3	-441,8	2	6	277	0
N392	-97,7	-511,4	-609,1	2	49	236	165
N393	-31,3	-443,5	-474,8	2	49	183	148
N394	-0,1	--	-0,1	9	49	275	--
N395	--	--	--	9	2	0	--
N396	-266,7	-459,4	-726,1	2	--	3	0
N397	-78,8	-158,8	-237,6	--	--	--	232
N398	-126,6	0	-729,0	2	49	285	0
N399	-105,7	0	-286,3	2	2	173	291
N400	-88,3	0	-99,3	2	--	167	199
N401	-6,6	0	-217,2	2	5	179	327
N402	-164,2	0	-1494,4	2	43	278	92
N403	-62,7	-845,4	-908,1	2	2	0	0
N404	-58,1	-863,9	-922,1	2	5	485	97
N405	-51,5	0	-1382,0	9	6	0	169
N406	-12,6	0	-515,8	9	6	298	0
N407	-2,4	0	-133,4	9	4	246	246
N408	-5,7	-264,2	-269,9	9	5	151	281
N409	-12,4	-562,5	-574,9	2	5	79	284
N410	-89,4	-645,3	-734,7	2	4	92	336
N411	-48,4	-776,5	-824,9	9	5	99	327
N412	--	--	--	9	--	171	--
N413	-11,6	-152,1	-163,7	9	42	125	221
N414	-27,6	-155,6	-183,2	--	--	--	113
N415	-7,5	-19,8	-27,2	2	6	0	0
N416	-12,6	-51,3	-63,8	9	8	191	236
N417	-9,5	-178,6	-188,1	9	6	54	143
N418	-98,6	0	-1125,0	9	6	49	75
N419	-62,9	0	-753,6	9	6	0	0

Ereignis	Sedimentativer Fluss [g m ⁻²]	Turbulenter Fluss [g m ⁻²]	Gesamtfluss [g m ⁻²]	$d_{\max,N}$ [μm]	$d_{\max,LWC}$ [μm]	Flüssigwasser- gehalt [mg m ⁻³]	Sichtweite [m]
N420	-80,6	-1133,2	-1213,8	12	9	263	156
N421	-31,5	0	-521,7	9	9	212	113
N422	--	--	--	9	6	213	--
N423	-11,7	-215,3	-227,0	9	6	213	366
N424	-4,6	0	-114,2	--	--	--	374
N425	-15,8	0	-519,9	9	6	68	271
N426	-3,8	0	-194,4	9	5	56	256
N427	-6,9	0	-415,8	9	5	72	356
N428	-7,9	-353,4	-361,3	9	6	124	286
N429	-12,7	-722,3	-735,0	9	2	61	322
N430	-12,5	-661,2	-673,8	9	2	68	245
N431	-18,8	0	-523,9	9	5	83	214
N432	-26,2	-233,7	-259,9	9	6	116	291
N433	-12,3	-79,6	-92,0	9	6	174	336
N434	-6,0	--	-6,0	9	9	113	156
N435	-19,8	-488,4	-508,2	9	9	86	162
N436	-7,2	0	-345,2	2	--	111	363
N437	-22,6	-379,5	-402,1	2	6	132	0
N438	-49,6	-842,1	-891,7	9	5	46	114
N439	-31,4	-527,3	-558,7	9	6	81	237
N440	-120,5	-896,3	-1016,8	9	6	0	183
N441	-53,0	-1237,4	-1290,3	9	5	0	173
N442	-0,6	-26,7	-27,3	9	5	0	--
N443	-0,2	-14,5	-14,6	9	6	213	--
N444	-0,8	--	-0,8	2	2	25	324
N445	-1,4	-43,5	-44,8	2	2	0	0
N446	--	--	--	2	--	47	--
N447	--	--	--	9	6	65	--
N448	--	--	--	--	--	--	--
--	-6455,2	-35225,3	-41680,5	--	--	135	--

Anhang E: Feuchte Deposition der wichtigsten anorganischen Ionen

Ereignis	Datum	Dauer [hh:mm]	H ⁺	NH ₄ ⁺	Ca ²⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻
			[mg m ⁻²]	[mg m ⁻²]	[mg m ⁻²]	[mg m ⁻²]	[mg m ⁻²]	[mg m ⁻²]	[mg m ⁻²]	[mg m ⁻²]	[mg m ⁻²]
N190	2001-04-07	16:00	0,00	-0,04	0,00	0,00	0,00	-0,01	-0,01	-0,13	-0,05
N191	2001-04-10	8:00	0,00	0,50	0,03	0,01	0,01	0,06	0,08	1,50	0,41
N192	2001-04-11	8:00	0,00	-0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,13	-0,05
N193	2001-04-11	16:00	-0,04	-1,00	-0,03	0,00	-0,01	-0,03	-0,05	-5,42	-0,74
N199	2001-04-17	8:00	0,00	-0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,06	-0,02
N200	2001-04-18	8:00	0,00	-0,75	0,00	-0,02	0,00	-0,02	-0,07	-1,84	-0,72
N201	2001-04-19	8:00	0,00	-0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,06	-0,03
N202	2001-04-20	24:00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
N203	2001-04-21	8:00	-0,01	-1,15	-0,02	-0,02	-0,01	-0,08	-0,08	-3,16	-1,12
N204	2001-04-22	8:00	-0,01	-1,39	-0,02	-0,03	-0,01	-0,05	-0,14	-3,15	-1,83
N205	2001-04-22	24:00	0,00	-2,05	-0,07	-0,04	-0,02	-0,17	-0,18	-4,05	-3,05
N207	2001-05-05	8:00	0,00	-19,62	-1,64	-0,56	-0,23	-0,81	-1,46	-48,88	-23,21
N208	2001-05-06	8:00	0,00	-20,25	-0,43	0,00	-0,07	-0,30	-1,73	-37,55	-21,66
N209	2001-05-06	8:00	0,00	-2,30	-0,44	0,00	0,00	0,00	-0,48	-5,97	-5,68
N211	2001-05-07	8:00	0,00	-2,13	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,22	-3,15	-2,87
N212	2001-05-07	8:00	-0,01	-3,03	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,53	-7,15	-5,27
N213	2001-05-07	8:00	0,00	-1,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-2,83	-1,83
N217	2001-05-08	8:00	-0,01	-4,30	-0,16	-0,08	-0,03	0,00	-0,20	-10,62	-4,74
N218	2001-05-09	8:00	-0,02	-5,88	-0,33	-0,11	-0,04	-0,11	-0,26	-13,59	-7,19
N219	2001-05-17	16:00	0,00	-0,93	-0,09	-0,06	-0,02	-0,02	-0,02	-2,52	-0,87
N220	2001-05-19	8:00	-0,09	-17,52	-0,84	-0,42	-0,20	-1,04	-0,93	-42,69	-22,15
N221	2001-05-19	8:00	-0,01	-0,68	-0,03	-0,02	-0,01	-0,04	-0,05	-1,68	-0,94
N223	2001-06-01	8:00	0,00	-2,32	-0,29	-0,21	-0,07	-0,42	-0,48	-5,44	-2,80
N224	2001-06-03	16:00	0,00	-5,24	-0,76	-0,33	-0,13	-0,57	-0,78	-9,88	-8,15
N225	2001-06-03	16:00	0,00	-1,86	-0,21	-0,14	-0,11	-1,19	-1,84	-2,89	-3,39
N226	2001-06-04	24:00	0,00	-4,20	-0,46	-0,25	-0,39	-3,48	-4,75	-6,76	-8,73
N227	2001-06-09	8:00	0,00	-0,50	-0,19	-0,10	-0,16	-1,29	-1,38	-2,53	-1,30
N228	2001-06-09	8:00	0,00	-1,27	-0,13	-0,05	-0,04	-0,21	-0,18	-3,79	-1,34
N229	2001-06-09	8:00	-0,01	-1,45	-0,04	-0,03	-0,01	-0,03	-0,05	-4,45	-1,23
N230	2001-06-10	8:00	-0,01	-3,45	-0,13	0,00	-0,03	-0,11	-0,18	-6,07	-5,03
N231	2001-06-11	8:00	0,00	-0,20	-0,02	0,00	0,00	-0,02	-0,02	-0,42	-0,32
N232	2001-06-11	8:00	0,00	-1,81	-0,06	0,00	-0,01	-0,05	-0,10	-3,23	-2,57
N233	2001-06-11	8:00	-0,01	-2,46	-0,04	-0,03	-0,01	-0,03	-0,11	-5,91	-2,90
N235	2001-06-12	16:00	-0,06	-4,46	-0,33	-0,14	-0,05	-0,12	-0,13	-16,89	-5,39
N236	2001-06-17	8:00	-0,01	-3,42	-0,35	-0,20	-0,07	-0,24	-0,16	-7,64	-5,50
N237	2001-06-18	8:00	-0,02	-4,77	-0,32	-0,18	-0,07	-0,33	-0,29	-11,81	-6,68
N238	2001-06-18	3:14	-0,01	-1,35	-0,12	0,00	-0,02	-0,09	-0,11	-3,71	-2,04
N239	2001-06-19	8:00	0,00	-0,74	-0,05	0,00	-0,01	0,00	-0,04	-1,57	-1,11
N240	2001-06-19	8:00	-0,01	-2,96	-0,19	0,00	-0,03	-0,15	-0,16	-5,95	-3,73
N241	2001-06-19	16:00	0,00	-6,21	-0,28	-0,25	-0,28	-2,72	-3,36	-12,59	-8,47
N242	2001-06-20	8:00	0,00	-1,28	-0,09	-0,05	-0,06	-0,54	-0,71	-3,20	-1,59
N243	2001-06-23	8:00	0,00	-6,56	-0,72	-0,48	-0,30	-2,28	-2,52	-17,59	-7,87
N244	2001-06-29	8:00	-0,01	-9,54	-0,46	-0,22	-0,06	-0,22	-0,32	-18,48	-13,67
N245	2001-07-01	8:00	0,00	-3,70	-0,26	-0,19	-0,05	-0,14	-0,26	-5,92	-6,16
N246	2001-07-01	8:00	0,00	-2,22	-0,06	-0,06	-0,01	-0,05	-0,11	-3,21	-3,69
N248	2001-07-09	8:00	0,00	-0,05	-0,02	-0,01	0,00	-0,01	-0,02	-0,12	-0,11
N249	2001-07-13	8:00	0,00	-0,96	-0,43	-0,15	-0,09	-0,70	-0,79	-3,64	-1,81
N250	2001-07-15	8:00	0,00	-0,92	-0,20	-0,06	-0,03	-0,09	-0,08	-1,75	-2,01
N251	2001-07-16	8:00	0,00	-3,81	-0,23	-0,16	-0,03	-0,09	-0,24	-6,94	-5,10
N252	2001-07-16	8:00	0,00	-6,64	-0,34	0,00	-0,04	-0,17	-0,46	-12,16	-9,59
N253	2001-07-16	8:00	0,00	-2,22	-0,20	0,00	0,00	0,00	0,00	-4,47	-3,89
N254	2001-07-17	8:00	0,00	-1,03	-0,10	0,00	0,00	0,00	0,00	-1,92	-2,33
N255	2001-07-17	8:00	-0,01	-3,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-6,32	-4,52
N256	2001-07-17	8:00	-0,06	-6,17	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-14,64	-10,99
N258	2001-07-19	8:00	0,00	-0,84	-0,04	-0,06	-0,01	0,00	-0,04	-2,16	-0,97
N259	2001-07-19	8:00	0,00	-0,61	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-1,49	-0,58

Ereignis	Datum	Dauer	H ⁺	NH ₄ ⁺	Ca ₂	K ⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻
			[hh:mm]	[mg m ⁻²]	[mg m ⁻²]	[mg m ⁻²]	[mg m ⁻²]	[mg m ⁻²]	[mg m ⁻²]	[mg m ⁻²]	[mg m ⁻²]
N261	2001-08-11	8:00	0,00	-0,85	-0,26	-0,09	-0,04	-0,12	-0,09	-2,63	-1,24
N262	2001-08-21	16:00	0,00	-1,07	-0,12	-0,06	-0,01	-0,03	-0,05	-2,00	-1,33
N263	2001-08-21	8:00	0,00	-1,34	-0,09	-0,04	-0,01	-0,08	-0,11	-2,82	-1,44
N264	2001-08-22	16:00	0,00	-5,30	-0,34	-0,15	-0,09	-0,57	-0,51	-11,03	-7,25
N265	2001-08-22	8:00	0,00	-6,89	-0,23	-0,19	-0,08	-0,54	-0,50	-17,11	-6,61
N266	2001-08-31	8:00	0,00	-2,28	-0,82	-0,26	-0,15	-0,91	-1,41	-8,32	-4,01
N267	2001-09-01	8:00	0,00	-2,81	-0,28	0,00	-0,04	-0,11	-0,26	-8,67	-2,16
N268	2001-09-01	8:00	0,00	-4,62	-0,27	-0,08	-0,03	-0,11	-0,20	-12,61	-4,29
N269	2001-09-02	8:00	0,00	-1,46	-0,06	0,00	-0,01	-0,03	-0,07	-3,42	-1,56
N270	2001-09-02	8:00	0,00	-11,73	-0,22	-0,15	-0,04	-0,20	-0,66	-25,13	-11,44
N271	2001-09-02	8:00	0,00	-5,32	-0,17	-0,11	-0,09	-0,86	-1,21	-11,10	-6,04
N272	2001-09-03	8:00	0,00	-2,35	-0,16	-0,07	-0,08	-0,66	-0,98	-5,09	-2,86
N275	2001-09-05	8:00	0,00	-3,10	-0,18	-0,09	-0,04	-0,30	-0,18	-7,74	-3,11
N276	2001-09-05	8:00	-0,05	-8,76	-0,47	-0,20	-0,16	-1,08	-1,18	-28,97	-7,40
N277	2001-09-06	8:00	0,00	-0,71	-0,05	-0,02	-0,02	-0,13	-0,16	-2,04	-0,66
N278	2001-09-06	8:00	0,00	-1,99	-0,09	0,00	-0,04	-0,19	-0,25	-4,13	-2,20
N279	2001-09-06	8:00	0,00	-3,23	-0,12	0,00	-0,07	-0,76	-1,08	-6,54	-3,80
N280	2001-09-07	8:00	-0,02	-4,71	-0,28	0,00	-0,13	-0,71	-0,93	-13,03	-5,76
N281	2001-09-07	8:00	-0,04	-5,88	-0,20	0,00	0,00	0,00	-0,25	-17,10	-5,94
N282	2001-09-08	8:00	-0,04	-8,35	-0,28	-0,15	-0,05	-0,25	-0,53	-22,09	-8,84
N283	2001-09-08	8:00	-0,08	-9,33	-0,50	0,00	-0,12	-0,84	-1,44	-20,75	-16,01
N284	2001-09-08	8:00	-0,05	-7,11	-0,50	0,00	-0,10	-0,62	-1,08	-15,76	-13,60
N285	2001-09-09	16:00	-0,01	-3,36	-0,45	-0,23	-0,12	-1,10	-1,32	-7,05	-5,68
N286	2001-09-09	16:00	-0,01	-2,39	-0,30	-0,15	-0,31	-3,22	-4,84	-5,26	-4,66
N287	2001-09-10	7:41	-0,03	-3,58	-0,83	-5,83	-0,71	-19,28	-8,62	-9,19	-8,09
N288	2001-09-11	8:00	-0,01	-1,52	0,00	0,00	-0,08	-0,54	-0,76	-2,15	-3,15
N290	2001-09-13	8:00	-0,16	-8,58	-0,51	-0,21	-0,15	-0,92	-1,36	-28,62	-14,86
N291	2001-09-13	8:00	0,00	-0,19	-0,01	0,00	0,00	-0,02	-0,03	-0,58	-0,32
N292	2001-09-14	8:00	0,00	-0,61	-0,06	0,00	0,00	-0,05	-0,10	-1,43	-0,96
N293	2001-09-14	8:00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
N294	2001-09-15	24:00	-0,20	-6,90	-0,52	-0,23	-0,14	-0,97	-0,76	-35,20	-9,67
N295	2001-09-16	16:00	-0,27	-6,14	-0,33	-0,15	-0,15	-1,14	-1,05	-36,36	-8,82
N296	2001-09-16	8:00	-0,04	-3,11	-0,11	0,00	-0,07	-0,52	-0,54	-7,66	-5,34
N297	2001-09-16	8:00	-0,01	-0,62	-0,06	0,00	-0,02	-0,09	-0,09	-1,45	-1,21
N298	2001-09-17	16:00	-0,02	-3,22	-0,09	0,00	-0,03	-0,23	-0,27	-7,34	-4,86
N299	2001-09-17	1:31	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00
N300	2001-09-19	8:00	-0,01	-1,88	-0,05	-0,04	-0,02	-0,14	-0,22	-4,22	-2,19
N301	2001-09-21	16:00	-0,08	-2,82	-0,25	-0,15	-0,05	-0,23	-0,38	-12,66	-4,57
N302	2001-09-22	16:00	-0,14	-5,98	-0,31	-0,21	-0,17	-1,40	-1,44	-24,34	-9,20
N303	2001-09-24	8:00	-0,07	-3,89	-0,26	-0,36	-0,17	-1,14	-0,93	-14,34	-6,11
N304	2001-09-25	8:00	-0,02	-2,37	-0,10	-0,06	-0,03	-0,13	-0,20	-5,06	-3,54
N305	2001-09-25	8:00	-0,04	-4,01	-0,12	0,00	0,00	-0,15	-0,27	-7,53	-7,30
N306	2001-09-25	8:00	-0,04	-2,31	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-6,80	-3,22
N307	2001-09-25	8:00	-0,08	-3,16	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,13	-11,29	-4,65
N308	2001-09-26	24:00	-0,01	-0,84	-0,07	-0,02	-0,01	-0,01	-0,02	-3,03	-0,90
N313	2001-10-02	8:00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,01	-0,01
N314	2001-10-02	8:00	-0,01	-1,01	-0,10	0,00	-0,02	-0,06	-0,08	-2,43	-1,95
N315	2001-10-04	16:00	-0,01	-1,26	-0,10	-0,06	-0,02	0,00	-0,07	-3,55	-1,93
N316	2001-10-05	8:00	0,00	-0,06	-0,01	0,00	0,00	0,00	-0,01	-0,19	-0,08
N317	2001-10-08	8:00	0,00	-0,74	-0,04	-0,07	-0,01	-0,07	-0,10	-1,55	-0,94
N318	2001-10-08	8:00	0,00	-1,98	-0,07	0,00	0,00	0,00	-0,11	-4,56	-2,24
N319	2001-10-08	8:00	0,00	-0,73	-0,06	-0,03	-0,01	0,00	-0,05	-2,02	-0,79
N320	2001-10-23	8:00	-0,01	-1,52	-0,18	0,00	-0,02	-0,09	-0,63	-3,23	-2,53
N321	2001-10-23	8:00	-0,01	-6,46	-0,85	-0,22	-0,14	-0,71	-1,02	-18,78	-7,96
N322	2001-10-23	8:00	-0,09	-4,16	-0,68	0,00	-0,11	-0,40	-0,83	-17,67	-5,64
N323	2001-10-24	8:00	0,00	-0,33	-0,05	0,00	-0,01	-0,03	-0,15	-0,96	-0,43
N324	2001-10-24	8:00	-0,02	-7,18	-0,27	-0,11	-0,06	-0,19	-0,77	-19,22	-7,18
N325	2001-10-24	8:00	-0,02	-3,59	-0,15	0,00	-0,02	-0,07	-0,74	-8,95	-3,74
N326	2001-10-25	8:00	-0,01	-0,89	-0,06	-0,02	-0,01	-0,02	-0,16	-3,43	-0,78

Ereignis	Datum	Dauer	H ⁺	NH ₄ ⁺	Ca ²⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻
		[hh:mm]	[mg m ⁻²]	[mg m ⁻²]	[mg m ⁻²]	[mg m ⁻²]	[mg m ⁻²]	[mg m ⁻²]	[mg m ⁻²]	[mg m ⁻²]	[mg m ⁻²]
N327	2001-10-25	16:00	-0,07	-4,44	-0,45	-0,22	-0,24	-1,86	-2,39	-18,86	-5,28
N328	2001-10-26	8:00	0,00	-0,34	-0,04	-0,01	-0,01	-0,08	-0,16	-1,04	-0,47
N329	2001-10-26	8:00	-0,03	-2,78	-0,32	-0,09	-0,15	-1,03	-1,27	-10,41	-3,59
N330	2001-10-26	8:00	0,00	-0,20	-0,02	-0,01	-0,01	-0,08	-0,10	-0,87	-0,26
N332	2001-10-27	8:00	0,00	-0,48	-0,02	-0,02	-0,01	-0,06	-0,09	-1,70	-0,43
N333	2001-10-28	8:00	-0,07	-8,26	-0,44	-0,27	-0,10	-0,56	-1,13	-25,51	-11,04
N334	2001-10-28	8:00	-0,01	-0,46	-0,03	-0,02	-0,01	-0,04	-0,06	-1,96	-0,68
N335	2001-10-29	8:00	-0,03	-1,99	-0,13	-0,09	-0,04	-0,28	-0,42	-5,94	-3,36
N336	2001-10-29	8:00	-0,01	-3,26	-0,21	0,00	-0,05	-0,23	-0,51	-8,02	-3,66
N337	2001-10-29	8:00	-0,29	-9,96	-0,38	-0,30	-0,21	-1,53	-2,76	-40,44	-13,73
N338	2001-10-30	8:00	-0,21	-7,32	-0,56	-0,18	-0,14	-0,61	-1,76	-29,81	-10,14
N339	2001-10-30	16:00	-0,29	-34,92	-2,54	-0,97	-0,42	-1,89	-3,72	-102,09	-54,57
N341	2001-11-01	24:00	-0,06	-6,21	-1,35	-0,38	-0,56	-4,93	-8,31	-21,96	-10,04
N342	2001-11-02	8:00	-0,02	-7,80	-0,49	-0,39	-0,72	-6,46	-9,20	-19,43	-10,83
N343	2001-11-03	8:00	0,00	-3,55	-0,24	-0,17	-0,31	-2,74	-4,35	-7,24	-5,07
N344	2001-11-03	8:00	0,00	-5,59	-0,66	-0,31	-0,60	-4,96	-7,54	-15,36	-6,73
N345	2001-11-03	8:00	0,00	-0,97	-0,19	-0,05	-0,09	-0,61	-0,71	-3,98	-0,94
N346	2001-11-05	8:00	-0,05	-16,34	-0,83	-0,55	-0,23	-0,86	-1,67	-50,17	-11,26
N347	2001-11-05	8:00	-0,39	-25,44	-0,63	-0,65	-0,29	-1,91	-4,37	-85,79	-27,20
N348	2001-11-06	8:00	-0,10	-12,17	-0,55	-0,37	-0,34	-2,51	-4,03	-37,20	-13,03
N349	2001-11-07	8:00	-0,04	-4,62	-0,42	-0,20	-0,26	-1,90	-2,47	-18,41	-4,74
N350	2001-11-07	8:00	-0,07	-11,50	-0,73	0,00	-0,24	-1,32	-2,78	-27,03	-15,64
N351	2001-11-07	8:00	-0,15	-11,57	-0,54	-0,38	-0,41	-3,26	-4,75	-36,63	-14,25
N352	2001-11-08	8:00	-0,04	-5,27	-0,49	-0,17	-0,26	-2,13	-2,98	-15,17	-7,20
N353	2001-11-08	8:00	-0,02	-4,18	-0,36	-0,14	-0,08	-0,52	-0,70	-10,63	-5,49
N354	2001-11-08	8:00	-0,01	-0,84	-0,07	0,00	-0,02	-0,13	-0,26	-2,77	-1,27
N355	2001-11-09	8:00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
N356	2001-11-09	8:00	0,00	-0,04	-0,05	0,00	-0,01	-0,02	-0,04	-0,21	-0,16
N357	2001-11-13	8:00	-0,01	-0,41	-0,06	-0,05	-0,03	-0,25	-0,46	-1,46	-0,76
N358	2001-11-13	8:00	-0,07	-6,13	-0,21	-0,32	-0,07	-0,74	-2,16	-14,07	-6,57
N359	2001-11-13	8:00	-0,05	-2,47	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,65	-8,16	-3,79
N360	2001-11-16	8:00	-0,11	-3,64	-0,14	-0,14	-0,07	-0,41	-0,73	-14,85	-5,49
N361	2001-11-17	8:00	-0,07	-2,99	-0,06	-0,09	-0,03	-0,23	-0,36	-11,88	-3,57
N362	2001-11-17	8:00	-0,01	-0,84	-0,05	-0,03	-0,04	-0,37	-0,59	-2,95	-1,06
N363	2001-11-17	8:00	-0,07	-3,75	-0,26	-0,14	-0,36	-2,90	-4,51	-14,35	-5,00
N364	2001-11-17	8:00	-0,02	-0,95	-0,07	-0,03	-0,09	-0,73	-1,14	-3,63	-1,26
N365	2001-11-18	8:00	-0,12	-5,88	-0,18	-0,14	-0,25	-1,93	-2,79	-18,68	-10,97
N366	2001-11-19	8:00	-0,01	-2,08	-0,08	-0,04	-0,04	-0,44	-0,59	-3,73	-2,15
N367	2001-11-19	8:00	-0,13	-4,96	-0,09	0,00	-0,05	-0,37	-0,92	-12,48	-12,67
N368	2001-11-19	1:00	-0,02	-0,56	0,00	0,00	0,00	-0,03	-0,12	-1,44	-1,48
N369	2001-11-20	8:00	-0,03	-4,72	0,00	0,00	0,00	-0,28	-0,79	-7,07	-8,60
N370	2001-11-20	8:00	-0,02	-3,22	0,00	0,00	0,00	-0,56	-1,00	-6,60	-4,35
N371	2001-11-20	8:00	-0,01	-1,97	-0,04	-0,04	-0,03	-0,32	-0,51	-5,16	-2,25
N372	2001-11-21	8:00	-0,01	-3,53	-0,20	-0,15	-0,09	-0,73	-1,08	-8,78	-3,89
N373	2001-11-21	8:00	-0,09	-15,11	-0,83	-0,54	-0,23	-1,50	-3,38	-35,91	-20,02
N374	2001-11-22	8:00	-0,05	-3,09	-0,14	-0,08	-0,03	-0,17	-0,61	-8,73	-4,56
N375	2001-11-23	8:00	-0,07	-8,13	-0,44	-0,26	-0,07	-0,38	-0,76	-21,42	-13,06
N381	2001-12-06	8:00	-0,03	-1,19	-0,12	-0,07	-0,13	-1,07	-1,71	-0,96	-1,87
N382	2001-12-06	8:00	0,00	-0,18	-0,05	-0,02	-0,06	-0,51	-0,52	-1,57	-0,27
N383	2001-12-06	8:00	-0,03	-1,41	-0,15	0,00	-0,14	-1,17	-1,33	-5,77	-3,05
N384	2001-12-07	8:00	-0,01	-1,38	0,00	0,00	0,00	-0,18	-0,38	-3,10	-2,56
N385	2001-12-07	8:00	-0,02	-1,78	0,00	0,00	0,00	-0,15	-0,41	-5,53	-2,16
N386	2001-12-07	8:00	-0,14	-7,83	0,00	0,00	0,00	-0,22	-1,63	-20,92	-10,97
N387	2001-12-08	8:00	-0,04	-2,24	0,00	0,00	0,00	-0,10	-0,56	-5,43	-3,96
N388	2001-12-11	8:00	-0,05	-2,59	0,00	-0,11	-0,02	-0,15	-0,28	-6,61	-4,06
N389	2001-12-12	8:00	-0,02	-3,93	-0,53	0,00	-0,12	0,00	-0,51	-6,51	-7,95
N390	2001-12-12	8:00	-0,01	-2,96	-0,51	0,00	-0,11	0,00	-0,38	-5,20	-6,19
N391	2001-12-12	8:00	-0,01	-3,11	-0,10	0,00	-0,03	0,00	-0,27	-2,68	-6,94
N392	2001-12-13	8:00	0,00	-2,82	-1,52	0,00	-0,32	0,00	-0,49	-4,16	-8,10

Ereignis	Datum	Dauer [hh:mm]	H ⁺	NH ₄ ⁺	Ca ₂	K ⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻
			[mg m ⁻²]	[mg m ⁻²]	[mg m ⁻²]	[mg m ⁻²]	[mg m ⁻²]	[mg m ⁻²]	[mg m ⁻²]	[mg m ⁻²]	[mg m ⁻²]
N393	2001-12-13	8:00	0,00	-3,56	-0,82	0,00	-0,17	-0,16	-0,37	-2,41	-5,37
N394	2001-12-29	12:00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
N396	2002-01-07	11:55	-0,35	-8,79	-0,28	-1,88	-0,33	-1,68	-1,54	-38,12	-17,64
N397	2002-01-08	8:00	-0,09	-2,11	0,00	-0,13	-0,02	-0,23	-0,52	-10,24	-3,45
N398	2002-01-08	16:00	-0,46	-9,26	-0,29	-0,60	-0,09	-0,87	-1,16	-39,51	-23,04
N399	2002-01-09	8:00	-0,15	-4,75	-0,09	-0,23	-0,05	-0,27	-0,58	-12,60	-10,14
N400	2002-01-09	8:00	-0,02	-0,86	0,00	-0,03	-0,01	-0,02	-0,08	-2,22	-2,02
N401	2002-01-20	8:00	-0,21	-7,47	-0,10	-0,33	-0,06	-0,38	-0,72	-23,02	-17,68
N402	2002-01-20	8:00	-0,31	-11,82	0,00	-0,56	-0,22	-2,15	-4,09	-28,84	-19,73
N403	2002-01-20	8:00	-0,13	-5,18	0,00	-0,24	-0,27	-2,55	-4,57	-14,89	-8,40
N404	2002-01-21	8:00	-0,13	-7,18	-0,35	-0,43	-0,59	-5,42	-9,02	-17,06	-13,46
N405	2002-01-21	8:00	-0,04	-5,51	-0,55	0,00	-0,37	-2,87	-4,82	-13,03	-12,77
N406	2002-01-21	8:00	-0,01	-0,70	0,00	0,00	0,00	-0,24	-0,38	-1,51	-1,72
N407	2002-01-26	8:00	-0,01	-0,83	-0,11	-0,06	-0,12	-1,19	-1,19	-3,47	-1,57
N408	2002-01-27	8:00	-0,01	-0,70	0,00	0,00	-0,03	-0,30	-0,44	-2,10	-1,32
N409	2002-01-27	16:00	-0,01	-0,66	0,00	0,00	0,00	-0,27	-0,43	-1,16	-1,36
N410	2002-01-28	8:00	-0,01	-0,21	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,97	-0,50
N411	2002-01-28	8:00	-0,01	-0,60	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,25	-1,72	-1,11
N413	2002-01-30	16:00	-0,09	-3,54	-0,27	-0,19	-0,13	-0,93	-0,98	-14,01	-6,16
N414	2002-01-31	8:00	-0,08	-1,45	-0,09	-0,09	-0,04	-0,31	-0,58	-6,19	-3,48
N415	2002-02-07	8:00	0,00	-0,69	-0,05	-0,03	-0,03	-0,29	-0,32	-2,01	-0,76
N416	2002-02-07	16:00	-0,02	-2,11	-0,14	-0,08	-0,11	-0,82	-0,67	-8,36	-2,17
N417	2002-02-08	8:00	-0,05	-8,28	-0,44	-0,28	-0,27	-2,18	-1,77	-27,84	-9,26
N418	2002-02-09	8:00	-0,07	-5,38	-0,63	0,00	-0,19	-1,15	-1,54	-16,09	-8,27
N419	2002-02-09	8:00	-0,08	-4,70	-0,22	0,00	-0,08	-0,66	-1,28	-12,06	-7,20
N420	2002-02-09	8:00	-0,09	-2,49	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,34	-11,89	-3,36
N421	2002-02-10	8:00	-0,03	-2,38	0,00	0,00	0,00	-0,17	-0,48	-5,95	-3,02
N423	2002-02-10	8:00	-0,01	-0,60	-0,06	0,00	-0,04	-0,44	-0,61	-1,78	-1,21
N424	2002-02-11	8:00	0,00	-0,29	-0,04	-0,04	-0,07	-0,73	-1,18	-0,87	-0,78
N425	2002-02-11	16:00	-0,05	-6,66	-0,74	-0,70	-1,56	-13,31	-20,23	-20,69	-11,80
N426	2002-02-11	1:55	-0,01	-1,08	-0,08	-0,08	-0,18	-1,62	-2,43	-2,78	-1,90
N427	2002-02-12	8:00	-0,01	-1,74	-0,16	-0,13	-0,27	-2,25	-3,18	-4,37	-3,94
N428	2002-02-12	8:00	-0,01	-1,22	-0,11	0,00	-0,11	-0,80	-0,95	-3,22	-2,74
N429	2002-02-12	8:00	-0,01	-1,87	0,00	0,00	-0,05	-0,55	-1,92	-4,37	-5,41
N430	2002-02-13	8:00	-0,01	-1,22	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-1,26	-3,25
N431	2002-02-13	8:00	-0,01	-0,92	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-2,08	-2,13
N432	2002-02-13	8:00	-0,01	-0,36	0,00	0,00	0,00	-0,07	0,00	-1,26	-0,68
N433	2002-02-14	8:00	0,00	-0,28	0,00	0,00	-0,01	-0,06	-0,09	-0,74	-0,50
N434	2002-02-14	8:00	0,00	-0,03	0,00	0,00	0,00	-0,01	-0,01	-0,10	-0,05
N435	2002-02-19	8:00	-0,49	-50,46	-1,39	-1,33	-0,57	-3,67	-3,50	-171,77	-59,97
N436	2002-02-21	8:00	-0,04	-3,37	-0,17	-0,13	-0,11	-0,90	-1,00	-10,32	-5,32
N437	2002-02-21	16:00	-0,07	-2,50	-0,21	-0,13	-0,22	-1,89	-1,38	-13,99	-3,74
N438	2002-02-23	8:00	-0,09	-3,40	-0,21	0,00	-0,15	-1,54	-1,44	-17,57	-5,27
N439	2002-02-23	16:00	-0,05	-1,75	0,00	0,00	-0,14	-1,47	-1,98	-7,37	-3,09

Anhang F: Nasse Deposition der wichtigsten anorganischen Ionen

Probenahme	Sammel- dauer	Nieder- schlag	H ⁺	Na ⁺	K ⁺	NH ₄ ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻
	[d]	[mm]	[mg m ⁻²]	[mg m ⁻²]	[mg m ⁻²]	[mg m ⁻²]	[mg m ⁻²]	[mg m ⁻²]			
2001-03-05	7,0	24,1	0,12	7,51	0,00	21,99	0,00	0,00	10,31	82,54	34,58
2001-03-11	6,0	20,4	0,10	0,00	0,00	5,29	0,00	0,00	0,00	32,54	13,61
2001-03-26	15,0	117,0	0,73	0,00	0,00	31,59	0,00	0,00	0,00	152,69	63,53
2001-04-02	7,0	9,0	0,08	0,00	0,00	7,26	0,00	0,00	0,00	31,68	14,22
2001-04-09	7,0	31,2	0,08	6,47	0,00	35,72	0,00	0,00	14,38	81,28	42,28
2001-04-17	8,0	82,7	0,31	0,00	0,00	67,32	0,00	0,00	0,00	220,81	85,26
2001-04-23	6,0	20,1	0,22	0,00	0,00	35,78	0,00	0,00	2,77	102,21	56,78
2001-05-03	10,0	19,3	0,07	0,00	0,00	10,35	0,00	0,00	0,00	29,24	16,42
2001-05-09	6,2	7,4	0,03	0,00	0,00	8,40	0,00	4,30	2,78	24,20	21,02
2001-05-16	7,0	3,9	0,01	0,00	1,71	4,01	0,00	0,94	1,26	5,73	3,60
2001-05-23	6,8	10,1	0,02	0,00	1,36	10,19	0,00	2,96	1,82	31,11	16,77
2001-05-28	5,0	0,3	0,00	0,12	1,94	2,80	0,10	0,54	0,47	6,39	3,78
2001-06-05	7,9	29,7	0,04	0,00	0,00	21,50	0,00	0,00	8,70	47,22	31,63
2001-06-12	7,1	33,2	0,09	0,00	0,00	26,11	0,00	0,00	0,00	75,03	38,68
2001-06-18	5,9	21,8	0,08	0,00	0,00	12,16	0,00	0,00	0,00	31,17	20,25
2001-06-25	7,1	14,5	0,07	0,00	0,00	7,74	0,00	0,00	0,00	25,67	11,75
2001-07-02	6,9	9,1	0,08	0,00	0,00	12,10	0,24	3,92	2,83	36,13	22,57
2001-07-09	7,0	74,8	0,30	0,00	0,00	38,75	0,00	32,28	0,00	81,53	80,78
2001-07-16	7,0	44,5	0,22	0,00	0,00	24,56	0,00	5,72	0,00	60,08	55,18
2001-07-23	7,0	9,1	0,05	0,00	0,00	4,68	0,00	2,09	0,00	16,06	11,38
2001-08-06	14,0	9,3	0,02	0,00	0,00	8,02	0,38	4,70	5,20	13,76	10,00
2001-08-13	7,2	3,1	0,00	0,31	0,00	3,60	0,25	1,87	1,95	9,49	5,27
2001-08-20	6,8	4,1	0,01	0,00	0,00	5,60	0,35	5,25	2,21	10,68	8,14
2001-08-27	7,0	10,0	0,02	0,00	0,00	14,60	0,27	5,10	1,98	31,10	19,75
2001-09-03	7,0	18,9	0,11	0,00	0,00	47,16	0,00	7,35	8,94	155,74	58,12
2001-09-10	7,0	49,0	0,30	4,95	0,00	36,73	0,00	0,00	21,85	116,38	73,99
2001-09-17	7,0	65,8	0,26	16,78	0,00	43,56	0,00	0,00	29,48	142,46	84,22
2001-09-24	7,0	29,6	0,18	0,00	0,00	14,61	1,10	10,06	0,00	74,00	29,82
2001-10-01	7,0	9,5	0,05	0,00	0,00	13,11	0,00	2,98	0,00	37,19	31,16
2001-10-08	7,0	21,6	0,11	0,00	0,00	11,61	0,00	0,00	0,00	27,43	21,92
2001-10-15	7,1	2,7	0,00	3,62	3,21	8,61	0,15	0,76	4,59	5,37	4,51
2001-10-22	6,9	7,8	0,02	2,32	0,00	4,45	0,00	2,77	2,73	16,58	11,23
2001-10-29	7,0	16,5	0,11	0,00	0,00	8,62	0,00	0,00	0,00	38,78	26,98
2001-11-05	6,9	6,8	0,02	10,68	0,00	4,08	1,09	4,51	15,67	17,75	12,61
2001-11-12	7,0	54,6	0,19	5,95	0,00	24,13	0,00	0,00	22,99	85,72	47,01
2001-11-19	7,0	5,2	0,04	0,00	0,00	1,53	0,00	0,00	1,75	14,22	5,72
2001-11-26	7,1	30,8	0,21	0,00	0,00	17,43	0,00	0,00	9,95	61,91	39,73
2001-12-03	6,9	31,7	0,23	0,00	0,00	4,45	0,00	0,00	0,00	58,17	24,01
2001-12-10	7,0	25,4	0,26	7,86	0,00	10,15	0,64	2,59	14,06	63,12	35,43
2001-12-17	7,0	4,1	0,01	1,20	0,00	3,56	0,00	0,00	2,41	9,72	10,62
2001-12-21	4,1	0,8	0,00	0,48	0,00	1,20	0,05	0,13	0,90	5,24	3,20
2001-12-28	6,9	13,5	0,07	0,00	0,00	5,24	0,00	0,00	6,59	28,28	11,65
2002-01-21	24,1	51,4	0,29	20,12	0,00	27,06	0,00	0,00	42,12	103,31	76,59
2002-01-28	7,0	60,0	0,31	0,00	0,00	20,88	0,00	0,00	0,00	57,51	39,81
2002-02-04	7,0	4,3	0,02	1,74	0,00	1,93	0,12	1,05	3,06	5,93	7,68
2002-02-11	7,0	38,2	0,16	10,93	0,00	11,84	0,00	0,00	22,27	57,49	33,14
2002-02-18	7,0	56,8	0,22	0,00	0,00	21,39	1,85	9,57	0,00	64,75	55,47
2002-02-25	7,0	71,0	0,24	14,87	0,00	29,50	2,32	20,31	33,19	112,54	68,20

Erklärung

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

Ferner erkläre ich, dass ich anderweitig mit oder ohne Erfolg nicht versucht habe, diese Dissertation einzureichen. Ich habe außerdem keine gleichartige Doktorprüfung an einer Hochschule endgültig nicht bestanden.

Bayreuth, den 24. November 2003

Thomas Wrzesinsky