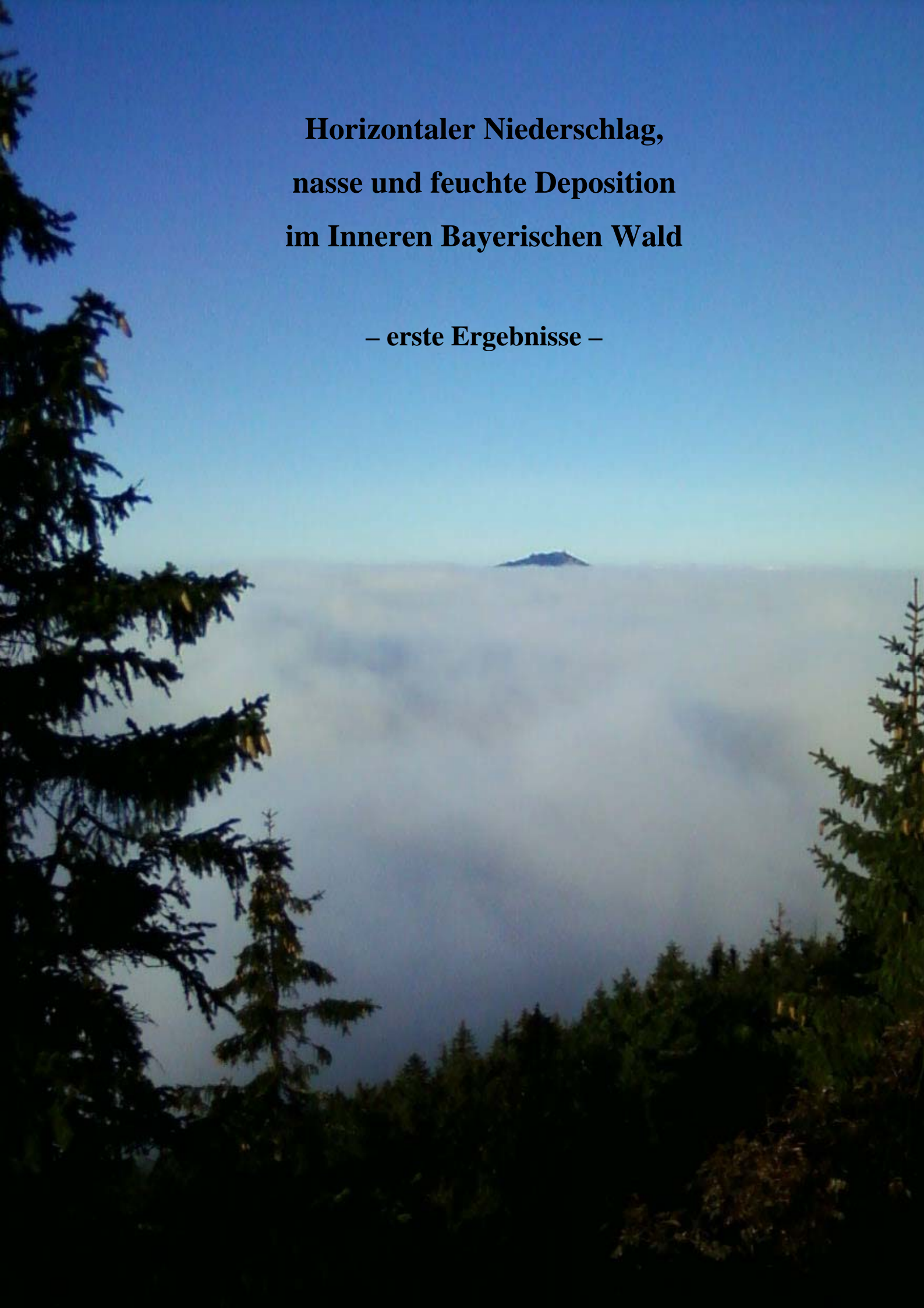


**Horizontaler Niederschlag,
nasse und feuchte Deposition
im Inneren Bayerischen Wald**

– erste Ergebnisse –



Integrated Monitoring Programm
an der
Messstelle Forellenbach
im
Nationalpark Bayerischer Wald

Förderkennzeichen 351 01 012/04

**Horizontaler Niederschlag,
nasse und feuchte Deposition
im Inneren Bayerischen Wald**
– erste Ergebnisse –

von

Burkhard Beudert und Wilhelm Breit

Nationalparkverwaltung Bayerischer Wald
Sachgebiet IV

Im Auftrag des
Umweltbundesamtes

Juni 2012

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	4
2	Material und Methoden	5
2.1	Standorte und Untersuchungsprogramm	8
2.2	Methoden	11
2.2.1	Messung und Probenahme	11
2.2.2	Probenaufbereitung und Analyse	13
2.2.3	Berechnungen	14
3	Ergebnisse	15
3.1	Niederschlagsmengen	15
3.2	Stoffkonzentrationen	21
3.2.1	Freilandniederschlag	21
3.2.2	Bestandesniederschlag	22
3.2.3	Horizontaler Niederschlag	23
3.3	Stoffflüsse	26
3.3.1	Vergleich von Sammlertyp und Sammlerposition	26
3.3.2	Stoffflüsse im Freiland und mit dem Bestandesniederschlag	27
4	Diskussion: Qualität und Quantität nasser und feuchter Depositionen	29
5	Zusammenfassung: Niederschlag und Stoffeinträge in Fichtenwälder über nasse und feuchte Deposition	35
	Literaturverzeichnis	38
	Anhang	40

Verzeichnis der Tabellen

Tab. 1:	Monatlich aggregierte Klimadaten der Stationen Waldhäuser (947 m ü. NN) und Großer Arber (1436 m ü. NN, DWD 2012) für die Jahre 1983 bis 2010.	6
Tab. 2:	Positionen und Höhenlage der Messplätze.	8
Tab. 3:	Untersuchungsprogramme.	8
Tab. 4:	Niederschlagssummen (mm) im Freiland am Großen Falkenstein (1310 m ü. NN), beim Haus zur Wildnis (680 m ü. NN) und am Großen Arber (1436 m ü. NN).	15
Tab. 5:	Niederschlagssummen (mm) unter Fichte am Großen Falkenstein (1307 m ü. NN) und in der Schachtenau (~800 m ü. NN) des Forellenbachgebietes (im Freiland und unter Fichte).....	16
Tab. 6:	Sammelergebnis des Nebelfängers (ml), gefallener Niederschlag (Distrometer, mm) und Windgeschwindigkeit (m/s) am Großen Falkenstein (1311 m ü. NN)	18
Tab. 7:	Konzentrationen von Gesamtstickstoff (TN _b), NH ₄ -N und NO ₃ -N (mg/l) im Freilandniederschlag der bulk- (A, B) und wet-only-Sammler am Großen Falkenstein (1310 m ü. NN) und an der Station Taferlruck (762 m ü. NN). Die mittleren Konzentrationen für den Zeitraum vom 4.10. bis 5.12.2011 sind volumengewichtet.	21
Tab. 8:	Konzentrationen von Gesamtstickstoff (TN _b), NH ₄ -N und NO ₃ -N (mg/l) im Bestandesniederschlag unter Fichte am Großen Falkenstein (Sammler A, B, C) und in der Weitau (n = 10 Sammler). Die mittleren Konzentrationen (1.9. bis 5.12.) sind volumengewichtet.	22
Tab. 9:	Stoffkonzentrationen im Wasser des Nebelfängers, Sammelergebnis des Nebelfängers (ml) und gefallener Niederschlag (Distrometer, mm) am Großen Falkenstein sowie mittlere Sichtweite im Nebel während der Tageslichtstunden am Großen Arber (DWD 2012).....	23
Tab. 10:	Stoffflüsse mit dem Freilandniederschlag am Großen Falkenstein (bulk, wet-only) und am Taferlruck (bulk) im Zeitraum 4.10. bis 5.12.2011.....	26
Tab. 11:	Stoffflüsse mit dem Bestandesniederschlag am Großen Falkenstein vom 1.9. bis 5.12.2011. Bestand A/B: Mittelwert aus Bestand A und B; Bestand C _K : auf die Niederschlagshöhe von Bestand A/B reduzierte Stoffflüsse.....	26

Verzeichnis der Abbildungen

Abb. 1: Übersichtskarte	5
Abb. 2: Standort Großer Falkenstein mit Messplätzen für Freiland- und Bestandesniederschlag, Deposition, Meteorologie und horizontalen Niederschlag (siehe Kap. 2.2.1). Die Kronenschirmflächen über den Sammlern A, B, C wurden gemessen. Die Schirmflächen der anderen Bäume wurden über ihren Brusthöhendurchmesser berechnet (siehe Text).....	9
Abb. 3: Stammfußkarte des Fichtenbestands Weitau (Kreisfläche 600 m ²) mit 10 Depositionssammlern (Kästchen) für den Bestandesniederschlag. Die Kronenschirmflächen der Fichten und einer Buche (strichliniert) wurden aus jeweils acht (12) Kronenablotungen berechnet (s. o.).....	10
Abb. 4: Nebelfänger mit Schutz gegen fallenden Niederschlag am Großen Falkenstein.....	12
Abb. 5: Netto-Niederschlagsgewinne (mm) unter Fichte (Bestand A, B, C), berechnet als Differenz von Bestandes- zu Freilandniederschlag (bulk A) am Großen Falkenstein (1307 m ü. NN).....	17
Abb. 6: Sammelintervalle für horizontalen Niederschlag (schwarze Kästchen, nummeriert) und Tagesniederschläge (Distrometer) am Großen Falkenstein.....	19
Abb. 7: Logarithmiertes Wasservolumen im Nebelfänger (ml), aufgetragen gegen die mittlere Windgeschwindigkeit am Großen Falkenstein (METEODATA 2012) und gegen die mittleren Sichtweite im Nebel während der Tageslichtstunden am Großen Arber.....	20
Abb. 8: Doppellogarithmische Auftragung N-Gesamtkonzentration (TNb) auf des gesammelte Volumen im Nebelfänger (links) und die mittlere Sichtweite im Nebel (rechts) während der Tageslichtstunden am Großen Arber (DWD 2012).....	24
Abb. 9: Doppellogarithmische Auftragung der NO ₃ - und SO ₄ -Konzentrationen auf die NH ₄ -Konzentrationen (µeq/l) im Wasser des Nebelfängers am Großen Falkenstein.....	25
Abb. 10: Stoffflüsse mit dem Freilandniederschlag (bulk A) und dem Bestandesniederschlag am Großen Falkenstein vom 1.9. bis 5.12.2011. Zur Berechnung des Bestandesmittelwertes siehe Tab. 12.....	27
Abb. 11: Stickstoffdeposition am Großen Falkenstein und im Forellenbachgebiet vom 1.9. bis 5.12.2011.....	28
Abb. 12: Boxplots der Konzentrationen von TNb, NO ₃ -N und NH ₄ -N im Wolken- und Nebelwasser am Großen Falkenstein, differenziert nach den Niederschlagshöhe während der 15 Sammelintervalle (N < 3.9 mm: n = 11; N > 3.9 mm: n = 4).....	30
Abb. 13: Boxplots der TN _b -Konzentrationen in Wolken- und Nebelwasser sowie im Freiland- und Bestandesniederschlag am Großen Falkenstein.....	31
Abb. 14: Mediane Stoffkonzentrationen im Nebel- und Wolkenwasser am Großen Falkenstein (1.9. - 5.12.), dargestellt als Vielfache der gewichteten mittleren Konzentrationen im Freiland.....	32
Abb. 15: Stoffflüsse mit dem Bestandesniederschlag am Großen Falkenstein (1.9. bis 5.12.2011), dargestellt als Vielfache der entsprechenden Flüsse im Freiland (Anreicherungsfaktoren)....	33

1 Einleitung

Die Belastung des Forellenbachgebiets durch schwefelsaure Depositionen ist seit Einrichtung des Monitoringprogramms im Jahr 1990 drastisch zurückgegangen, sodass sich die Qualität der Boden- und Bachwässer signifikant verbessert hat und eindeutige Hinweise auf die Erholung der Ökosysteme erkennbar sind (DIEFFENBACH-FRIES and BEUDERT 2007, BEUDERT und BREIT 2011).

Die Belastung des Gebietes mit reaktiven Stickstoffverbindungen ist nach einem leichten Rückgang zu Beginn der 1990er Jahre seither auf wenig verändertem Niveau verblieben (BEUDERT und BREIT 2010). Dies entspricht der Gesamtsituation in Mittel-europa, dass die Stickstoffemissionen und -einträge in den letzten 20 Jahren in weit geringerem Ausmaß als beim Schwefel (KOPÁČEK AND HRUSKA 2010, UBA 2012) zurückgegangen sind.

Die Risiken hoher Stickstoffeinträge liegen vornehmlich in der Eutrophierung, die zu Veränderungen im Arteninventar der Bionzöosen und in der Biodiversität führen kann, in Vitalitätsminderungen der Bäume durch unausgewogene Nährstoffversorgung und in der Befruchtung der Grundwässer mit Nitrat bei Übersättigung der Böden.

Wesentliches Handwerkszeug zur Risikoabschätzung ist das Konzept der kritischen Stoffeinträge (UBA 1996), bei deren dauerhafter Überschreitung mit schädlichen Wirkungen im Ökosystem und mit nachteiligen Veränderungen der Ökosystemfunktionen zu rechnen ist.

Für die hochmontanen und subalpinen Waldlebensraumtypen des Untersuchungsgebiets auf saurem Ausgangsgestein liegen die kritischen N-Einträge bei 10 - 15 kg N/ha (BOBBINK and HETTELINGH 2011). Dieses Niveau wird in den Fichten- und Buchenwäldern des Forellenbachgebiets durch die gemessenen bzw. daraus ableitbaren N-Einträge erreicht (BEUDERT und BREIT 2010). Für Grasland-, Strauch- und Moorlebensräume in Tal- und Hochlagen wie auch saure Karseen überschreitet bereits die Freilanddeposition in tiefen Höhenlagen die kritische Belastung (3 - 10 kg N/ha, BOBBINK and HETTELINGH 2011).

Der gesamte rezeptorabhängige N-Eintrag wird in Deutschland auf der Basis der nassen Deposition über Modellpaket flächendeckend kartiert (GAUGER et al. 2008, BUILTJES et al. 2011). Im Modell sind als Eintragspfade neben der trockenen Deposition auch die feuchte Deposition (Auskämmen von Nebel und Wolken) berücksichtigt. Diese gewinnt mit zunehmender Höhenlage an Bedeutung und schlägt sich daher in den kartierten N-Depositionen für den Inneren Bayerischen Wald nieder. Leider gibt es seit 1995 keinen Messplatz oberhalb von 970 m ü. NN mehr, der Daten für die Validierung der Modelle zur Verfügung stellen könnte.

Um Informationen zum N-Eintrag im Forellenbachgebiet räumlich zu komplettieren, wurde im September 2011 ein begrenztes Messprogramm an einem Hochlagenstandort im Nationalpark Bayerischer Wald gestartet. Es beinhaltet neben dem klassischen Ansatz für das stoffliche Depositionsmonitoring im Wald mit Freiland- und Bestandesniederschlag auch die Sammlung von Nebel- und Wolkenwasser. In den nachfolgenden Ausführungen werden die Lokalitäten, Baumbestände und Messeinrichtungen dieses Programms beschrieben und erste Ergebnisse zum Eintrag von Wasser über Regenniederschlag und Wolkenauskämmung und zur stofflichen Beschaffenheit dieser Wässer vorgestellt und diskutiert.

2 Material und Methoden

Das Forellenbachgebiet liegt im Nationalpark Bayerischer Wald im südostbayerischen Landkreis Freyung-Grafenau an der Grenze zur Tschechischen Republik (Abb. 1). Es ist ein 0,69 km² großer Geländeausschnitt des Rachel-Lusen-Gebietes im Inneren Bayerischen Wald, der mit dem angrenzenden Böhmerwald (Šumava, Tschechische Republik) das größte zusammenhängende Waldgebiet Mitteleuropas bildet.

Das sich über eine Horizontalabstanz von 2.8 km erstreckende oberirdische Einzugsgebiet des Forellenbachs reicht von den Hochlagen (1292 m ü. NN) bis in die Talungen (787 m ü. NN) und ist wie der Hauptkamm nach Südwesten exponiert. Die mittlere Höhenlage von 870 m ü. NN (KLÖCKING 2005) und die mittlere Hangneigung von 12 % resultieren aus dem hohen Flächenanteil (69 %) der schwach geneigten (3% - 8%) Höhenbereiche bis 900 m ü. NN (Abb. 1). Die Koordinaten der Pegelstation zur Verortung des Gebietes lauten 48°56'38"N und 13°25'26"E.

Der Große Falkenstein (49°05'30"N, 13°16'48"E) liegt im benachbarten Landkreis Regen und erhebt sich mit sehr steilen südlich und westlich exponierten Hängen am nördlichen Ende des Nationalparkgebietes auf eine Höhe von 1315 m ü. NN (Abb. 1). Er ragt gegen Westen deutlich über die Gipfel des Vorderen Bayerischen Waldes (bis 1100 m ü. NN) hinaus. Die Distanz zum Forellenbachgebiet (Messturm Schachtenau) beträgt etwa 18 km.

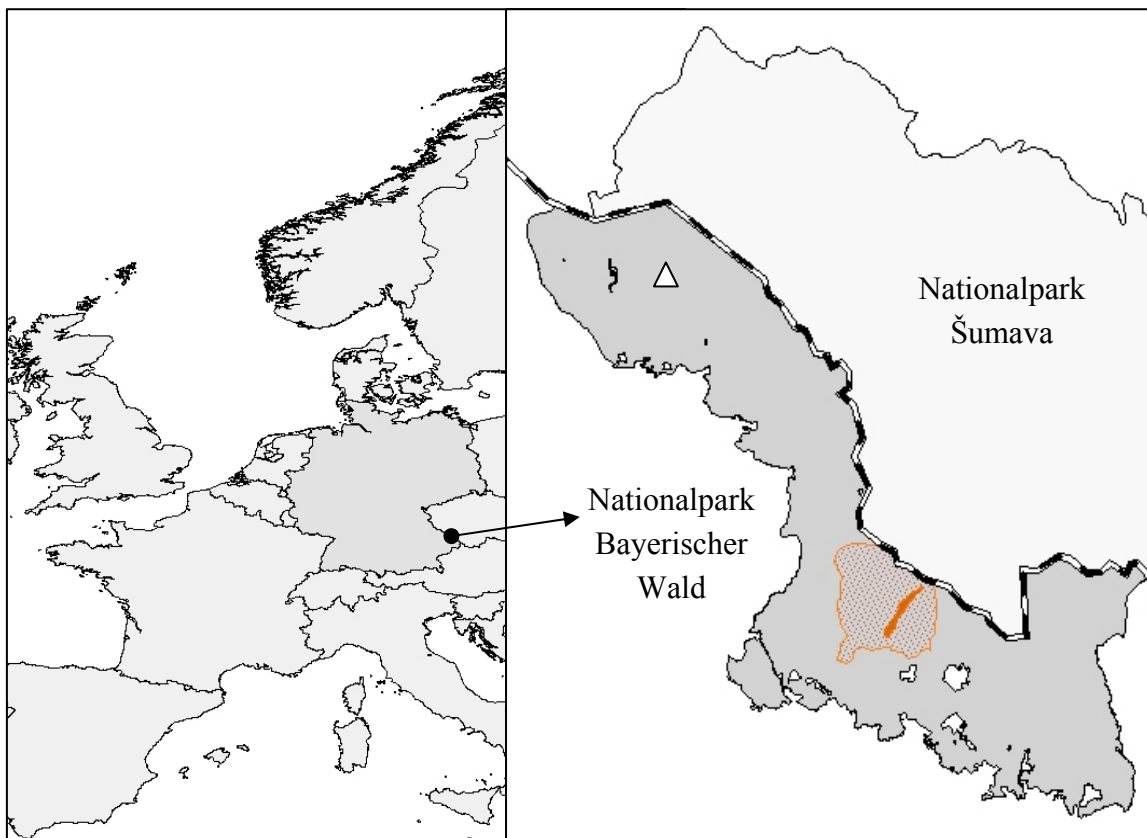


Abb. 1 Übersichtskarte zur Lage des Großen Falkensteins (1315 ü. NN, Dreieck) und des Forellenbachgebietes im Einzugsgebiet der Großen Ohe.

Das Klima im Inneren Bayerischen Wald wird durch die Grenzsituation zwischen kontinentalen Luftmassen und von Westen auflaufenden atlantischen Fronten geprägt. Aus dieser Grenzsituation resultieren, verstärkt durch die Luv-Situation am NW-SO streichenden Hauptkamm, hohe Jahresniederschläge, welche im Winter zur Ausbildung mächtiger Schneedecken führen, und relativ niedrige Jahresmitteltemperaturen bei hoher Sonnenscheindauer. Die genauere Charakterisierung des Klimas beschränkt sich auf die Jahre 1983 bis 2010, um zusammenhängende Zeitreihen für Hang- und Hochlagen nutzen zu können. Für die Hanglagen des Inneren Bayerischen Waldes werden die Messdaten der Wetterstation Waldhäuser (947 m ü. NN) genutzt, die von der Nationalparkverwaltung betrieben wird, für die Hochlagen die Daten der Wetterstation des Deutschen Wetterdienstes (DWD) am Großen Arber (1436 m ü. NN). Sie ist Nachfolgerin der 1947 begründeten Wetterstation auf dem Großen Falkenstein, die im Jahr 1982 geschlossen wurde.

Die Jahresmitteltemperatur auf dem Großen Arber beträgt 3.4°C und ist damit 2.5 K geringer als an der Station Waldhäuser. Dem adiabatischen Temperaturgradienten von 0.5°C entsprechend können für den Großen Falkenstein etwa 4°C angenommen werden. Die Niederschläge sind mit 1509 mm/a bei ähnlicher Verteilung über die Monate nur wenig höher als an der Station Waldhäuser (1389 mm/a). Im Forellenbachgebiet liegt dagegen ein Höhengradient von annähernd 100 mm je 100 Höhenmeter vor; im Einzugsgebiet der Großen Ohe erreichten Totalisatoren im selben Zeitraum 1735 mm/a (1170 m ü. NN) und 1941 mm/a (1240 m ü. NN). Ursache hierfür ist die massive Beeinflussung der Niederschlagsmessung durch starke Winde, deren Maximalgeschwindigkeiten (71 m/s) am Gipfel mehr als dreifach höher sein können als an der Hanglagenstation. Dies dürfte am Großen Arber einen vergleichbar hohen maximalen Niederschlag von 130 mm/Tag (August 2002) wie an der Station Waldhäuser verhindert haben. Dies wirft bereits ein Licht auf die Bedeutung des horizontalen Eintrags für den Wasser- und Stoffhaushalt im windexponierten Gelände.

Tab. 1: Monatlich aggregierte Klimadaten der Stationen Waldhäuser (947 m ü. NN) und Großer Arber (1436 m ü. NN, DWD 2012) für die Jahre 1983 bis 2010.

Monat	Großer Arber (1436 m ü. NN)				Waldhäuser (947 m ü. NN)			
	T (°C)	N (mm)	N _{max} (mm/Tag)	V _{max} (m/s)	T (°C)	N (mm)	N _{max} (mm/Tag)	V _{max} (m/s)
1	-4.1	133	62	47	-2.4	132	58	27
2	-4.4	115	70	44	-2.1	114	46	27
3	-2.1	131	53	46	0.8	127	68	24
4	2.0	82	90	37	5.5	73	49	20
5	7.0	111	68	34	10.5	100	66	22
6	9.6	129	55	32	12.8	126	65	20
7	11.8	149	87	34	14.9	139	63	22
8	11.8	141	89	33	14.5	126	130	22
9	7.8	134	94	71	10.5	108	86	19
10	4.7	111	84	42	7.0	89	68	30
11	-0.3	123	76	44	1.6	112	41	28
12	-3.1	151	73	45	-1.4	143	78	26
Ø / Σ	3.4	1509	94	71	6.0	1389	130	30

Für die nachfolgenden Abschnitte ist zunächst zu definieren, welche Erscheinungen und Prozesse mit den Begriffen Wolke, Regen/Schnee, Nebel, Freilandniederschlag, Kronendurchlass benannt werden sollen. Die Definitionen sind dem Wetterlexikon des Deutschen Wetterdienstes und dem Glossar der Amerikanischen Meteorologischen Gesellschaft entnommen (<http://www.deutscher-wetterdienst.de/lexikon>, <http://amsglossary.allenpress.com/glossary>).

Eine Wolke ist ein Hydrometeor, also eine Ausscheidung atmosphärischen Wasserdampfs in flüssiger und fester Form, in dem Tröpfchendurchmesser bis 0.5 mm enthalten sind.

Berühren Wolken die Erdoberfläche, so werden sie als Nebel bezeichnet. Nebel ist definiert über eine Sichtweite von weniger als einem Kilometer und wird durch Tröpfchen erzeugt, die klein genug sind, um in der Wolke suspendiert zu bleiben. Schwerere Tropfen mit einem Durchmesser von 0.5 mm bis 5 mm können im Allgemeinen nicht gegen die Schwerkraft in der Wolke gehalten werden und fallen als Regen zur Erde. Am Standort Großer Falkenstein auf 1314 m ü. NN bestehen die meisten Nebel aus den von Südwesten bis Nordwesten herangeführten Wolken oder entstehen beim Aufstieg von Luftmassen als orographische Nebel, wenn durch Abkühlung der Sättigungsdampfdruck erreicht wird und Kondensation einsetzt.

Im Rahmen dieser Arbeit werden die Begriffe Nebel und Wolke sowie Nebel- und Wolkenwasser zunächst synonym verwendet, in der Diskussion jedoch pragmatisch über die Sichtweite bzw. analytischen Kriterien unterschieden. **Regen** ist derjenige Niederschlag, der im Freiland mit einem Regensammler aufgefangen wird, weil die Tröpfchen zu schwer sind, um in der Luft zu verbleiben. Schneefall war bei den vorliegenden Messungen unbedeutend.

Kronendurchlass als Schätzwert für den Bestandesniederschlag ist derjenige Niederschlag, der unter dem Kronendach des Fichtenbestands mit Sammlern aufgefangen wird. Dieser Bestandesniederschlag ist die Summe aus fallenden (vertikaler Niederschlag) und interzipierten Tropfen (horizontaler Niederschlag), vermindert um die Evaporationsverluste vom Kronendach. Er ist also der Nettoniederschlag auf den Boden. Eine positive Differenz zum Freilandniederschlag beschreibt daher bei fehlendem oder geringem Verdunstungsanspruch der Atmosphäre den Interzeptionsgewinn aus den Wolken, bei stärkerer Verdunstung den Nettointerzeptionsgewinn. Auf die Messung des Stammablaufs wird bei Fichte wegen seiner geringen Bedeutung in allen Monitoring-Netzwerken verzichtet.

In gleicher Weise ist die **Freilanddeposition** oder **Niederschlagsdeposition** als derjenige Stoffeintrag definiert, der die Bodenoberfläche im Freiland erreicht. Im Hinblick auf den Depositionspfad der Stoffe herrscht hier Klarheit, wenn Probenwasser nur bei Niederschlag gesammelt wird (wet-only) oder die Bedeutung der Sedimentation von Aerosolen gering ist.

Für die Gesamtdeposition, definiert als der gesamte Stoffeintrag aus der Atmosphäre in einen Baumbestand, ist diese Klarheit nicht herzustellen. Zusätzlich zum Niederschlag (nasse Deposition) werden Gase und Partikel im Kronenraum deponiert (trockene Deposition). Das Auskämmen von Nebel und Wolken durch Fichtenkronen in exponierten Bergregionen erzeugt zusätzliche Einträge von Stoffen (feuchte/okkulte/horizontale Deposition). Die Stoffkonzentrationen im **Kronendurchlass** sind Ergebnis dieses Eintrags von Stoffen in den Kronenraum und der Vielzahl von physikalisch, chemischen und physiologischen Frei- und Umsetzungsprozessen, denen sie unterworfen sind. Der Stoffeintrag, der mit Sammelvorrichtungen unter dem Kronendach erfasst werden kann, ist daher als **Deposition mit dem Bestandesniederschlag** der Nettoeintrag auf die Bodenoberfläche.

2.1 Standorte und Untersuchungsprogramm

Ausgangspunkt und Basis der Untersuchungen zum horizontalen Eintrag von Wasser und darin gelösten Stoffen sind die Lokalitäten Taferluck, Schachtenau (Messturm) und Weitau (Fichtenbestand) des Integrierten Ökosystemmonitorings am Forellenbach (Tab. 3), welche auf Höhen zwischen 782 und 807 m ü. NN liegen. Das „Haus zur Wildnis“ liegt auf einem niedrigen Höhenrücken (680 m ü. NN) am Fuß des Großen Falkenstein. Kernstück der Untersuchungen zum horizontalen Stoffeintrag sind der Fichtenbestand und die dazugehörige Freifläche am Großen Falkenstein auf über 1300 m ü. NN.

Tab. 2:
Positionen und Höhenlage der Messplätze.

Messplatz	Position (Gauss-Krüger)		Höhe (m ü. NN)
	Rechts	Hoch	
Taferluck	4603611	5423153	762
Schachtenau Messturm	4604167	5424299	807
Weitau Bestand	4604044	5423738	782
Haus zur Wildnis	4591002	5436718	680
Großer Falkenstein	4593585	5439464	1314
Großer Falkenstein Bestand	4593627	5439491	1310

Messungen der Lufttemperatur, der relativen Luftfeuchte, der Niederschlagsmenge und der Niederschlagsintensität erfolgten an allen Lokalitäten, wobei an den Messtürmen in der Schachtenau und am Großen Falkenstein sowie am Haus zur Wildnis auch der Aggregatzustand des Niederschlags erfasst wird (Tab. 3). Das Programm zur Sammlung und Analyse von Wolkenwasser wurde nur am Großen Falkenstein (Tab. 3) durchgeführt, dessen Gipfel nach Untersuchungen von BAUMGARTNER (1958) etwa ein Drittel des Jahres 1955 in Wolken steckte, während Höhenlagen unter 900 m ü. NN kaum Nebel und Nebelniederschlag hatten. Die Deposition von Stoffen aus der Atmosphäre im Freiland (Niederschlag und sedimentierte Aerosole) wurde an den Lokalitäten Taferluck und Großer Falkenstein gemessen, unter Ausschluss von Aerosolen am Großen Falkenstein (Tab. 3). Der Kronendurchlass als Schätzwert für den Bestandesniederschlag unter Fichte wurde parallel zu den Freilandmessungen in den Beständen Weitau (Abb. 3) und Großer Falkenstein erfasst (Abb. 2).

Tab. 3: Untersuchungsprogramme

Messplatz	Meteorologie	Sichtweite	Niederschlag Intensität/Art	Deposition		
				Freiland	Bestand	Nebel
Taferluck/Weitau	x		I	x	x	
Schachtenau	x	x	I, A			
Haus zur Wildnis	x		I, A			
Großer Falkenstein	x		I, A	x	x	x

Über die photographische Darstellung hinaus (Abb. 1 und 2 Anhang) werden die Elemente (Geräte, Bäume) der komplexeren Messorte Große Falkenstein (Abb. 2) und Fichtenbestand Weitau (Abb. 3) lagegetreu in Karten abgebildet, wobei nur die Kronenprojektionsflächen maßstabsgetreu sind.

Der meteorologische Messturm, die Niederschlagsmessgeräte und Freilanddepositionssammler stehen in einer Lichtung auf dem Gipfelplateau des Großen Falkenstein (Abb. 2), auf der auch die Wetterbeobachtungen des DWD (bis 1982) Messungen von BAUMGARTNER (1958) erfolgten. Der Nebelwassersammler wurde etwa 40 m westlich des Messturms auf dem Gipfelkamm positioniert. Er ist von Westen bis Norden frei anströmbar.

Im nordwestlich angrenzenden Teil des lückenhaften Fichtenbestandes wurden drei Depositionssammler derart aufgestellt, dass unterschiedliche Übershirmungssituationen von stammnah (B) und einfach überschirmt bis stammfern offen (A) und stammfern im Trauf mehrerer Kronen erfasst wurden. Die Projektionsflächen der die Sammler überschirmenden bzw. umgebenden Fichten ($n = 11$) wurden über jeweils acht Kronenablotungen unter Verwendung eines Teilkreismodells (KRAMER und DONG 1985) ermittelt und gezeichnet. Aus diesen Messwerten wurde eine allometrische Übertragungsfunktion abgeleitet, welche die Berechnung des mittleren Kronendurchmessers KD und damit der Schirmfläche aus dem Brusthöhendurchmesser BHD der übrigen Fichten ermöglichte ($KD = 6.88 * BHD (m) + 2.15$; $r^2 = 0.78$). Der Brusthöhendurchmesser des Grundflächenmittelstamms der 63 vermessenen Fichten beträgt 49.5 cm, die Höhe 22.9 m. Die Depositionssammler werden von sieben dominanten Fichten, die überdurchschnittlich stark (57 ± 9 cm) und hoch (26 ± 2 m) sind und von vier unterständigen Fichten mit geringen Dimensionen (20 cm, 11 m) überschirmt. Auf die Berechnung flächenbezogener Holzvorräte wurde wegen der geringen Stammzahlen, der geklumpten Positionen und daraus resultierenden Lückigkeit verzichtet.

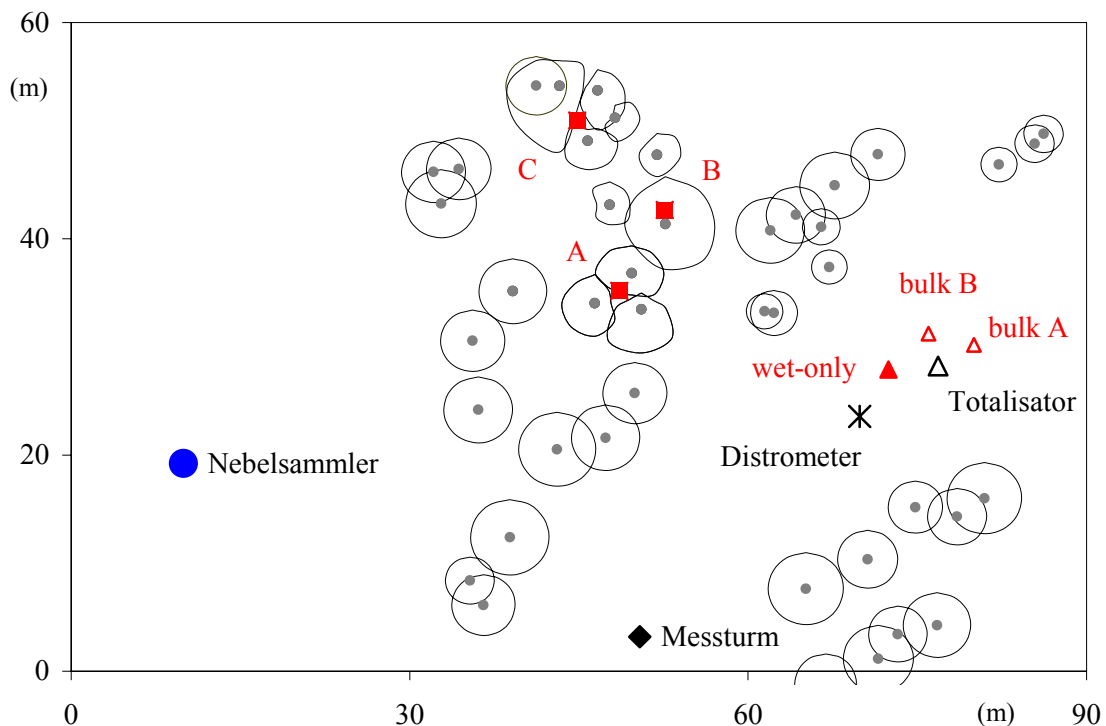


Abb. 2: Standort Großer Falkenstein mit Messplätzen für Freiland- und Bestandesniederschlag, Deposition, Meteorologie und horizontalen Niederschlag (siehe Kap. 2.2.1). Die Kronenschirmflächen über den Sammlern A, B, C wurden gemessen. Die Schirmflächen der anderen Bäume über ihren Brusthöhendurchmesser berechnet (siehe Text).

Der Fichtenbestand Weitau (Abb. 3) ist der Rest eines mächtigen Altbestandes, dessen östlicher Teil durch Windwürfe und Befall mit Fichtenborkenkäfer (*Ips typographus* L.) bereits seit vier Jahren abgestorben ist. Der Brusthöhendurchmesser des Grundflächenmittelstamms der 22 vermessenen Fichten in der Kreisfläche beträgt 52 cm, seine Höhe 32.7 m (Tab. 2 Anhang). Diese Bäume sind im Vergleich zum Bestand am Großen Falkenstein bei ähnlichem Brusthöhendurchmesser um 10 m höher. Dies unterstreicht die Standortsungunst in der Hochlage. Verringertes Wachstum und häufig auftretende Wipfelbrüche führen dort zu starker Abholzigkeit, häufiger auftretende Windwürfe zu mehr Lücken im Kronendach.

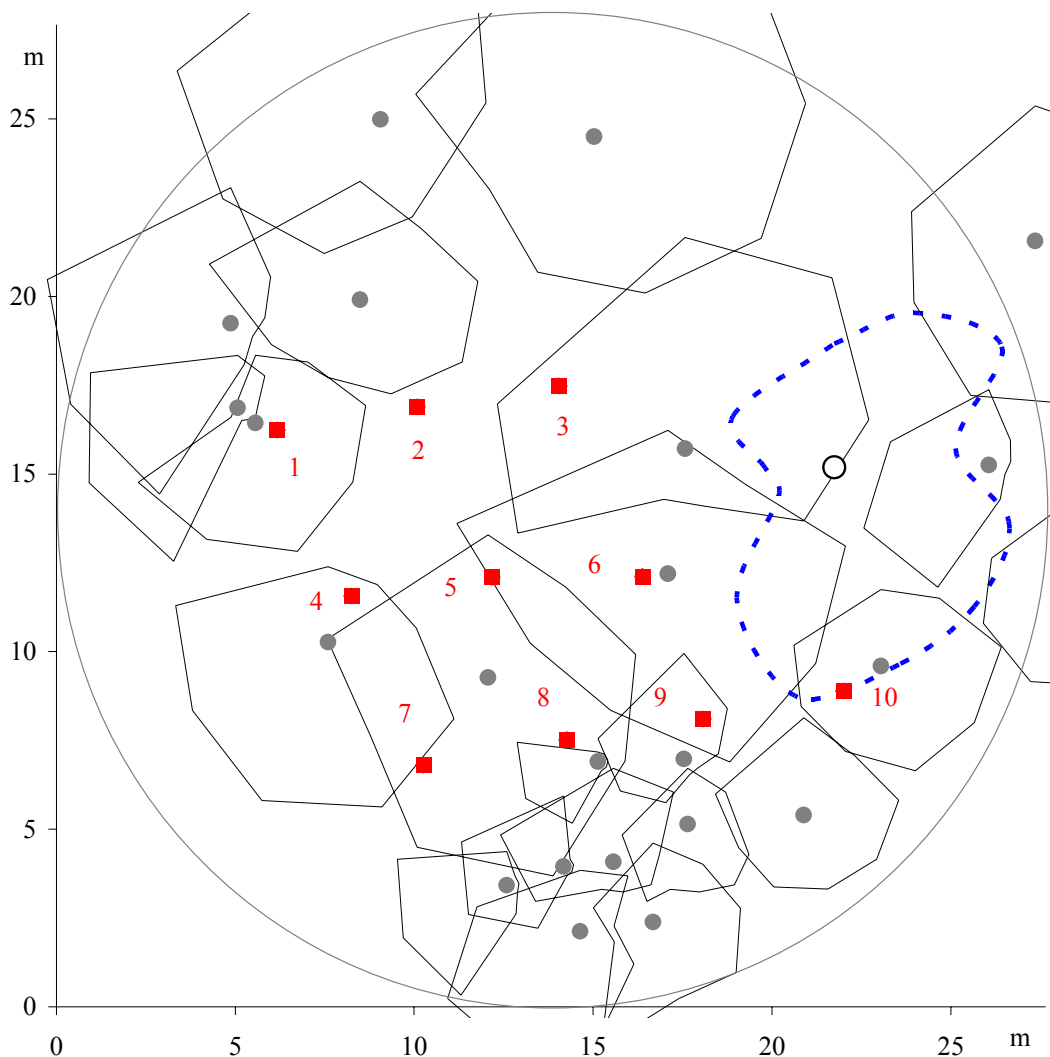


Abb. 3: Stammfußkarte des Fichtenbestands Weitau (Kreisfläche 600 m²) mit 10 Depositionssammlern (Kästchen) für den Bestandesniederschlag. Die Kronenschirmflächen der Fichten und einer Buche (strichliniert) wurden aus jeweils acht (12) Kronenablotungen berechnet (s. o.).

Bei der hier angenommenen Bezugsfläche von 600 m² würde der Holzvorrat mit Rinde mehr als 1000 Vfm/ha (Tab. 2 Anhang) betragen. Die projizierte Schirmfläche des Grundflächenmittelstamms ist mit 34 m² pro Baum um 50% höher als am Großen Falkenstein (22 m²).

2.2 Methoden

Die Beschreibung der Methoden und Messverfahren beschränkt sich auf neue Installationen für das Nebel- und Wolkenwasserprogramm. Ausführliche Darstellungen des Dauerbeobachtungsprogramms sind in BEUDERT et al. (1994) sowie BEUDERT und BREIT (2004) enthalten. Die Lage der Messstationen und Dauerbeobachtungsflächen und die dort durchgeführten Unterprogramme können Karte 1 des Anhangs entnommen werden.

Die meteorologischen Daten der Messstationen Großer Falkenstein und Großer Arber wurden dankenswerterweise von METEOMEDIA AG (Schwäbrig 833, CH-9056 Gais) und dem Deutschen Wetterdienst (DWD) zur Verfügung gestellt.

2.2.1 Messung und Probenahme

Niederschlag

Für die Niederschlagsmessung wurden Distrometer (Laser Niederschlags Monitor, Fa. Thies Clima. <http://www.thiesclima.com/distrometer.html>) am Messturm Schachtenau, am Haus zur Wildnis und am Großen Falkenstein eingesetzt. Über Infrarot-Laser-Optik wird neben der Niederschlagsmenge pro Zeiteinheit und der meteorologischen Sichtweite im Niederschlag auch die Art des Niederschlags erfasst und nach den SYNOP-Tabellen 4680/4677 codiert aufgezeichnet. Die Daten werden als Mittelwerte bzw. Summen im Minutentakt (Schachtenau), beim Haus zur Wildnis und am Großen Falkenstein im Zehnminutenintervall abgespeichert. Das Distrometer am Großen Falkenstein ist in die Messwerterfassung und Datenspeicherung der METEOMEDIA-Station eingebunden; ab einer Windstärke von 14 m/s (Regen) bzw. 8 m/s (Schnee) wurden die Messwerte des Distrometers annulliert und verworfen.

Beim Haus zur Wildnis wird neben dem Distrometer eine Niederschlagswaage (Fa. Thies Clima) mit einer Auffangfläche von 200 cm² (Höhe 150 cm über Grund) betrieben. Der Datenlogger registriert die Niederschlagsmenge mit einer Auflösung von 0.1 mm und legt die Daten kumulativ im Speicherintervall von zehn Minuten.

Auf der Freifläche am Großen Falkenstein wurde zudem ein Totalisator mit einer Auffangfläche von 200 cm² (Höhe 200 cm über Grund) aufgebaut. Er ist mit einem Nipher-Windschutzring versehen, sein Inhalt wird mit Vaselineöl gegen Verdunstung geschützt. Die Leerung erfolgt regelmäßig zum Monatsultimo.

Deposition

Die Deposition wird über bulk-Sammler (Typ LWF) mit einer Auffangfläche von jeweils 321 cm² erfasst. Die Höhe der Auffangfläche ist bei allen Sammlern 1.25 m über Bodenoberfläche. Messorte sind im Freiland die Stationen Taferlruck (DC3, 3 Sammler, Sammelprobe) und Großer Falkenstein (bulk A, bulk B seit 4.10.2012) und unter Fichte die Messflächen Weitau (F4, 10 Sammler, Sammelprobe) und Großer Falkenstein (Bestand A, Bestand B, Bestand C).

Die Niederschlagsdeposition unter Ausschluss der trockenen Deposition wird seit 4.10.2012 mit einem wet-only-Sammler der Fa. Eigenbrodt (NSA 181/K) am Großen Falkenstein durch-

geführt. Die Auffangfläche beträgt 500 cm^2 (Höhe 200 cm über Grund); der Sammelinhalt wird bis zur Probenahme im integrierten Kühlschrank auf $4^\circ\text{C} - 6^\circ\text{C}$ gekühlt. Alle Sammelgefäße werden wöchentlich geleert und mechanisch gereinigt und mit destilliertem Wasser gespült. Die Niederschlagsmenge wird gravimetrisch bestimmt.

Horizontaler Eintrag von Wasser und gelösten Stoffen

Für die Probengewinnung von Nebel- und Wolkenwasser wurde eine zylindrische Harfe (Abb. 4) benutzt. Sie ist auf einer Kreislinie von 20.5 cm Durchmesser mit 456 Teflonfäden von 45.3 cm Länge und 0.5 mm Durchmesser bespannt (STRÄTER et al. 2010), sodass Nebel- und Wolkentropfen aus allen Himmelsrichtungen aufgefangen werden können. Dieser Nebelfänger wurde dankenswerterweise von Prof. Dr. Klemm, Universität Münster als Leihgabe zur Verfügung gestellt und wird nachfolgend als Nebelsammler bezeichnet.



Abb. 4: Nebelfänger mit Schutz gegen fallenden Niederschlag am Großen Falkenstein

Nebel und Wolkentropfen, die an den Fäden hängenbleiben und sich zu größeren Tropfen vereinen, laufen über einen Trichter in die Auffangflasche, die im Chassis einer ausgemusterten Niederschlagswaage wettergeschützt untergebracht ist. Mit Ausnahme der Fäden bestehen alle konstruktiven Bauteile und Sammelvorrichtungen aus Polyethylen (HDPE). Für die Gesamtheit dieser Komponenten wird nachfolgend der Begriff Nebelfänger verwendet.

Um die Erfassung von fallendem Niederschlag zu vermeiden, wurde der Nebelfänger mit einer 1.44 m² (1.2 m * 1.2 m) großen und 2 cm starken Platte aus UV-stabilem Polycarbonat überdacht. Aus der Geometrie dieser Anordnung ergibt sich, dass Regentropfen mit einem Einfallswinkel (Zenitwinkel) von kleiner als 35° nicht erfasst werden. Nach GRUNOW (1954) treten beim Regen größere Einfallswinkel erst ab Windgeschwindigkeiten von acht Metern pro Sekunde auf.

Aufgrund der fehlenden Automatisierung und der großen Entfernung erfolgte die Aufstellung der Nebelharfe ereignisbezogen am Vormittag, wenn aufgrund von Wettervorhersagen und den aktuellsten Satellitenbildern die Situation „Berge in Wolken“ für den Tag erwartet werden konnte und/oder durch Livebilder (<http://scripts.arber.de/webcam/bilder/livebild.jpg>) vom Großer Arber belegt war. Das Sammelintervall erstreckte sich bei drei Ausnahmen (jeweils zwei Tage) über 22 bis 26 Stunden. Die Wassermenge wurde volumetrisch bestimmt.

2.2.2 Probenaufbereitung und Analyse

Freiland- und Bestandesniederschlag

An allen Proben wurden am Tag nach den Probenahmen der pH - Wert (DIN 38404 - C8) und die Leitfähigkeit (DIN EN 27888) mit Handmessgeräten (Firma WTW, inoLab level 3) ermittelt. Proben für die hydrochemische Analyse wurden nach der Membranfiltration (< 0.45 µm) ohne chemische Konservierung bei 2°C bis 4°C bis zur Analyse gelagert. Die Stabilität der Proben bis zur chemischen Analyse ist über eine durchgehende Kühlkette gewährleistet, die auch den Transport ins Labor im vierwöchigen Rhythmus einschließt.

Die Analyse wässriger Proben erfolgte an der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF) mit den aufgeführten Verfahren. Das Labor führt Qualitätssicherungsmaßnahmen durch und beteiligt sich an Ringanalysen von ICP Waters und ICP Forests.

Ca, K, Mg, Na, Al, Fe, Mn, SiO ₂	ICP - AES nach DIN 38406 Teil 22
SO ₄ , NO ₃ , PO ₄ , Cl	IC nach DIN 38405 Teil 19
NH ₄	Spektralphotometrie nach DIN 38406 Teil 5
TN _b	Gesamtstickstoff, Elementaranalyse (DIN 38409-27, EN 12260)
DOC	Elementaranalyse / UV-Oxidation (DIN EN 1484)

Die Analysequalität wird über Ionenäquivalentbilanzen abgeschätzt:

$$(\Sigma\text{Anionen} - \Sigma\text{Kationen}) / (\Sigma\text{Anionen} + \Sigma\text{Kationen}) * 200 \quad (1)$$

Kationen: H^+ , Ca^{2+} , K^+ , Mg^{2+} , Na^+ , NH_4^+ (Al^{n+} , Fe^{2+} , Mn^{2+})

Anionen: Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} , (DOC)

Das Qualitätsziel von maximal $\pm 10\%$ Abweichung für Grundwässer mit Ladungssummen $< 5000 \mu\text{mol/l}$ (LAWA 1993) wird für DOC - arme Wässer nur im Einzelfall nicht erreicht. Für die Bewertung der analytischen Qualität DOC - reicher Wässer wird ein Schätzrahmen verwendet, indem medienspezifische mittlere Carboxylgehalte des DOC verwendet (BEUDERT 1999b) und die Dissoziationsgrade der Carboxylgruppen (OLIVER et al. 1983) pH - abhängig berechnet werden. Die Ladung der Al^{n+} wird nach KOPÁČEK and HEIZLAR (1998) berechnet, wobei die quantitative Bedeutung der Schwermetalle in den Depositionswässern gering ist.

Wolken- und Nebelwasser

Für Wolken- und Nebelwasser wurde ein eigenes stickstofffreies Verfahren der Probeflaschenkonditionierung entwickelt, das es auch bei den zu erwartenden geringen Volumina erlaubt, sowohl Stickstoffkomponenten als Schwermetalle zu analysieren (BLUM 2012), die hier nicht Gegenstand der Bearbeitung sind. Die Filtration erfolgte mit einem Spritzen-Membranfilter ($0.45 \mu\text{m}$ PTFE), die Analytik wie beim Niederschlag beschrieben.

2.2.3 Berechnungen

Zur Berechnung der Stoffdeposition aus der Atmosphäre auf den Boden wurden die Stoffgehalte der wöchentlichen Proben (mg/l) mit den jeweiligen Niederschlagssummen (l/m^2) multipliziert. Diese Produkte wurden zu Frachten des Stoffeintrags für gewählte Zeitspannen (bspw. Monate) aufsummiert und zu mittleren, mit dem Niederschlag gewichteten Konzentrationen für diese Zeitspanne verrechnet (Gleichung 1).

$$c_j = \Sigma(c_{ij} * N_{ij}) / (\Sigma N_{ij}) \quad i = 1, n; \quad j = \text{Zeitspanne 1, Zeitspanne } n; \quad (1)$$

mit	c_j	mittlere niederschlagsgewichtete Konzentration	(g/l)
	c_i	Konzentration des i - ten Probenahmeintervalls	(g/l)
	N_i	Niederschlagssumme des i - ten Probenahmeintervalls	(l/m^2)
	n	Anzahl Probenahmen	

Um die Deposition von Stoffen in den Baumbestand unter Berücksichtigung partikulär und gasförmig eingetragener Stoffe abzuleiten, werden häufig sogenannte Gesamtdepositionsraten nach dem Verfahren von ULRICH (1988) auf der Basis von Stofffrachten (in Ladungsäquivalenten) über hydrologische Jahre berechnet. Auf die Anwendung dieses Kronenraumbilanzverfahrens musste wegen der kurzen Zeitdauer der Untersuchung und des geringen Datenumfanges verzichtet werden.

3 Ergebnisse

3.1 Niederschlagsmengen

Freiland

Der Freilandniederschlag auf dem Großen Falkenstein, gemessen mit dem bulk-Sammler A, lag im Zeitraum vom 1.9. bis 5.12.2011 bei 247 mm (Tab. 4). Eine um 34 mm geringere Summe lieferte der nur 12 m entfernte Distrometer mit 213 mm. Beim Informationshaus des Nationalparks „Haus zur Wildnis“ (680 m ü. NN) am Fuß des Großen Falkenstein fielen 225 mm und 223 mm, gemessen mit Distrometer bzw. Niederschlagswaage. Diese sehr gute Übereinstimmung wirft die Frage auf, ob der dauerhaft geöffnete bulk-Sammler A auf dem Großen Falkenstein zuviel gemessen hat oder das Distrometer einen Minderbefund aufweist, der bspw. auf die Annullierung von Niederschlagsmesswerten bei hohen Windgeschwindigkeiten (METEOMEDIA 2011) zurückgeführt werden könnte. Ein Indiz für Letzteres ist die Niederschlagssumme auf dem benachbarten Großen Arber (1456 m ü. NN) von 288 mm im selben Zeitraum (DWD 2012), die der Erwartung eines positiven Niederschlagsgradienten zwischen Tief- und Hochlage entspricht. Die Ergebnisse des bulk-Sammlers A werden zudem durch identische Niederschlagssummen des wenige Meter entfernt stehenden Totalisators für die Monate September und Oktober bestätigt (jeweils 190 mm).

Die zeitliche Verteilung ist durch sehr geringe Niederschläge zwischen dem 18.10. und Anfang Dezember gekennzeichnet (< 10 mm), wobei es zwischen den aufgeführten Messstationen (Höhenlagen) keine Unterschiede gibt. Der Monat November, der im langjährigen Mittel (1983 - 2010) Niederschläge von 123 ± 59 mm am Großen Arber und von 112 ± 54 mm an der Station Waldhäuser aufweist, war praktisch niederschlagsfrei (< 1 mm) und damit der trockenste November seit Beginn der Wetteraufzeichnungen (1983 bzw. 1972).

Tab. 4: Niederschlagssummen (mm) im Freiland am Großen Falkenstein (1310 m ü. NN), beim Haus zur Wildnis (680 m ü. NN) und am Großen Arber (1436 m ü. NN). * DWD (2012)

Nr	Intervall		Großer Falkenstein (1310 m ü. NN)				Haus zur Wildnis (680 m ü. NN)		Großer Arber * (1456 m ü. NN)
	von	bis	Distrometer	bulk A	bulk B	wet-only	Distrometer	Waage	
1	01.09.	06.09.	33	38			32	32	31
2	06.09.	13.09.	20	23			22	22	36
3	13.09.	20.09.	32	38			27	25	31
4	20.09.	27.09.	0	0			2	2	1
5	27.09.	04.10.	0	0			0	0	0
6	04.10.	11.10.	42	44	48	45	48	48	62
7	11.10.	18.10.	36	39	39	40	43	43	76
8	18.10.	25.10.	5	4	5	5	3	3	3
9	25.10.	01.11.	3	4	4	4	3	3	3
10	01.11.	08.11.	0	0	0	0	0	0	0
11	08.11.	15.11.	0	0	0	0	0	0	0
12	15.11.	22.11.	0	0	0	0	0	0	0
13	22.11.	28.11.	0	0	0	0	0	0	0
14	28.11.	05.12.	42	57	59	50	45	46	44
Σ	01.09.	05.12.	213	247			225	223	288
Σ	04.10.	05.12.	128	149	154	144	142	142	188

Vorstellungen von der kleinräumigen Variabilität des Niederschlags auf dem Messplatz Großer Falkenstein konnten durch den Aufbau des zweiten bulk-Sammlers und eines wet-only-Sammlers jeweils zu 4.10.2012 gewonnen werden. Die Niederschlagssummen zwischen dem 4.10. und dem 5.12.2012 (Tab. 4) betragen 149 mm (± 5). Der zusätzliche Niederschlag in den bulk-Sammlern gegenüber dem wet-only-Sammler lag bei 4% (A) und 8% (B), entstand jedoch erst im letzten Probenahmeintervall. Daraus lässt sich zumindest für diese drei Monate ableiten, dass die quantitative Bedeutung des Wassereintrags durch vom Wind aus den Kronen der umherstehenden Fichten verdriftete Niederschlagstropfen gering ist.

Fichtenbestand

Mit den bulk-Sammlern unter Fichte am Großen Falkenstein wurden im Untersuchungszeitraum 380 mm (Bestand B), 391 mm (Bestand A) und 735 mm (Bestand C) Niederschlag gemessen (Tab. 5). Die zusätzlichen Wassereinträge gegenüber dem Freiland (bulk A) betragen 132 mm (Bestand B) bis 488 mm (Bestand C). Dagegen wurden in der Waldabteilung Schachtenau (782 m ü. NN) des Forellenbachgebiets im gleichen Zeitraum 139 mm Kronendurchlass unter Fichte gemessen. Auf der benachbarten Freilandstation, die bezüglich der Höhenlage (762 m ü. NN) der Messstation am Fuß des Großen Falkenstein (Haus zur Wildnis) ähnlich ist (vgl. Tab. 2 oben), wurden Niederschläge von 213 mm gemessen, durchaus vergleichbar mit der Niederschlagsmenge auf dem Gipfel des Großen Falkenstein (247 mm).

Tab. 5: Niederschlagssummen (mm) unter Fichte am Großen Falkenstein (1307 m ü. NN) und in der Schachtenau (~800 m ü. NN) des Forellenbachgebietes (im Freiland und unter Fichte)

Intervall Nummer	Intervall		Großer Falkenstein (1300 m ü. NN)			Intervall		Taferlruck Freiland	Weitau Bestand
	von	bis	Bestand A	Bestand B	Bestand C	von	bis		
1	01.09.	06.09.	59	45	62	01.09.	05.09.	0	0
2	06.09.	13.09.	41	48	110	05.09.	12.09.	39	15
3	13.09.	20.09.	50	40	89	12.09.	19.09.	19	6
4	20.09.	27.09.	0	0	0	19.09.	26.09.	5	2
5	27.09.	04.10.	0	0	0	26.09.	03.10.	0	0
6	04.10.	11.10.	86	117	176	03.10.	10.10.	56	44
7	11.10.	18.10.	67	65	146	10.10.	17.10.	50	42
8	18.10.	25.10.	3	3	4	17.10.	24.10.	1	0.4
9	25.10.	01.11.	4	1	4	24.10.	31.10.	4	2
10	01.11.	08.11.	0	0	0	31.10.	07.11.	0	0
11	08.11.	15.11.	0	0	0	07.11.	14.11.	0	0
12	15.11.	22.11.	2	1	10	14.11.	21.11.	0	0
13	22.11.	28.11.	2	1	3	21.11.	28.11.	0	0
14	28.11.	05.12.	76	59	132	28.11.	05.12.	39	27
Σ	01.09.	05.12.	391	380	735	01.09.	05.12.	213	139

Während in der Schachtenau durch die Verdunstung unmittelbar von den Fichtenkronen (74 mm) Verluste von 35% des Freilandniederschlags entstanden sind, betragen die Niederschlagsgewinne am Großen Falkenstein 53% (Bestand B) bis 197% (Bestand C) des dortigen Freilandniederschlags.

Die Untersuchung des zeitlichen Verlaufs ergab, dass nur zwischen dem 18.10. und dem 1.11. Interzeptionsverluste auftraten, wobei die Niederschläge mit maximal 4 mm pro Intervall ge-

ring waren (Abb. 5). Im Allgemeinen jedoch wurden beträchtliche zusätzliche Wassereinträge erreicht. Die Maximalwerte betragen 42 mm (Bestand A), 73 mm (Bestand B) und 131 mm (Bestand C) im Intervall vom 4.10. bis zum 11.10., wobei der Freilandniederschlag nur bei 44 – 48 mm (Tab. 4 s. o.) lag. Zwischen dem 15. und 28.11.2011 wurden ohne jegliches Niederschlagsereignis zwischen 2 mm (Bestand B) und 13 mm (Bestand C) unter Fichte aufgefangen. Die Gewinne in diesen beiden Intervallen resultieren aus dem Auskämmen von kleinen, nicht sedimentierenden Tröpfchen aus horizontal oder den Hang hinauf ziehenden Wolken. Sie vereinigen sich auf den Bestandesoberflächen, insbesondere den Nadeln, zu größeren Tropfen, die dann durch Schwerkraft oder Windbewegung zu Boden fallen.

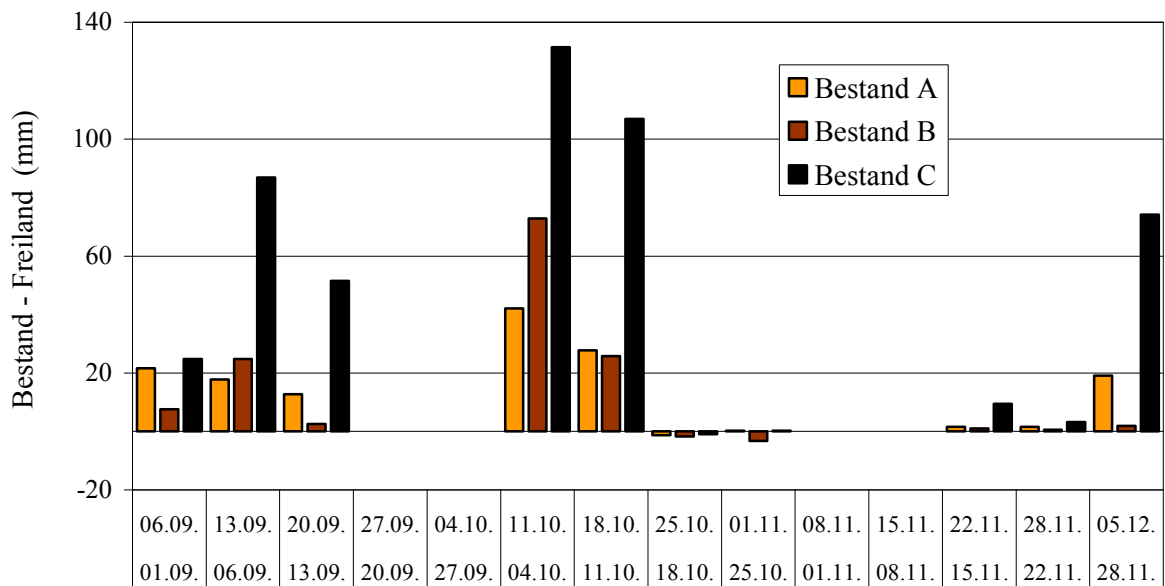


Abb. 5: Netto-Niederschlagsgewinne (mm) unter Fichte (Bestand A, B, C), berechnet als Differenz von Bestandes- zu Freilandniederschlag (bulk A) am Großen Falkenstein (1307 m ü. NN).

Die Unterschiede zwischen den Sammlerpositionen unter Fichte sind beträchtlich und erreichen in der Summe bis 94% (Bestand C zu Bestand A), wobei an der Position C durchgehend die größten Wasservolumina gefunden werden. Ein Grund hierfür könnte die um wenige Meter größere Nähe zur Kammlinie sein, die für eine stärkere Wolkenexposition und –auskämmung der überschirmenden Fichte sorgt, die wiederum abschirmend auf die benachbarten Fichten über den beiden anderen Sammlern wirken könnte.

Eine weitere plausible Erklärung ist die strukturelle Heterogenität des Kronendachs: neben durchschnittlichen oder stark überschirmten stammnahen Positionen treten auch sogenannte Tropfpunkte (HOLWERDA et al. 2006) auf, an denen sich das von Ästen zweier oder mehrerer Bäume ablaufende Wasser konzentriert. ZIEGLER et al. (2008) fanden bei ihren Untersuchungen in einem thailändischen Regenwald, dass dieses Phänomen an etwa 15% der Messplätze, dabei durchaus nicht immer an denselben Messplätzen, aber bei fast allen Niederschlagsereignissen auftritt.

Auch auf Freiflächen im Gipfelbereich des Großen Falkenstein variieren die Niederschlagsmengen kleinräumig, wie bereits BAUMGARTNER (1958) feststellte. Die Kammlage wies im Vergleich zur Verebnungsfläche unmittelbar dahinter geringere Niederschlagsmengen auf,

die Summe aus Niederschlag und horizontalem Wassereintrag, gemessen mit dem sogenannten Nebelfänger nach GRUNOW (1954), war dagegen größer als dort.

Die Ermittlung einer repräsentativen mittleren Stoffdeposition in den Fichtenbestand konnte aufgrund der notwendigen hohen Anzahl an Sammlern und Proben (KIMMINS 1973, LOUSTAU et al. 1992, BEIER and HANSON 1993) nicht Ziel dieser orientierenden Untersuchungen sein. Immerhin jedoch geben die bisher beobachteten starken Unterschiede wertvolle Informationen über die räumliche und zeitliche Variabilität der horizontalen Deposition in diesen exponierten Fichtenbestand.

Nebel

Von den 15 Probenahmeintervallen für Nebel (Tab. 6) waren sieben völlig frei von Niederschlag (1, 2, 6, 7, 9, 10, 11) und zwei mit Niederschlägen kleiner 0.5 mm (12, 13), sodass für die Hälfte der Proben der horizontale Eintragspfad von Nebelwasser ohne Beeinflussung durch Regentropfen maßgeblich war. Vier Intervalle sind als Nebel mit Niederschlag (< 6 mm) und zwei als Nebel mit starken Niederschlägen (16 - 20 mm) zu klassifizieren. Für diese Intervalle ist daher die Situation bezüglich der Eintragspfade bzw. ihrer Anteile unklar.

Tab. 6: Sammelergebnis des Nebelfängers (ml), gefallener Niederschlag (Distrometer, mm) und Windgeschwindigkeit (m/s) am Großen Falkenstein (1311 m ü. NN)

Intervall	von		bis	gesammeltes Wolkenwasser (ml)	~vertikaler Niederschlag (mm)	Windgeschwindigkeit	
						Mittel (m/s)	Max.
1	20.09.2011	10:00	22.09.2011	130	0.0	2.3	5.7
2	22.09.2011	10:00	23.09.2011	20	0.0	2.5	5.1
3	05.10.2011	08:30	07.10.2011	480	3.8	4.7	11.1
4	07.10.2011	10:50	08.10.2011	490	16.0	5.6	8.2
5	11.10.2011	09:45	12.10.2011	950	5.3	6.4	8.9
6	18.10.2011	11:00	19.10.2011	10	0.0	5.4	10.6
7	20.10.2011	10:15	21.10.2011	25	0.0	2.6	4.9
8	25.10.2011	09:00	27.10.2011	60	3.4	4.5	9.4
9	27.10.2011	09:00	28.10.2011	230	0.0	2.5	5.1
10	17.11.2011	10:00	18.11.2011	310	0.0	5.2	8.7
11	26.11.2011	12:45	27.11.2011	150	0.0	5.7	8.8
12	27.11.2011	08:30	28.11.2011	390	0.1	6.0	10.3
13	30.11.2011	13:50	01.12.2011	145	0.3	5.8	9.0
14	02.12.2011	11:30	03.12.2011	390	4.0	4.5	7.9
15	04.12.2011	11:30	05.12.2011	250	19.3	8.2	11.0

Die zeitliche Positionierung und der Niederschlagskontext, in dem die einzelnen Sammelintervalle standen, sind auf den beiden nachfolgenden Abbildungen (Abb. 6) abzulesen. Die ersten beiden Intervalle folgten einer längeren Periode mit fast täglichen Niederschlägen bis 13 mm, die am 20.9. ausklangen. Am Ende der nachfolgenden Trockenperiode fand das dritte Sammelintervall statt, in dem die aufziehende Bewölkung beprobt wurde und erste Niederschläge auftraten. Bis zum 13.10. folgten zwei niederschlagsreiche Intervalle, deren erstes Schnee brachte (Tab. 3 Anhang). Diese drei Intervalle brachten die größten Volumina

(480 bis 950 ml). Die Intervalle sechs und sieben selbst waren niederschlagsfrei, während es davor und danach leicht regnete; die gesammelten Volumina waren gering. Im achten Intervall war das Sammelergebnis bei schwachem Regenfall gering. Das neunte Intervall war der Beginn einer fast niederschlagsfreien Periode bis zum 1.12. (11. - 13. Intervall), in dem durchziehende Wolken und Nebel Sammelvolumina zwischen 145 ml und 390 ml lieferten. Die Intervalle 14 und 15 waren der Abschluss der herbstlichen Trockenperiode, mit zunächst mäßigem, dann ergiebigem (Schnee-)Niederschlag (Tab. 3 Anhang). Das Sammelvolumen war trotz der hohen Windgeschwindigkeiten und der hohen Niederschläge vergleichsweise gering.

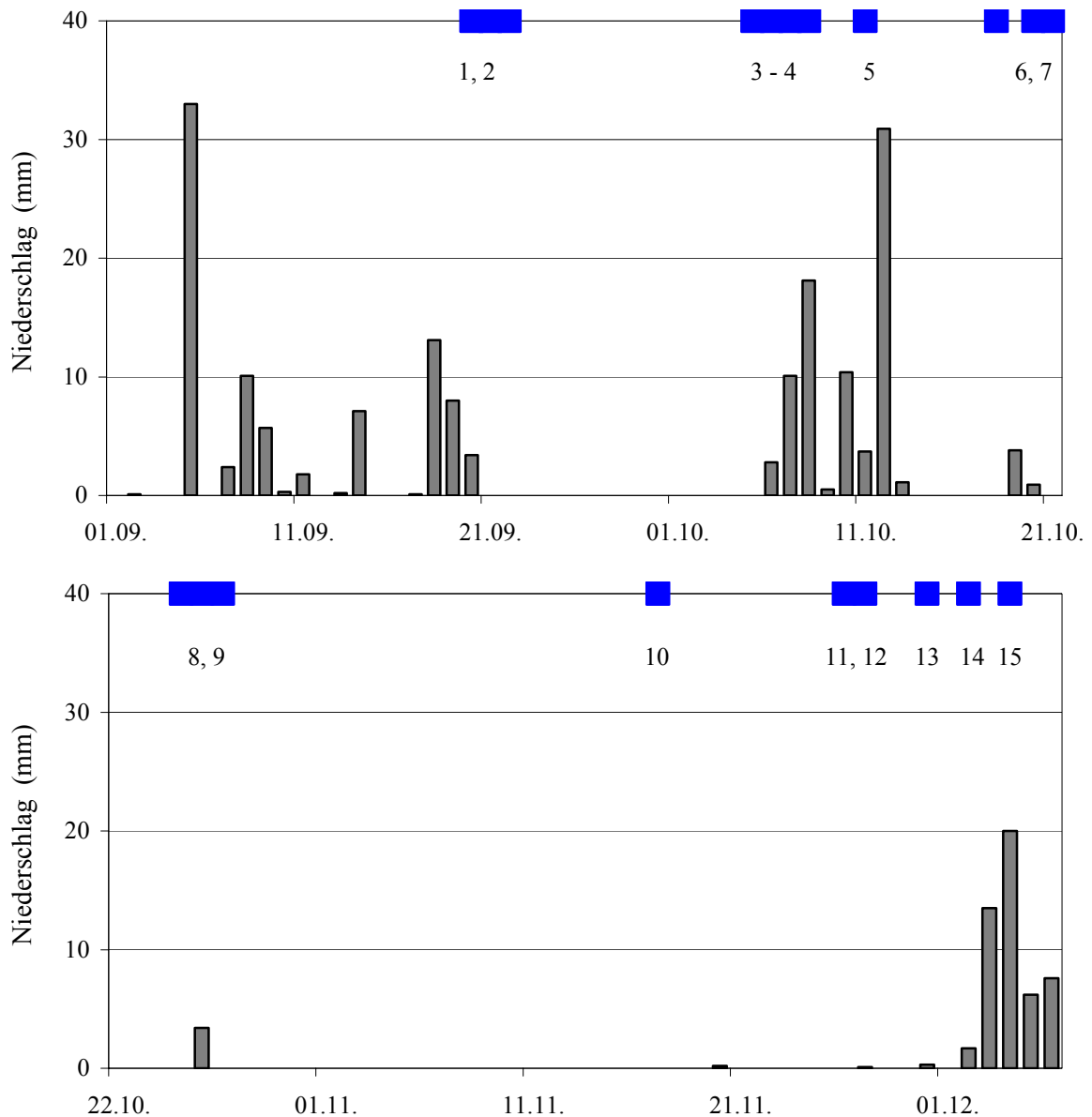


Abb. 6: Sammelintervalle für horizontalen Niederschlag (schwarze Kästchen, nummeriert) und Tagesniederschläge (Distrometer) am Großen Falkenstein.

Eine Abhängigkeit des aufgefangenen Wolkenwasservolumens von der Niederschlagsmenge ist bislang nicht erkennbar: so wurden bei Niederschlägen bis 0.3 mm Wolkenwasservolumina zwischen 20 ml und 390 ml, bei Niederschlägen von 3.4 bis 5.3 mm Volumina zwischen

60 ml und 950 ml erhalten (s. Abb. 5, Anhang). Auch die Gegenüberstellung des Sammelvolumens mit der Art des fallenden Niederschlags (Sprühregen, Regen, Schnee u. a.) lässt keinen Zusammenhang oder ein interpretierbares Muster erkennen (siehe Tab. 3, Anhang).

Dagegen ist die positive Wirkung zunehmender Windgeschwindigkeit auf das Sammelergebnis des Nebelfängers klar erkennbar (Abb. 7 links): je höher der Volumendurchsatz feuchter Luft, desto mehr Nebel- und Wolkentröpfchen können ausgekämmt werden. Deutlicher noch ist der Zusammenhang mit der mittleren Sichtweite in den Nebelstunden der Sammelintervalle, die aus den stündlichen Angaben im Datensatz vom Großen Arber (DWD 2012) berechnet wurde. Das Wasservolumen im Nebelfänger geht im Bereich zwischen 3 m und 326 m mittlerer Sichtweite um zwei Größenordnungen zurück (Abb. 7 rechts). Es ist völlig klar, dass diese Ergebnisse nur qualitativ zu interpretieren sind, weil beispielsweise die Probenahmeintervalle nicht gleich lang sind, die Sichtweite nur die Tageslichtstunden beschreibt, so dass die Nebeldauer unklar ist und sowohl Windgeschwindigkeit als auch Sichtweite im Nebel nur Komponenten oder Schätzer komplexerer Prozesse darstellen.

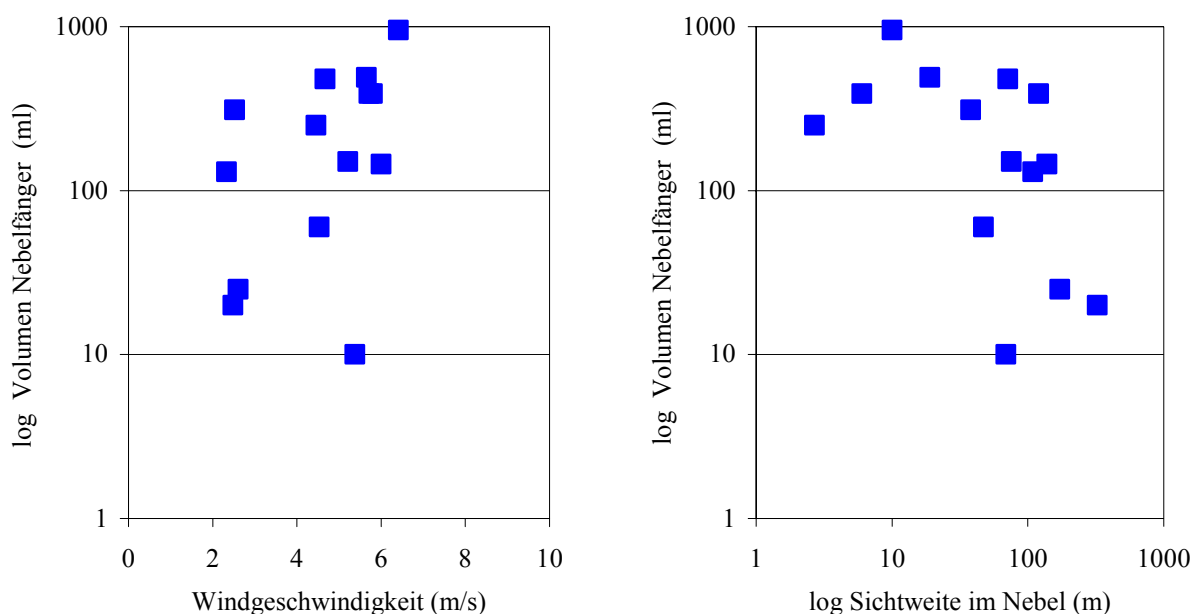


Abb. 7: Logarithmiertes Wasservolumen im Nebelfänger (ml), aufgetragen gegen die mittlere Windgeschwindigkeit am Großen Falkenstein (METEODATA 2012) und gegen die mittlere Sichtweite im Nebel während der Tageslichtstunden am Großen Arber (DWD 2012).

Immerhin wird aus diesen Darstellungen deutlich, dass das Sammelergebnis des Nebelfängers

- ohne Regen genauso hoch wie mit Regen sein kann,
- mit Regen genauso niedrig wie ohne Regen sein kann,
- nicht unmittelbar abhängig von der Höhe des fallenden Niederschlags ist
- deutlich von Parametern des horizontalen Niederschlags beeinflusst ist

Die Gesamtkonstruktion des Nebelfängers scheint daher geeignet, im Wesentlichen horizontalen Niederschlag zu erfassen. Dies bedeutet dann, dass die horizontale, okkulte, feuchten Deposition bzw. deren Variabilität durch die stoffliche Zusammensetzung der mit dem Nebelfänger gesammelten Wasser charakterisiert werden.

3.2 Stoffkonzentrationen

Die nachfolgenden Ausführungen konzentrieren sich auf den reaktiven Stickstoff und seine Komponenten. Auf weitere stoffliche Komponenten wird nur Bezug genommen, wenn sie zur Klärung eines Sachverhalts dienlich oder notwendig sind. Die vollständigen Analyseergebnisse sind tabellarisch im Anhang abgelegt (Tab. 4 – 6).

3.2.1 Freilandniederschlag

Die gemessenen Gesamtstickstoffkonzentrationen (TN_b) variierten von 4.10. bis 5.12. zwischen 0.25 und 2.65 mg N/l (bulk-A), 0.23 und 2.33 mg N/l (bulk-B) und zwischen 0.22 und 2.36 mg N/l (wet-only), wobei die hohen Werte mit sehr niedrigen Niederschlagshöhen einhergingen (Tab. 7). Dies gilt in gleicher Weise für die anorganischen N-Spezies, die in diesem Probenahmeintervall 0.99 bis 1.23 mg NH₄-N/l (bulk-B, bulk-A) und 1.20 bis 1.30 mg NO₃-N/l (bulk-B, bulk-A) erreichten.

Mit Ausnahme dieses Intervalls waren die TN_b-Konzentrationen von bulk-A zum 13.09. mit 0.81 mg/l am höchsten, ebenso die Konzentrationen von NH₄-N (0.40 mg/l) und NO₃-N (0.37 mg/l). Dies war nur ein Drittel der höchsten Konzentrationen, allerdings bei sechsfach höherem Niederschlag.

Bereits der Vergleich der Niederschlagshöhen erbrachte nur geringe Unterschiede zwischen den bulk-Sammlern und dem wet-only-Sammler (siehe Tab. 4 oben). Auch die gewichteten Konzentrationen für die Zeit vom 4.10. bis zum 5.12. von NH₄-N (0.16 bis 0.17 mg/l) und von NO₃-N (0.22 bis 0.24 mg/l) sind praktisch identisch und lassen den Schluss zu, dass die Sedimentation von Stoffen für den Untersuchungszeitraum von geringer Bedeutung war. Beide N-Spezies machen beim wet-only-Sammler 89% des Gesamtstickstoffs aus, bei den bulk-Sammlern jedoch nur 77% (bulk-A) und 83% (bulk-B).

Tab. 7: Konzentrationen von Gesamtstickstoff (TN_b), NH₄-N und NO₃-N (mg/l) im Freilandniederschlag der bulk- (A, B) und wet-only-Sammler am Großen Falkenstein (1310 m ü. NN) und an der Station Taferlruck (762 m ü. NN). Die mittleren Konzentrationen für den Zeitraum vom 4.10. bis 5.12.2011 sind volumengewichtet.

Probenahme	NH ₄ -N (mg/l)			NO ₃ -N (mg/l)			TN _b (mg/l)			Taferlruck (mg/l)			
	bulk-A	bulk-B	wet-only	bulk-A	bulk-B	wet-only	bulk-A	bulk-B	wet-only	NH ₄ -N	NO ₃ -N	TN _b	
06.09.2011	0.07			0.13			0.26			12.09.	0.29	0.25	0.63
13.09.2011	0.40			0.37			0.81			19.09.	0.16	0.22	0.36
20.09.2011	0.13			0.25			0.49			26.09.	0.14	0.32	0.42
11.10.2011	0.19	0.17	0.19	0.28	0.24	0.27	0.43	0.37	0.38	10.10.	0.14	0.21	0.39
18.10.2011	0.09	0.06	0.08	0.18	0.19	0.19	0.25	0.23	0.22	17.10.	0.19	0.30	0.45
25.10.2011	1.23	0.99	1.09	1.30	1.20	1.22	2.65	2.33	2.36	24.10.	0.78	0.77	1.68
01.11.2011	0.09	0.09	0.07	0.24	0.24	0.13	0.48	0.48	0.45	31.10.	0.28	0.20	0.49
05.12.2011	0.12	0.15	0.16	0.17	0.18	0.11	0.62	0.58	0.49	05.12.	0.24	0.18	0.40
4.10. - 5.12.	0.16	0.16	0.17	0.24	0.24	0.22	0.52	0.48	0.44	4.10. - 5.12	0.19	0.23	0.42

Die Interpretation, dass die Differenzen dem gelösten organischen Stickstoff DON zuzuschreiben sind, der durch Reinsertion von den Fichtenkronen in die bulk-Sammler verfrachtet worden ist, wird durch die Mn-, DOC- und K-Konzentrationen gestützt (Tab. 5 Anhang), die verstärkt von Kronenoberflächen bzw. aus Nadeln ausgewaschen werden. Sie sind in den bulk-Sammlern um das 1.4- bis 1.8-fache gegenüber dem wet-only-Sammler erhöht.

Der Vergleich der bulk-Sammler A und B mit dem Freilandniederschlag (bulk) an der Station Taferlruck ist durch den Versatz der Probenahmeintervalle um einen Tag verzerrt, wenn die Konzentrationen einzelner Intervalle betrachtet werden. Allerdings werden die Konzentrationsmaxima an beiden Standorten in derselben Woche gemessen, verbunden jeweils mit sehr geringen Niederschlägen (5 mm bzw. 1 mm). Für den identischen Zeitraum (4.10. bis 5.12.) ergaben sich nicht nur gleiche Niederschlagssummen von 150 mm, sondern auch sehr ähnliche volumengewichtete Konzentrationen bei $\text{NH}_4\text{-N}$ (0.16 vs. 0.19 mg/l) und $\text{NO}_3\text{-N}$ (0.24 vs. 0.23 mg/l). Die Konzentration des Gesamtstickstoff (TN_b) an der Station Taferlruck (0.42 mg/l) liegt dagegen nahe an der Konzentration des wet-only am Großen Falkenstein (0.44 mg/l), zurückzuführen auf die größere Entfernung zum Waldrand und die geringere Windgeschwindigkeit und die damit verbundene geringere Beeinflussung durch Verdriftung.

3.2.2 Bestandesniederschlag

Die gemessenen Gesamtstickstoffkonzentrationen (TN_b) im Bestandesniederschlag am Großen Falkenstein (Tab. 8) variierten von 1.9. bis 5.12. zwischen 0.4 und 18.8 mg/l (A), 0.4 und 22.8 mg/l (B) und zwischen 0.3 und 19.0 mg/l (C), wobei die hohen Werte mit den sehr geringen Niederschlagshöhen zwischen dem 11.10. und 28.11.2011 einhergingen (Tab. 5, s. o.). Bei $\text{NH}_4\text{-N}$ wurden Konzentrationsmaxima zwischen 7.1 mg/l (A) und 8.1 mg/l (B) gemessen, beim $\text{NO}_3\text{-N}$ zwischen 14.0 (A) und 14.6 mg/l (B). Trotz der enormen Variationsbreite zwischen den Sammlern waren die gewichteten Konzentrationen für den Gesamtzeitraum (1.9. bis 5.12.) vergleichsweise sehr eng beieinander. Sie reichten von 0.4 bis 0.5 mg/l bei $\text{NH}_4\text{-N}$, von 0.6 bis 0.8 mg/l bei $\text{NO}_3\text{-N}$ und von 1.2 bis 1.4 mg/l bei TN_b . Die DON-Konzentrationen als Differenz zwischen TN_b und den anorganischen N-Spezies lagen bei 0.10 (A), 0.24 (B) und 0.23 mg/l (C), entsprechend 8%, 19% und 17% des TN_b . Der sehr große Mengenunterschied des Bestandessammlers C zu den beiden anderen Sammlern (Tab. 5, s. o.) findet keine Entsprechung in den Stoffkonzentrationen. Das enorme Filtervermögen dieses Kronenausschnitts betrifft offensichtlich über Wasser eingetragene Stoffe und keine zusätzlich trocken deponierten Anteile, die erhöhend auf die Konzentrationen wirken müssten.

Tab. 8: Konzentrationen von Gesamtstickstoff (TN_b), $\text{NH}_4\text{-N}$ und $\text{NO}_3\text{-N}$ (mg/l) im Bestandesniederschlag unter Fichte am Großen Falkenstein (Sammler A, B, C) und in der Weitau (n = 10 Sammler). Die mittleren Konzentrationen (1.9. bis 5.12.) sind volumengewichtet.

Probenahme	$\text{NH}_4\text{-N}$ (mg/l)			$\text{NO}_3\text{-N}$ (mg/l)			TN_b (mg/l)				Weitau (mg/l)		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C		$\text{NH}_4\text{-N}$	$\text{NO}_3\text{-N}$	TN_b
06.09.2011	0.2	0.2	0.2	0.3	0.3	0.6	0.7	0.9	1.3				
13.09.2011	0.4	0.2	0.2	0.6	0.3	0.3	1.2	0.9	1.0	12.09.2011	1.0	0.7	2.5
20.09.2011	0.2	0.2	0.3	0.6	0.4	0.8	1.0	0.9	1.4	19.09.2011	0.9	0.9	2.6
										26.09.2011	0.7	0.3	1.3
11.10.2011	0.5	0.3	0.3	0.8	0.6	0.8	1.3	1.0	1.1	10.10.2011	0.4	0.8	1.8
18.10.2011	0.1	0.1	0.1	0.3	0.2	0.2	0.4	0.4	0.3	17.10.2011	0.1	0.3	0.9
25.10.2011	1.4	1.5	1.7	1.4	1.4	1.8	2.9	3.0	3.6	24.10.2011	0.8	0.7	1.9
01.11.2011	5.1	8.1	1.7	6.0	14.6	5.4	11.4	22.8	7.5	31.10.2011	0.02	1.4	1.7
22.11.2011	5.6	5.6	3.3	14.0	14.0	8.8	18.6	18.6	11.7				
28.11.2011	7.1	7.1	7.3	12.7	12.7	14.2	18.8	18.8	19.0				
05.12.2011	0.7	0.9	0.5	1.0	1.5	1.0	2.0	2.7	2.0	05.12.2011	0.5	0.8	1.9
01.09. - 05.12	0.5	0.4	0.4	0.8	0.6	0.8	1.4	1.2	1.4	01.09. - 05.12.	0.4	0.7	1.6

Auch ohne Berücksichtigung der Bestandesniederschläge im November war die stoffliche Variabilität in der Weitau (Tab. 8) mit Konzentrationen zwischen 0.89 und 2.57 mg/l (TN_b), 0.02 und 1.0 mg/l (NH₄-N) bzw. 0.3 und 1.4 mg/l (NO₃-N) weit weniger ausgeprägt als am Großen Falkenstein. Die gewichteten Konzentrationen für den Gesamtzeitraum vom 1.9. bis zum 5.12. waren jedoch mit 1.6 mg/l (TN_b) geringfügig höher als am Großen Falkenstein, NH₄-N und NO₃-N dagegen mit 0.4 und 0.7 mg/l im gleichen Bereich. Bemerkenswert sind die mit 0.56 mg/l dreimal höheren DON-Konzentrationen, entsprechend 34% von TN_b im Vergleich zu 14% am Großen Falkenstein.

Die insgesamt große Ähnlichkeit zwischen den N-Konzentrationen in den beiden Beständen lässt bei drei- bis fünfmal höheren Niederschlagsmengen auf eine qualitativ sehr ähnliche Immissionssituation schließen. Die höheren TN_b-Konzentrationen im Bestandesniederschlag der Weitau können auf eine stärkere Verdunstungseinengung und den höheren Anteil länger in den Kronen haftenden Wassers am Kronendurchlass zurückgeführt werden. Dies würde auch die höheren DON-Konzentrationen und die etwa doppelt so hohen Konzentrationen von DOC, K und Mn erklären (Tab. 6 Anhang), die Indikatoren stofflicher Umsetzungen im Kronenraum, insbesondere der Auswaschung aus Assimilationsorganen sind.

3.2.3 Horizontaler Niederschlag

Die gemessenen Gesamtstickstoffkonzentrationen (TN_b) im Nebelwasser am Großen Falkenstein (Tab. 9) variierten von 1.9. bis 5.12. zwischen 1.1 und 34.8 mg/l, die Konzentrationen von NH₄-N zwischen 0.4 bis 16.5 mg/l und von NO₃-N zwischen 0.3 und 21.0 mg/l. Die Mediane lagen bei 6.9 mg/l (TN_b), 3.0 mg/l (NH₄-N) und 3.8 mg/l (NO₃-N). Bei DOC, Cl und SO₄-S sind die Unterschiede zwischen den Maxima und dem Median weitaus geringer.

Tab. 9: Stoffkonzentrationen im Wasser des Nebelfängers, Sammelergebnis des Nebelfängers (ml) und gefallener Niederschlag (Distrometer, mm) am Großen Falkenstein sowie mittlere Sichtweite im Nebel während der Tageslichtstunden am Großen Arber (DWD 2012).

Intervall	von bis		NH ₄ -N	NO ₃ -N	TN _b	Cl	SO ₄ -S	DOC	Menge	Niederschlag (mm)	Sichtweite (m)
			mg/l					ml			
1	20.09.2011 10:00	22.09.2011 10:00	5.4	6.7	11.6	1.3	5.1	4.8	130	0.0	109
2	22.09.2011 10:00	23.09.2011 11:30	12.7	13.1	24.1	0.8	5.4	6.4	20	0.0	326
3	05.10.2011 08:30	07.10.2011 10:50	6.4	8.4	14.0	4.6	3.8	6.9	480	3.8	71
4	07.10.2011 10:50	08.10.2011 09:20	0.7	0.9	1.4	1.4	0.6	1.1	490	16.0	19
5	11.10.2011 09:45	12.10.2011 09:00	2.2	1.2	3.5	0.5	1.3	2.1	950	5.3	10
6	18.10.2011 11:00	19.10.2011 13:00	4.1	3.8	6.9	4.2	1.5	6.7	10	0.0	69
7	20.10.2011 10:15	21.10.2011 08:40	16.5	21.0	34.8	6.4	5.7	8.8	25	0.0	172
8	25.10.2011 09:00	27.10.2011 09:00	3.0	4.2	7.3	1.0	2.6	5.9	60	3.4	47
9	27.10.2011 09:00	28.10.2011 11:00	3.9	2.8	6.8	0.2	2.1	4.0	230	0.0	
10	17.11.2011 10:00	18.11.2011 12:45	3.0	4.3	7.5	2.5	2.3	6.7	310	0.0	38
11	26.11.2011 12:45	27.11.2011 08:30	1.9	3.6	5.6	1.3	2.1	5.7	150	0.0	76
12	27.11.2011 08:30	28.11.2011 11:30	2.9	2.9	5.9	1.6	1.8	4.7	390	0.1	120
13	30.11.2011 13:50	01.12.2011 11:00	4.6	7.1	11.5	1.9	2.7	6.4	145	0.3	138
14	02.12.2011 11:30	03.12.2011 11:30	1.0	1.9	3.2	1.6	0.7	2.3	390	4.0	6
15	04.12.2011 11:30	05.12.2011 11:00	0.4	0.3	1.1	2.1	0.3	1.6	250	19.3	3
Median			3.0	3.8	6.9	1.6	2.1	5.7	230		
Maximum			16.5	21.0	34.8	6.4	5.7	8.8	950		

Trotz der analytischen Unschärfen, die vor allem an den Probenwässern mit geringem Volumen erkennbar sind, lässt sich doch annehmen, dass der gelöste organische Stickstoff (DON) eine vergleichsweise sehr geringe Bedeutung im Nebel- und Wolkenwasser hat.

Die sehr hohen Stickstoffkonzentrationen (TN_b) treten durchwegs in niederschlagsfreien Intervallen (1, 2, 7) oder in Intervallen mit geringen Niederschlägen nach längerer Trockenperiode auf (3, 8, 13). Aus der doppellogarithmischen Auftragung der gemessenen Gesamtstickstoffkonzentrationen (TN_b) auf die gesammelten Nebelwasservolumina (Abb. 7, links) ergibt sich ein schwach signifikanter negativer Zusammenhang, der den Rückgang der Konzentrationen mit zunehmendem Volumen beschreibt. Die Erklärung hierfür liefert der hochsignifikant positive Zusammenhang mit der Sichtweite (Abb. 7, rechts). Wie in Tab. 7 dargestellt, nimmt das aufgesammelte Volumen mit zunehmender Sichtweite ab. Die Sichtweite ist umso größer, je kleiner die Tropfen sind und je weniger dicht die Wolke ist. Die Konzentrationen von Ionen nehmen jedoch mit geringer werdenden Tropfendurchmessern zu (GIERAY et al. 1993, COLLETT et al. 1993, MOORE et al. 2004), weil sich die Inhalte von Kondensationskernen und aufgenommenen Gasen in kleinen Tropfen weniger verdünnen als in größeren Tropfen, möglicherweise aber auch ein Mangel an kondensierbarem Wasserdampf das Tropfenwachstum und die Verdünnung der Konzentration behindert (KLEMM and WRZESINSKY 2007). Die anorganischen Formen, die 99% des Gesamtstickstoffs im Wasser des Nebelfängers ausmachen, verhalten sich in gleicher Weise und mit gleicher Signifikanz, darüber hinaus auch SO_4 -S, DOC, Mg und Mn, nicht aber die anderen Komponenten, beispielsweise Na und Cl (nicht dargestellt).

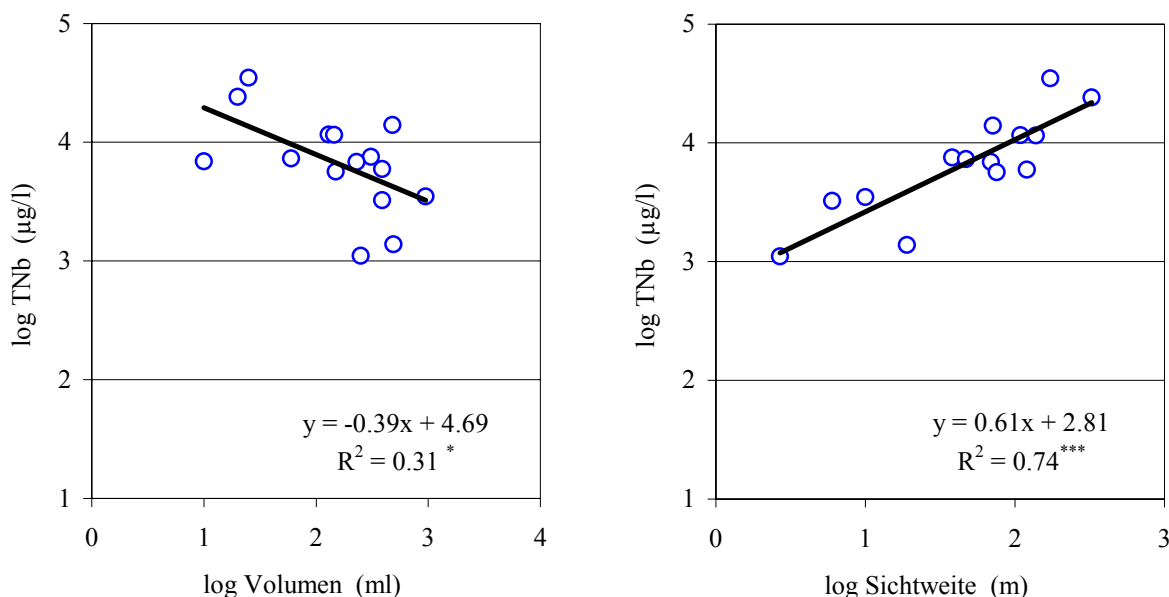


Abb. 8: Doppellogarithmische Auftragung N-Gesamtkonzentration (TN_b) auf des gesammelte Volumen im Nebelfänger (links) und die mittlere Sichtweite im Nebel (rechts) während der Tageslichtstunden am Großen Arber (DWD 2012).

NO_3 -N und NH_4 -N treten im Mittel im Verhältnis 53% zu 47% ($\pm 9\%$) zueinander auf, die Mediane liegen im Verhältnis 56% zu 44% vor. Dieses Verhältnis ist zudem unabhängig von der Sichtweite und damit mutmaßlich von der Tropfengrößenverteilung. Wie Abb. 9 (links)

erkennen lässt, sind $\text{NO}_3\text{-N}$ und $\text{NH}_4\text{-N}$ hochsignifikant ($r^2 = 0.89$) positiv miteinander korreliert und behalten dieses Verhältnis über den ganzen Konzentrationsbereich bei.

$\text{SO}_4\text{-S}$ (Abb. 9 rechts) weist einen genauso engen Zusammenhang mit $\text{NH}_4\text{-N}$ ($r^2 = 0.89$) auf, hat aber, wie der Steigungsfaktor der Ausgleichsgeraden erkennen lässt, nur noch geringe Bedeutung als begleitendes Anion für das Ammoniumion.

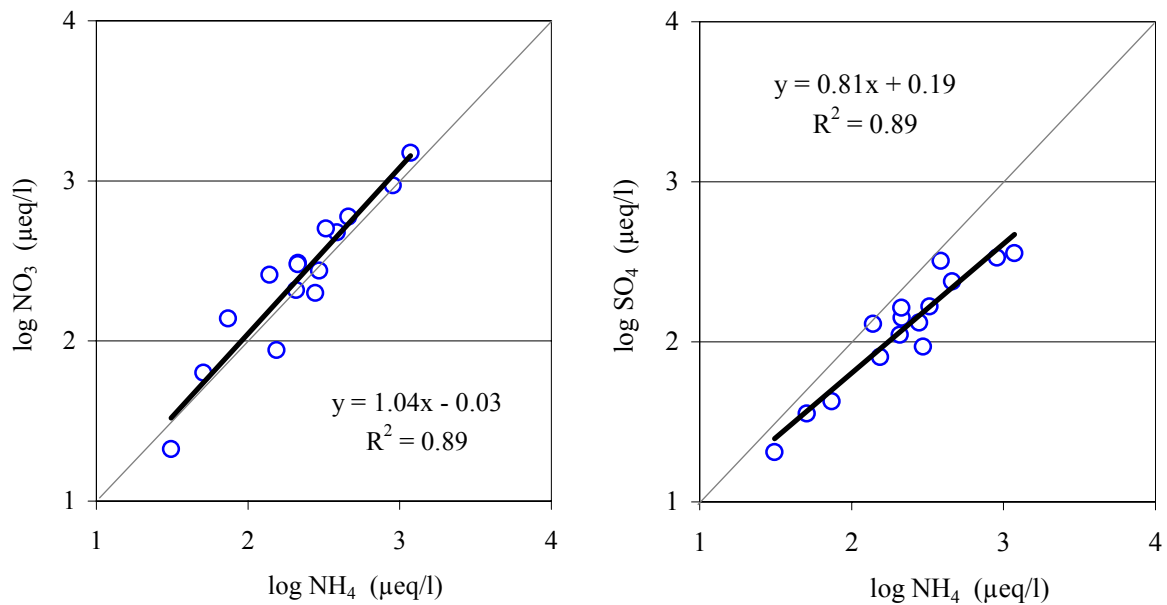


Abb. 9: Doppellogarithmische Auftragung der $\text{NO}_3\text{-}$ und $\text{SO}_4\text{-}$ Konzentrationen auf die $\text{NH}_4\text{-}$ Konzentrationen ($\mu\text{eq/l}$) im Wasser des Nebelfängers am Großen Falkenstein.

Es ist zu erwarten, dass die Variabilität der stofflichen Zusammensetzung und die Stoffeinträge deutlich von der Herkunft der Luftmassen, die zu Nebelniederschlägen führten, geprägt ist. Aufgrund der noch schwachen Datenbasis wurde die Einbeziehung der Windrichtung oder von Trajektorien für Einzelereignisse in die Analyse zurückgestellt.

3.3 Stoffflüsse

3.3.1 Vergleich von Sammlertyp und Sammlerposition

Die Niederschlagsmengen im Freiland (Tab. 10) und die Stoffkonzentrationen (Tab. 7 Kap. 3.2.1) unterschieden sich wenig zwischen den bulk-Sammlern und dem wet-only-Sammler am Großen Falkenstein. Insofern wiesen auch die Stoffflüsse im Vergleichszeitraum vom 4.10. bis 5.12.2011 nur geringe Unterschiede auf (Tab. 10). Gegenüber den bulk-Sammlern sind die Flüsse von $\text{NH}_4\text{-N}$ mit 25 mg/m^2 im wet-only gleich, die Flüsse von $\text{NO}_3\text{-N}$ mit 32 mg/m^2 und von TN_b mit 64 mg/m^2 etwas geringer. Vor allem die DOC- und K-Einträge machen den Einfluss vor allem der benachbarten Fichten (Reinsertion) deutlich. Allerdings sind bereits die Absolutbeträge der Stoffflüsse auf sehr niedrigem Niveau, entsprechend mehr noch die Differenzen untereinander. Für den Vergleich mit den Stoffflüssen mit dem Bestandesniederschlag und den Konzentrationen in horizontal eingetragenen Wasser, der den gesamten Messzeitraum ab 1.9.2011 umfasst, kann daher der Sammler bulk-A verwendet werden.

Tab. 10: Stoffflüsse mit dem Freilandniederschlag am Großen Falkenstein (bulk, wet-only) und am Taferlruok (bulk) im Zeitraum 4.10. bis 5.12.2011.

	K	Na	Ca	Mg	Mn	Cl	$\text{SO}_4\text{-S}$	$\text{NO}_3\text{-N}$	$\text{NH}_4\text{-N}$	TN_b	DOC	H	Menge
	mg/m^2											mmol/m^2	mm
bulk-A	36	22	21	5	1	45	20	36	24	78	162	0.8	149
bulk-B	39	27	21	5	1	46	21	37	24	74	136	1.0	154
wet-only	19	17	20	4	0	38	19	32	25	64	88	0.9	144

Die Niederschlagshöhen der Sammlerpositionen A und B im Bestand waren sich sehr ähnlich, erreichten jedoch nur etwas mehr als die Hälfte von Position C (Tab. 11). Trotz der großen Ähnlichkeiten bei den Konzentrationen ergeben sich aus dem Produkt deutliche Unterschiede. Bei gleicher Niederschlagshöhe wie Position A kennzeichnen höhere DOC, Mn und K-Flüsse in Position B stärkere Umsetzungen im Kronenraum, die von überproportionalen Rückgängen bei den anorganischen N-Formen bei insgesamt geringerem TN_b -Fluss begleitet werden.

Tab. 11: Stoffflüsse mit dem Bestandesniederschlag am Großen Falkenstein vom 1.9. bis 5.12.2011. Bestand A/B: Mittelwert aus Bestand A und B; Bestand C_K : auf die Niederschlagshöhe von Bestand A/B reduzierte Stoffflüsse

	K	Na	Ca	Mg	Mn	Cl	$\text{SO}_4\text{-S}$	$\text{NO}_3\text{-N}$	$\text{NH}_4\text{-N}$	TN_b	DOC	H	Menge
	mg/m^2											mmol/m^2	mm
Bestand A	385	197	222	45	8	359	173	311	194	546	2729	4	391
Bestand B	486	199	233	48	11	378	153	244	137	470	4934	8	380
Bestand C	1631	425	477	95	31	758	344	600	258	1033	8998	7	735
Bestand A/B	436	198	227	46	10	369	163	278	165	508	3832	6	385
Bestand C_K	854	223	250	50	16	397	180	314	135	541	4713	4	385

Korrigiert man die Flüsse an der Sammlerposition C (Bestand C_K) um die mittlere Niederschlagshöhe (Bestand A/B), so wird, trotz aller Ähnlichkeiten mit den anderen Positionen, die große räumliche Variabilität der Depositions- und Umsetzungsbedingungen deutlich. Die K-

und Mn-Flüsse sind doppelt so hoch wie bei Bestand B bei allerdings gleich hohen DOC-Flüssen. Die Flüsse von TN_b (541 mg/m^2) und $NO_3\text{-N}$ (314 mg/m^2) entsprechen Bestand A, die Flüsse von $NH_4\text{-N}$ (135 mg/m^2) und im Ergebnis auch von DON (92 mg/m^2) dagegen Bestand B. Für die Klarheit der weiteren Ausführungen und Darstellungen werden die mittleren Stoffflüsse aus den Positionen A, B und C_K verwendet, die sehr hohen Stoffflüsse von Bestand C als Maxima behandelt.

3.3.2 Stoffflüsse im Freiland und mit dem Bestandesniederschlag

Mit Ausnahme der Woche vom 18. bis 25.10.2011, als geringe Niederschlagshöhen und N-Konzentrationen zu gleich niedrigen Flüssen von etwa 100 g N/ha führten, lagen die N-Flüsse mit dem Bestandesniederschlag ein Mehrfaches über dem Freilandniederschlag (Abb. 10). Sie erreichten ihr Maximum mit 1500 g N/ha in der ersten Dezemberwoche, auf der Sammlerposition C mit 2600 g N/ha . Bemerkenswert sind die im Freiland niederschlagsfreien Wochen in der zweiten Novemberhälfte, in denen die Auskämmung von Nebel zu TN_b -Einträgen von jeweils etwa 200 g N/ha führte. In der Woche vom 20.9. bis zum 27.9., die weder im Freiland noch im Bestand Niederschläge aufwies, lagen die ersten beiden Nebelsammelintervalle. Bei Sichtweiten von 109 m und 326 m waren die TN_b -Konzentrationen mit 12 und 24 mg/l sehr hoch (Tab. 9, Kap. 3.2.3); jedoch waren die Nebelwassereinträge zu gering, um als Kronentraufe abzurinnen, sondern verdunsteten. Insofern, als von einer Wasserspeicherkapazität der Fichtenkronen von zwei bis vier Millimetern (BRONSTAERT et al. 1995) ausgegangen werden kann, sollte bei statischer Betrachtung der Nebelwassereintrag höchstens diese Höhe erreicht haben können. Die im Nebelwasser enthaltenen Stoffe wurden deponiert oder physikalisch und/oder biologisch dem Kronenraum entzogen. Dagegen waren die hohen N-Flüsse mit den ersten Niederschlägen nach diesen Nebelwassereinträgen (4.10. – 11.10.) das Ergebnis durchschnittlicher Konzentrationen bei starken Niederschlägen.

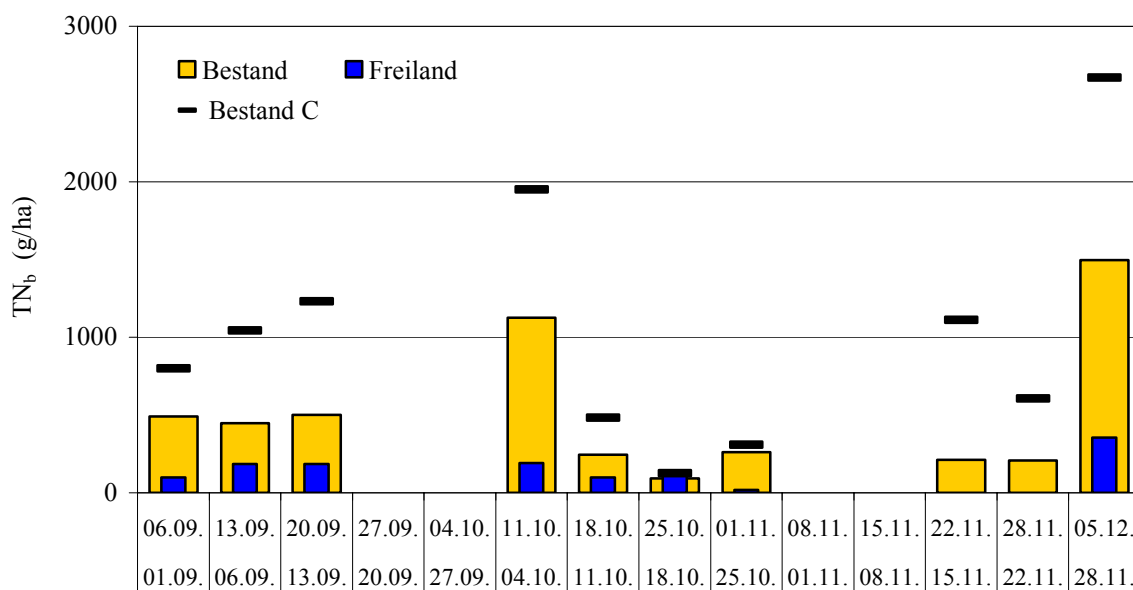


Abb. 10: Stoffflüsse mit dem Freilandniederschlag (bulk A) und dem Bestandesniederschlag am Großen Falkenstein vom 1.9. bis 5.12.2011. Zur Berechnung des Mittelwertes siehe Tab. 11.

Für den gesamten Untersuchungszeitraum summierten sich die N-Einträge im Mittel der Sammlerpositionen auf 5.2 kg/ha (Abb. 11). Dies ist im Vergleich zum Freiland (1.2 kg/ha) mehr als das Vierfache. Im Fichtenbestand Weitau des Forellenbachgebiets betrug der N-Eintrag mit dem Bestandesniederschlag 2.3 kg/ha. Im Verhältnis zum Bestand am Großen Falkenstein entsprechen sich damit N-Eintrag (44%) und Niederschlag (36%).

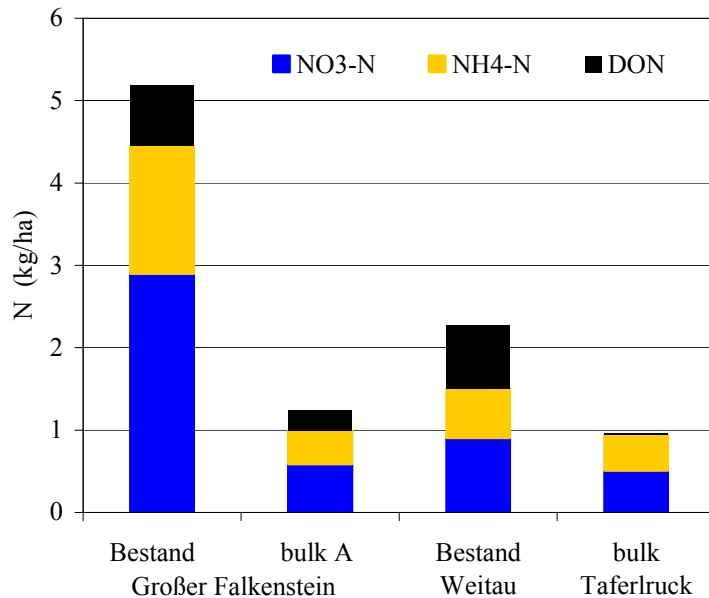


Abb. 11:
Stickstoffdeposition am Großen Falkenstein und im Forellenbachgebiet vom 1.9. bis 5.12.2011.

Während die Anteile des NO₃-N im Bestandesniederschlag mit 30% (Großer Falkenstein) und 27% (Weitau) noch sehr ähnlich sind, unterscheiden sich die Anteile des NH₄-N recht deutlich. Am Großen Falkenstein liegt er bei 56% von TN_b, in der Weitau zu Gunsten des DON nur bei 40%. Tatsächlich ist die DON-Fracht in der Weitau (0.8 kg/ha) sogar größer als am Großen Falkenstein (0.7 kg/ha). Inwieweit höhere Anteile länger in der Krone haftendes Wasser am Kronendurchlass, eine üppigere und aktivere Phyllosphärenflora oder andere Prozesse im tiefer liegenden Bestand dafür verantwortlich sind, kann nicht festgestellt werden.

Die N-Depositionen im Freiland sind am Großen Falkenstein mit 1.2 kg/ha etwas höher als zum Taferlruck (1.0 kg/ha). Damit entsprechen sich N-Eintrag und Niederschlag am Taferlruck (78% bzw. (86%) im Verhältnis zum Großen Falkenstein.

4 Diskussion:

Qualität und Quantität nasser und feuchter Depositionen

Die enorme Bedeutung des Wolken- und Nebelwassereintrags in der Kammlage des Großen Falkenstein (1310 m ü. NN) wurde an den Messergebnissen zum Bestandesniederschlag deutlich, der um 53% bis 197% höher war als im Freiland. Der Mehrniederschlag des Bestandesniederschlags gegenüber dem Freilandniederschlag, der bereits um die Verdunstung von den Oberflächen des Bestandes bereinigt ist und daher den Nettointerzeptionsgewinn darstellt, betraf fast alle Einzelmessungen und wurde in Wochen mit hohen Niederschlägen wie auch in Wochen ohne jeglichen Niederschlag im Freiland festgestellt. Dieses Phänomen wurde im Gipfelbereich des Großen Falkenstein bereits von BAUMGARTNER (1958) gemessen, der statt des natürlichen Rezeptors Fichte Hellmann-Regensammler und Nebelfänger des Typs GRUNOW (1954) einsetzte. Der Mehrniederschlag des Nebelfängers gegenüber dem Regensammler durch Nebel-/Wolkenwassereintrag betrug 843 mm/a im Mittel der Jahre 1954 bis 1957, entsprechend 71% des Freilandniederschlags. Innerhalb weniger hundert Meter vom Gipfelbereich zum Oberhang hin nahm der Nebelwassereintrag auf weniger als 100 mm ab. Für den benachbarten Großen Arber, den höchsten Berg des Bayerischen Waldes, berechnete PAHL (1996) für den Zeitraum 1985 bis 1994 einen Nebelbeitrag von 1180 mm/a in einen Fichtenmodellbestand. Über ein Widerstandsmodell zur Tröpfchendeponation ermittelte ZIMMERMANN (1999) für den Fichtelberg (1213 m ü. NN) im Erzgebirge eine ebenso hohe Nebeldeponation von 1112 mm/a in einen Fichtenbestand. Die für die Station Zinnwald (877 m ü. NN) berechnete Nebeldeponation von nur 165 mm/a unterstreicht die enorme Bedeutung der Höhenlage für den zusätzlichen Wassereintrag durch Wolkeninterzeption.

Insofern, als die eigenen Untersuchungen auf gleicher Höhe wie Großer Arber und Fichtelberg und bezüglich der Niederschlagsmessung im Freiland auf dem gleichen Messplatz in Gipfellage des Großen Falkenstein wie bei BAUMGARTNER (1958) stattfanden, kann davon ausgegangen werden, dass der Niederschlagsgewinn unter den benachbarten Fichten einen plausiblen oberen Schätzwert für den Großen Falkenstein und die Region Innerer Bayerischer Wald darstellt. Dessen ungeachtet zeigte sich an den enormen Unterschieden von einer Sammlerposition zu den beiden anderen Positionen, dass selbst unter diesen insgesamt exponierten Bedingungen kleinräumig sehr große Unterschiede auftreten können. Ein repräsentativer Niederschlag für einen Fichtenbestand kann aus diesen wenigen Messpositionen nicht abgeleitet werden; allerdings ist die Struktur der Hochlagenbestände weitaus lockerer und von Natur aus lückiger als entsprechend alte Tieflagenbestände. Hinzu kommen gehäuft größere Lücken in Vegetationsdecke, die durch Windwurf oder Borkenkäferbefall entstanden sind. Insofern sind Randeffekte im Inneren hier deutlich häufiger anzunehmen als in tieferen Lagen und der Messplatz mit den Sammlerpositionen keine untypische Raumsituation. Aus diesem Grund muss der tatsächliche Wassereintrag pro Flächeneinheit im Mittel größer sein als im Freiland, aber grundsätzlich auch kleiner als unter dem Kronendach von Fichten. Die Bedeutung des horizontalen Wassereintrags wird letztlich auch durch die Ergebnisse aus dem Betrieb des Nebelfängers unterstrichen, der an sieben niederschlagsfreien Tagen Nebel- und Wolkenwasser sammelte. Der Bestandesniederschlag im deutlich dichteren Fichtenbestand im

Forellenbachgebiet (782 m ü. NN) ließ im selben Zeitraum Interzeptionsverluste von 35% des Freilandniederschlags erkennen, ermittelt aus 10 Sammlerpositionen. Dies ist ein Wert, der im benachbarten Fichtenaltbestand Schachtenau in den Jahren 1992 bis 1995 mindestens erreicht wurde (BEUDERT et al. 1997). Wolken- und Nebelwassereintrag dürften in dieser Höhenlage nur selten auftreten und insgesamt eine untergeordnete Rolle spielen. Auch dürfte die räumliche Variabilität des Niederschlags pro Flächeneinheit in diesem dichten Bestand deutlich geringer sein als am Großen Falkenstein.

Die Analyse der 15 Wasserproben aus dem Nebelfänger brachte im Vergleich zum Freiland- und Bestandesniederschlag deutlich höhere Stoffkonzentrationen (Tab. 9, Kap. 3.2.3). Gegenüber den gewichteten mittleren Konzentrationen im Freiland (bulk A, Tab. 5, Anhang) waren sie maximal zwischen achtfach (K, DOC) und 69-, 88- und 100-fach bei TN_b, NO₃-N und NH₄-N angereichert, während die Mediane nur zwischen dreifach (K) und 14-fach (SO₄-S, TN_b), 16-fach (NO₃-N) und 18-fach (NH₄-N) erhöht waren. Dies entspricht Ergebnissen aus den Ardennen mit Anreicherungsfaktoren von 13 (NH₄-N), 12 (NO₃-N) und 15 (SO₄-S) im Wolkenwasser (HERCKES et al. 2002) oder aus dem Fichtelgebirge mit Anreicherungsfaktoren von 18 (NH₄-N), 13 (NO₃-N) und 13 (SO₄-S) im Nebelwasser (WRZESINSKY 2002).

Allerdings war auch die Variabilität der Stoffkonzentrationen sehr groß, die zumindest bei Sulfat und den N-Komponenten auf die mittlere Sichtweite bei Nebel während der Probenahmeintervalle zurückgeführt werden konnte, die als Schätzer für Wolkendichte und Tröpfchengrößenverteilung gelten kann (Abb. 7, Kap. 3.1). In der doppellogarithmischen Auftragung fielen vier Intervalle auf, deren Wettersituation aufgrund der geringen Sichtweite und der Niederschläge mit „Berg in Wolken mit Niederschlag“ zu kennzeichnen ist. Diese vier Intervalle sind durch Niederschlagshöhen > 3.9 mm im Freiland charakterisiert und unterschieden sich von den elf anderen Intervallen ganz grundsätzlich bei den N-Formen (Abb. 12). Sie wiesen mediane Konzentrationen von 2.3 mg/l (TN_b), 1.1 mg/l (NH₄-N) und 0.9 mg/l (NO₃-N) bei geringer Variabilität auf. Die 11 anderen Intervalle sind durch Niederschlagshöhen < 3.9 mm im Freiland charakterisiert, wobei sieben Intervalle völlig niederschlagsfrei waren („Berg in Nebel/Wolken“). Sie waren mit Medianen von 7.5 mg/l (TN_b), 4.1 mg/l (NH₄-N) und 4.3 mg/l (NO₃-N) mehrfach höher und sehr variabel konzentriert, wobei die minimalen Konzentrationen höchstens die Maxima der anderen Gruppe erreichten. Für die weiteren Betrachtungen werden die niederschlagsreichen Intervalle mit dem Arbeitsbegriff „Wolke“ von den anderen Intervallen mit dem Arbeitsbegriff „Nebel“ abgegrenzt.

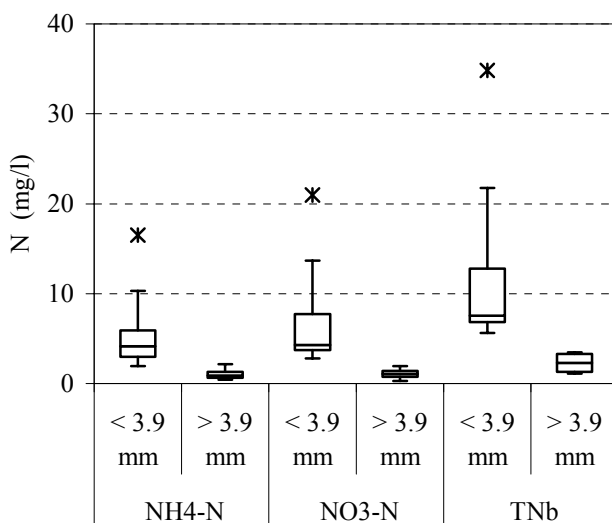


Abb. 12: Boxplots der Konzentrationen von TN_b, NO₃-N und NH₄-N im Wolken- und Nebelwasser am Großen Falkenstein, differenziert nach der Niederschlagshöhe der 15 Sammelintervalle (N < 3.9 mm: n = 11; N > 3.9 mm: n = 4)

Vergleicht man die Nebel- und Wolkenproben mit dem Freiland- und Bestandesniederschlag (Abb. 13), werden die Ähnlichkeiten und Unterschiede in Höhe und Variabilität der Stickstoffkonzentrationen (TN_b) überaus deutlich. Die Konzentrationen im Freilandniederschlag sind nicht hinreichend, die Konzentrationen im Bestandesniederschlag abzubilden. Die Konzentrationen in der Wolke entsprechen bezüglich des Medians dem Bestandesniederschlag, können jedoch dessen hohe Konzentrationen nicht erzeugen. Nur die TN_b -Konzentrationen im Nebel sind geeignet, die hohen und sehr hohen Konzentrationen im Bestandesniederschlag abzubilden. Allerdings kann diese Aussage für den vorliegenden Datensatz nur pauschal gelten, weil die Konzentrationsmaxima im Bestandesniederschlag im November (Tab. 8. Kap. 3.2.2) keine Entsprechung bei den Nebelwässern finden (Tab. 9 Kap. 3.2.3). Dies könnte der mangelnden Erfassungsdichte des Nebels mit drei Sammelintervallen in diesem Zeitraum oder der Konzentrationserhöhung durch Lösungseinengung auf den Nadeloberflächen geschuldet sein.

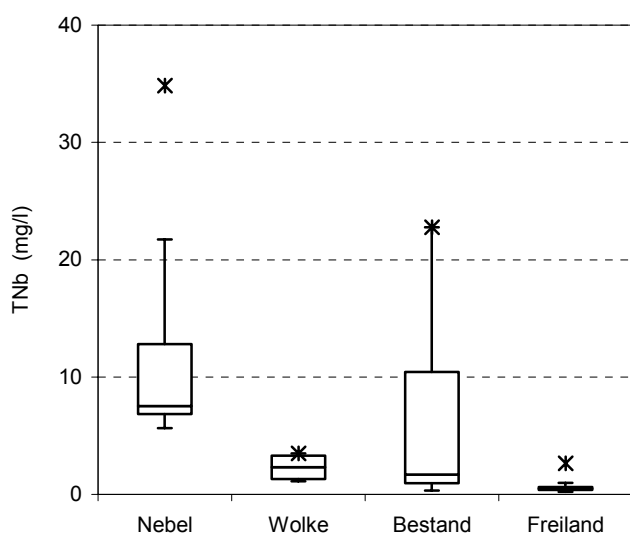


Abb. 13:
Boxplots der TN_b -Konzentrationen in Wolken- und Nebelwasser sowie im Freiland- und Bestandesniederschlag am Großen Falkenstein.

Wahrscheinlicher jedoch erscheint die Annahme, dass der Stickstoff über die trockene Deposition in den Bestand eingebracht worden ist und, in geringen Wasservolumina gelöst, in die Sammler unter den Fichten gelangte. Der deutliche Überhang des NO_3 -N in diesen Lösungen ist ein Indiz dafür, dass der reaktive Stickstoff in oxidiert Form deponiert worden ist. Dies legen auch die NO_x -Konzentrationen am Messturm Schachtenau nahe. Sie wiesen am 26.10. ein erstes Maximum auf ($15 \mu\text{g}/\text{m}^3$) und erreichten zwischen 16.11. bis 26.11. noch höhere Tagesmittelwerte zwischen 18 und $26 \mu\text{g}/\text{m}^3$, wobei Halbstundenmittel bis $46 \mu\text{g}/\text{m}^3$ auftraten (Abb. 6 Anhang). Wie die Ganglinien der mittleren Lufttemperaturen am Messturm Schachtenau und am Messturm Großer Falkenstein nahelegen (Abb. 6 Anhang), herrschten zu diesen Tagen Temperaturinversionen. Die sehr geringen Windgeschwindigkeiten am Messturm Schachtenau ($< 1 \text{ m/s}$, nicht dargestellt) charakterisieren die austauscharme Wetterlage. In dieser Inversionsschicht, die sich an mehreren Tagen bis in die steilen Oberhanglagen ($\sim 1200 \text{ m ü. NN}$) ausdehnte, reicherten sich die Stickoxide an und wurden mit deren Auflösung in höhere Luftschichten transportiert und deponiert. Auch die Konzentrationen des NH_4 -N waren während dieser Inversionswetterlagen im Bestandesniederschlag deutlich erhöht (Tab. 8. Kap. 3.2.2), wenn auch geringer als beim NO_3 -N. Die nur schwache Anreicherung im

Nebelwasser (Tab. 9 Kap. 3.2.3) deutet wie bei den NO_x auf einen anderen Herkunftsraum bzw. auf Einträge über trockene Deposition in den Bestand hin.

Zeitgleiche Angaben zur NH_3 -Immission liegen auch in der weiteren Umgebung nicht vor. Jedoch erbrachten Messungen mit Passivsammlern im Forellenbachgebiet am Messturm Schachtenau (BEUDERT und BREIT 2010) in den Jahren 2003 bis 2005 mittlere NH_3 -Konzentrationen von $1.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$, an einem höher gelegenen Standort (970 m ü. NN) von $0.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$, jeweils ohne ausgeprägte jahreszeitliche Differenzierung. Diese sehr geringe Belastung, die im Bereich zwischen forstwirtschaftlich geprägten Landschaften ($1.0 - 1.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$) und Reinluftgebieten ($0.1 - 0.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$, DÄMMGEN und SUTTON 2001) liegt, ist Folge des geringen Viehbesatzes und der geringen Quellstärke für Ammoniak (BEUDERT und BREIT 2010, RÖSEMANN et al. 2011) in den zu 66% bewaldeten Landkreisen Regen und Freyung-Grafenau. Dies schließt eine kurzfristig erhöhte trockene Deposition von NH_3 oder daraus gebildeten Feinpartikeln nicht aus, dürfte aber ihren Beitrag zur Gesamtdeposition gering halten.

Die Differenzierung der Proben nach Wolken- und Nebelwasser lässt für alle Stoffe bis auf Cl gravierende Unterschiede erkennen (Abb. 14). Die medianen Konzentrationen von Na, Cl, $\text{SO}_4\text{-S}$ und den N-Formen sind im Wolkenwasser relativ einheitlich um Faktoren von 4.1 ($\text{SO}_4\text{-S}$) über 4.4 ($\text{NO}_3\text{-N}$) bis 5.3 ($\text{NH}_4\text{-N}$) gegenüber den gewichteten Mittelwerten im Freilandniederschlag (bulk A) angereichert. Die nach BLEEKER et al. (2000) berechneten höhenabhängigen Anreicherungsfaktoren im Wolkenwasser lauten 3.5 ($\text{SO}_4\text{-S}$), 3.6 ($\text{NO}_3\text{-N}$) und 4.6 ($\text{NH}_4\text{-N}$) und sind damit trotz der kurzen Messperiode einerseits und der dünnen ($n \leq 13$), alten (vor 1995) und räumlich breiten Datenbasis (Nordhalbkugel) zur Ableitung der best-fit-Parameter andererseits bemerkenswert gut. Andererseits erfahren Na und Cl nach dem Verfahren von BLEEKER et al. (2000) nur marginale Konzentrationsveränderungen mit der Meereshöhe, während sie im Wolkenwasser des Großen Falkenstein um das 4.6-fache (Na) bzw. 4.2-fache (Cl) gegenüber dem Freilandniederschlag angereichert sind.

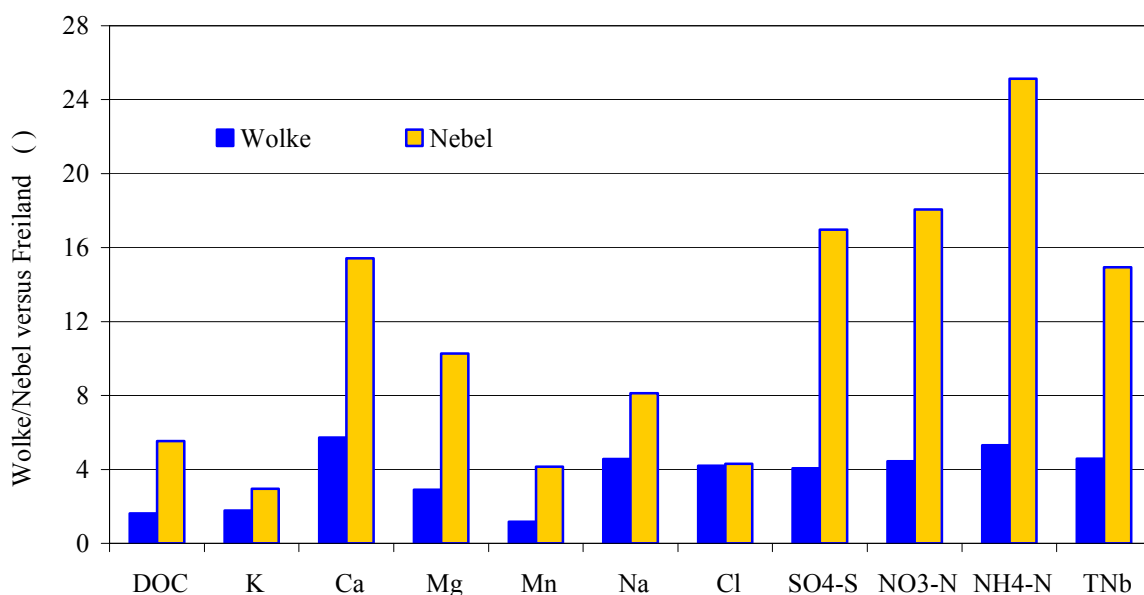


Abb. 14: Mediane Stoffkonzentrationen im Nebel- und Wolkenwasser am Großen Falkenstein (1.9. - 5.12.), dargestellt als Vielfache der gewichteten mittleren Konzentrationen im Freiland.

Die Ähnlichkeit der versauernden und eutrophierenden Komponenten mit Na und Cl, die im Freilandniederschlag annähernd äquimolar (1.0 : 1.1) konzentriert sind, wie dies mit dem Meerwasser als wesentlicher Quelle zu erwarten ist, drängt zur Annahme, dass die N-Verbindungen und SO₄-S dem Ferntransport zuzuordnen sind bzw. auf derselben Trajektorie in gleicher räumlicher und zeitlicher Distanz vom Messort beladen wurden.

Das als Nebel qualifizierte Wasser wies kein derartiges Muster auf und war im Allgemeinen stärker konzentriert als Wolkenwasser. Es erreichte Anreicherungsfaktoren von 17 (SO₄-S), 18 (NH₄-N) bis zu 25 (NH₄-N), bei Mg und Ca 10 bzw. 15, die auf zusätzliche regionale Befrachtung mit diesen Komponenten und ihre Aufnahme und Lösung in sehr kleinen Tropfen zurückzuführen sein dürfte.

Bei der Berechnung der Stoffeinträge mit dem Bestandesniederschlag wurde der starke Effekt der Sammlerposition C auf den Mittelwert wegen des anzunehmenden Randeffektes rechnerisch reduziert. Dem annähernd doppelt so hohen Niederschlag entsprachen die annähernd doppelt so hohen Einträge von N-Verbindungen und Sulfatschwefel. Größere Variabilität wiesen die Konzentrationen von DOC und Mn und der basisch wirkenden Kationen auf, die abgewaschen bzw. im Rahmen der Säurepufferung im Kronenraum und des Leachings der Assimilationsorgane verstärkt mobilisiert werden. Die Stoffflüsse der Position C wurden aus den gewichteten Konzentrationen dieser Position mit der mittleren Niederschlagsmenge der beiden anderen Positionen berechnet, so dass die chemische Eigenheit dieser Position erhalten blieb und in den Mittelwert einfluss. Im Hinblick auf die Bewertung der Stoffeinträge ist dies ein konservatives Vorgehen.

Wie Abb. 15 erkennen lässt, sind die mittleren Flüsse von Mg, Ca, Mn, K und DOC mit dem Bestandesniederschlag um das Sechsfache (Mg) bis Vierzehnfache (DOC) gegenüber dem Eintrag im Freiland erhöht.

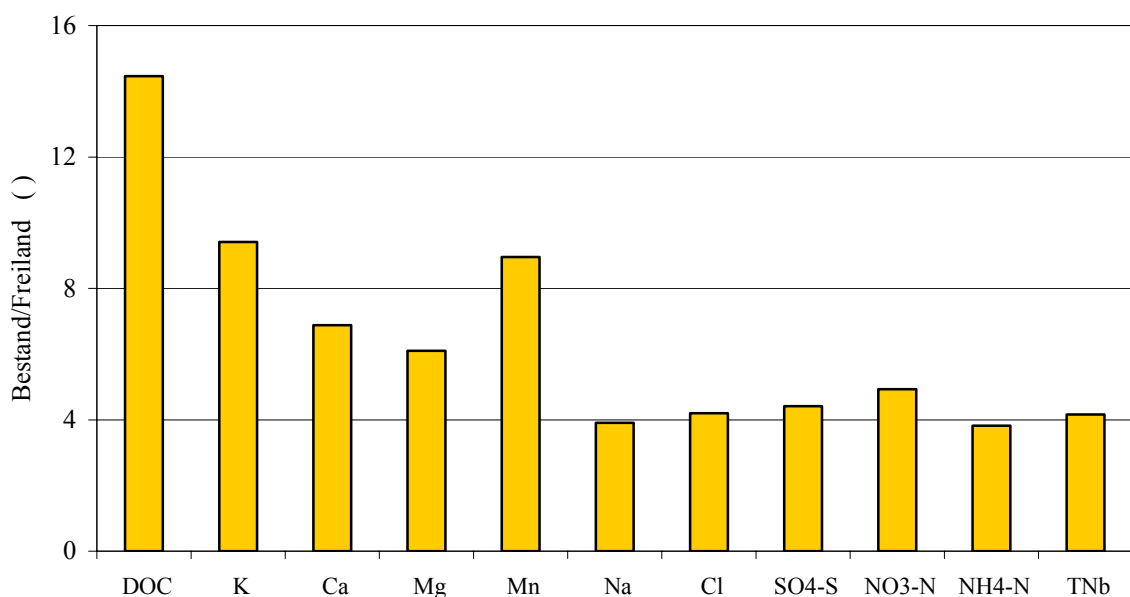


Abb. 15: Stoffflüsse mit dem Bestandesniederschlag am Großen Falkenstein vom 1.9. bis 5.12.2011, dargestellt als Vielfache der entsprechenden Flüsse im Freiland (Anreicherungsfaktoren).

Die Komponenten, die weit überwiegend der Deposition zuzuordnen sind, weisen Anreicherungsfaktoren von 3.8 (NH₄-N) bis 4.9 (NO₃-N) auf. Die stärkere Anreicherung des NO₃-N gegenüber dem NH₄-N ist ein Hinweis auf N-Umsetzungen nach der Deposition in den Kronenraum des Bestandes; im Wolken wie im Nebelwasser war dagegen NH₄-N deutlich stärker angereichert (Abb. 14, siehe oben).

Na und Cl sind wie im Freiland auch in der Kronentraufe annähernd äquimolar (1.0 zu 1.16) konzentriert und im Fluss unter der Krone 3.9- bzw. 4.1-fach gegenüber der Freilanddeposition angereichert. Die große Ähnlichkeit dieser Komponenten ist an jeder der drei Sammlerpositionen vorhanden; die Rechenprozedur für die Mittelwertbildung der Deposition mit dem Bestandesniederschlag beeinflusste lediglich den Betrag, der für die Position C doppelt so hoch wie für die Positionen A und B ist.

Zusammengefasst ergibt sich Bild, dass die Flüsse von Na, Cl und der versauernden und eutrophierenden Komponenten mit dem Bestandesniederschlag gleich stark gegenüber der Deposition im Freiland erhöht sind (Abb. 15). Die Konzentrationen derselben Komponenten sind im Wolkenwasser gegenüber dem Freilandniederschlag ebenfalls gleich stark angereichert (Abb. 14). Daraus lässt sich schließen, dass der Wassergewinn über den Freilandniederschlag hinaus überwiegend Wolkenwasser ist, das aus Tropfen aller Größen unterhalb von Regentropfen bzw. einschließlich der Regentropfen, die durch Wind gegen die Schwerkraft in die Kammlagen verfrachtet wurden, besteht. Die stofflichen Bezüge stehen damit in Übereinstimmung mit den meteorologischen Angaben bei BAUMGARTNER (1958) aus dem Sommerhalbjahr 1955, dass am Gipfel des Großen Falkenstein 69% aller Regen- oder Nebeltage Niederschlag mit Nebel und 21% Regen ohne Nebel waren.

Die Stoffbeiträge des als Nebel bezeichneten stärker angereicherten Tropfenspektrums, das bei BAUMGARTNER (1958) einen Anteil von 10% aller Regen- oder Nebeltage hatte, dürften dagegen deutlich geringer sein.

5 Zusammenfassung: Niederschlag und Stoffeinträge in Fichtenwäldern über nasse und feuchte Deposition

Als räumliche und inhaltliche Ergänzung des Integrierten Monitorings im Forellenbachgebiet und als Beitrag zur flächigen Kartierung der Stoffeinträge aus der Atmosphäre (BUILTJES et al. 2011) wurden ab 1.9.2011 erste orientierende Messungen zur Deposition am Großen Falkenstein (1315 m ü. NN) in den Kammlagen des Nationalparks Bayerischer Wald aufgenommen, wobei die Einträge des reaktiven Stickstoffs (N) im Zentrum der Untersuchungen standen. Zusätzlich zum Standardprogramm der nassen Deposition im Freiland und der Deposition auf den Waldboden über den Kronendurchlass unter Fichte (*Picea abies* L.), der aufgrund der physikalischen und chemischen Interaktionen im Kronen- und Stammraum im Allgemeinen nur einen minimalen Schätzwert der Gesamtdeposition darstellt, wurde Wolken- und Nebelwasser gesammelt und analysiert, um Hinweise über Art und Menge auch der feuchten Deposition zu erhalten, für die synonym die Begriffe okkulte und horizontale Deposition verwendet werden.

Bereits die Niederschlagsmengen deuteten die enorme Bedeutung der Auskämmung von Nebel und Wolken (feuchte Deposition) für den Stoffeintrag aus der Atmosphäre an. Die Sammler unter den Fichtenkronen erbrachten in diesem trockenen Herbst bis zum 5.12.2011 zwischen 380 mm und 735 mm Niederschlag; der Bestandesniederschlag war damit 53% bis 197% höher als der Freilandniederschlag.

Die Mengenunterschiede zwischen wet-only-Sammler einerseits sowie bulk-Sammler, Monatstotalisator und elektronische Verfahren andererseits waren sehr gering. Zusätzliche Einträge von benachbarten Fichten in die bulk-Sammler wurden an den Stickstoffeinträgen ersichtlich: die nasse Deposition (wet-only) betrug im Vergleichszeitraum 88% ($\text{NO}_3\text{-N}$) und 102% ($\text{NH}_4\text{-N}$) der bulk-Sammler, beim gemessenen Gesamtstickstoff (TN_b) jedoch nur 84%. Insofern sind die Einträge im Freiland von 1.2 kg N/ha (bulk) für den gesamten Zeitraum eine geringe Überschätzung des nass deponierten Stickstoffs. An der Talstation des Forellenbachgebietes (762 m ü. NN) betrug die N-Deposition bei geringeren Niederschlägen 1.0 kg/ha.

Die von der Übershirmungssituation abhängige Deposition mit dem Bestandesniederschlag war um das Vier- bis Achtfache höher als im Freiland; sie lag zwischen 5 und 10 kg/ha (TN_b), zwischen 1 und 3 kg/ha bei $\text{NH}_4\text{-N}$ und zwischen 2 und 6 kg/ha bei $\text{NO}_3\text{-N}$. Der gelöste organische Stickstoff (DON) hatte demnach einen Anteil von 8 bis 19%. Beim N-Eintrag mit dem Bestandesniederschlag war der Unterschied zum Fichtenbestand in den Tallagen des Forellenbachgebietes (782 m ü. NN) mit 2.3 kg/ha besonders eindrucklich.

Die Sammlung von Nebel- und Wolkenwasser erfolgte mit einer zylindrischen, mit Teflonfäden bespannten und gegen vertikale Niederschläge abgeschirmten Nebelharfe in 15 meist eintägigen Intervallen, von denen sieben als niederschlagsfrei und vier als niederschlagsarm (< 3.9 mm) klassifiziert wurden. Im Vergleich mit den gewichteten mittleren Konzentrationen im Freilandniederschlag (bulk) waren die Konzentrationen im Nebelsammlerwasser maximal zwischen achtfach (K, DOC) und 69-, 88- und 100-fach bei TN_b , $\text{NO}_3\text{-N}$ und $\text{NH}_4\text{-N}$ angerei-

chert, während die Mediane nur zwischen dreifach (K) und 14-fach (SO₄-S, TN_b), 16-fach (NO₃-N) und 18-fach (NH₄-N) erhöht waren. Ein bemerkenswert enger, hochsignifikanter positiver Zusammenhang lag für die sauren und eutrophierenden Komponenten zur mittleren Sichtweite (gemessen vom Deutschen Wetterdienst am benachbarten Großen Arber, 1436 m ü. NN) während der Nebelstunden vor.

Das in den vier niederschlagsreichen Intervallen gesammelte Wasser (mittlere Sichtweite zwischen drei und 19 Metern, Arbeitsbegriff „Wolkenwasser“) unterschied sich in den Stoffkonzentrationen gravierend von den Wässern, die aus niederschlagsfreien bzw. niederschlagsarmen Intervallen stammten (mittlere Sichtweite > 37 m, Arbeitsbegriff „Nebelwasser“). Wolkenwasser wies mediane Konzentrationen von 2.3 mg/l (TN_b), 1.1 mg/l (NH₄-N) und 0.9 mg/l (NO₃-N) bei geringer Variabilität auf. Nebelwasser dagegen war mit Medianen von 7.5 mg/l (TN_b), 4.1 mg/l (NH₄-N) und 4.3 mg/l (NO₃-N) mehrfach höher und sehr variabel konzentriert. Die Konzentrationsmaxima im Wolkenwasser erreichten höchstens die Konzentrationsminima im Nebelwasser.

Die hohen N-Konzentrationen im Bestandesniederschlag können im Allgemeinen nur mit Nebelwasser abgebildet werden. Für die Konzentrationsmaxima im Bestandesniederschlag im November, insbesondere beim NO₃-N, gab es jedoch keine Entsprechung bei den Nebelwässern. Sie ließen sich auf die trockene Deposition von NO_x zurückführen, die bei Inversionswetterlagen bodennah angereichert wurden und nach Auflösung der Sperrschicht in den Fichtenhochlagenwald transportiert und im Bestandesniederschlag gelöst wurden.

Wolken- und Nebelwasser unterschieden sich bei allen Stoffen gravierend. Nebelwasser (Mediane) wies Anreicherungsfaktoren von 17 (SO₄-S) und 18 (NO₃-N) bis zu 25 (NH₄-N) gegenüber den gewichteten Mittelwerten im Freilandniederschlag (bulk A) auf. Die medianen Konzentrationen von Na, Cl, SO₄-S und den N-Verbindungen im Wolkenwasser dagegen waren relativ einheitlich um Faktoren von 4.1 (SO₄-S) bis 5.3 (NH₄-N) angereichert. Die berechneten Anreicherungsfaktoren (BLEEKER et al. 2000) lagen mit 3.5 (SO₄-S), 3.6 (NO₃-N) und 4.6 (NH₄-N) bemerkenswert nahe an den gemessenen, verkannten aber die gemessene ebenso große Anreicherung bei Na und Cl vollständig.

Na und Cl, die im Kronenraum kaum aufgenommen oder ausgewaschen werden und aufgrund dieses Verhaltens für Kronenraumbilanzen genutzt werden können, waren im Freilandniederschlag, im Bestandesniederschlag und im Wolkenwasser fast äquimolar konzentriert, wie dies mit Meerwasser als wesentlicher Quelle zu erwarten ist. Die Flüsse der sauren und eutrophierenden Komponenten mit dem Bestandesniederschlag waren im gleichen Maß wie Na und Cl gegenüber der Freilanddeposition angereichert. Die Anreicherungsmuster zum Freilandniederschlag sind demnach für Wolkenwasser und Bestandesniederschlag gleich.

Für die Gipfelregion am Großen Falkenstein war der Beitrag der nassen Deposition gering und vergleichbar mit der Deposition in der Tallage des Forellenbachgebiets, die horizontale Deposition jedoch von überragender Bedeutung für die Stickstoffbefruchtung der Fichtenökosysteme. Um diese ersten Informationen zu vertiefen und für weitere Anwendungen nutzen zu können, muss die zeitliche und räumliche Datenbasis verbreitert werden.

Dies sollte erfolgen durch

- zusätzliche Sammler unter Fichte am Gipfel zur Frage der räumlichen Variabilität aufgrund der Kronenstruktur,
- einen zusätzlichen Messplatz unter Fichte in Hanglage zur Frage der räumlichen Variabilität aufgrund der Höhenlage und
- einen zusätzlichen Nebelfänger in Hanglage zur Frage der Höhenabhängigkeit der stofflichen Eigenschaften von Nebel und Wolken.

Hierdurch würden auch weitergehende Analysen zum Einfluss bspw. der Windrichtung auf die Stoffkonzentrationen sinnvoll und aussagekräftig werden. Zusammen mit den im Forellenbachgebiet gewonnenen Ergebnissen könnte ein derart erweitertes Untersuchungsprogramm am Großen Falkenstein einen nützlichen Beitrag für die Modellierung der Stoffdeposition bzw. die Validierung der Modellergebnisse liefern.

Literaturverzeichnis

- 1) BAUMGARTNER, A.: Nebel und Nebelniederschlag als Standortsfaktoren am Großen Falkenstein (Bayerischer Wald). Forstw. Cbl. 77, 257-272 (1958)
- 2) BEIER C., HANSEN K. and GUNDERSEN P.: Spatial variability of throughfall fluxes in a spruce forest. Environ. Pollut. 81:257–267 (1993)
- 3) BEUDERT, B. und BREIT, W.: Zwölf Jahre Integrated Monitoring Programm an der Messstelle Forellenbach im Nationalpark Bayerischer Wald. Fkz. 351 01 012 des Umweltbundesamtes; Nationalparkverwaltung Bayerischer Wald, 307 S., Grafenau (2004).
- 4) BEUDERT, B. und BREIT, W.: Untersuchung regionalisierter Klimaszenarien im Hinblick auf die kleinräumige Wasserhaushaltsmodellierung des Forellenbachgebiets im Klimawandel. Fkz. 351 01 012 des Umweltbundesamtes; Nationalparkverwaltung Bayerischer Wald, Grafenau (2009).
- 5) BEUDERT, B. und BREIT, W.: Untersuchungen zum Stickstoffeintrag und zum wassergebundenen Stickstoffhaushalt des Forellenbachgebiets. Fkz. 351 01 012 des Umweltbundesamtes; Nationalparkverwaltung Bayerischer Wald, Grafenau (2010).
- 6) BEUDERT, B. und BREIT, W.: Hydrochemische Trends und Versauerungsmechanismen im Forellenbachgebiet. Fkz. 351 01 012 des Umweltbundesamtes; Nationalparkverwaltung Bayerischer Wald, Grafenau (2011)
- 7) BEUDERT, B., BREIT, W., DIEOLDER, U. und KAISER, M.: Errichtung und Betrieb einer Messstelle für das ECE - Projekt Integrated Monitoring im Rahmen der ECE - Luftreinhaltekonvention. Abschlussbericht zum F+E - Vorhaben 104 02 643 des Umweltbundesamtes. LWF, Freising (1994).
- 8) BEUDERT, B., BREIT, W., DIEOLDER, U. und KAISER, M.: Integrated Monitoring im Nationalpark Bayerischer Wald. Abschlußbericht zum F+E - Vorhaben 104 02 700 des Umweltbundesamtes. Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft, 265 S., Freising (1997).
- 9) BEUDERT, B.: Überprüfung der analytischen Qualität DOC - reicher Bodenwässer. In: IBK (INSTITUT FÜR BIOKLIMATOLOGIE): Sicherstellung des Integrated Monitoring - Programms an der Messstelle Forellenbach im Bayerischen Wald (Fkz. 351 01 006/03). Göttingen, S. 15 - 28 (1999b).
- 10) BLEEKER, A., DRAIJERS, G. P. J., KLAP, J. M. and VAN JAARSVELD, J. A.: Deposition of Acidifying Components and Base Cations in the Period 1987-1995 in Germany. Study on Behalf and for the Account of Umweltbundesamt, Berlin (FE. Nr. 108 03 081). National Institute of Public Health and the Environment (RIVM). Bilthoven. Report No. 722108027 (2000)
- 11) BLUM, U.: Pilotvorhaben Nebelwasseranalytik auf Stickstoff und Schwermetalle am Falkenstein im Rahmen des Integrated Monitoring Programms an der Station Forellenbach im Nationalpark Bayerischer Wald. Kurzbericht zum Werkvertrag, FKZ 351 01 088 des Umweltbundesamtes, 17 S., Freising (2011)
- 12) BRONSTERT, A., VOLLMER, S. und IHRINGER, J.: Die Bedeutung von Flurbereinigungsmaßnahmen für das Abflussverhalten von Starkniederschlägen in ländlichen Gebieten. Wasser und Boden 47 (9), 29-46 (1995).
- 13) BUILTJES, P., BANZHAF, S., GAUGER, T., HENDRIKS, E., KERSCHBAUMER, A., KOENEN, M., NAGEL, H. - D., HAENEL, H.-D., SCHAAP, M., SCHEUSCHNER, T. und SCHLUTOW, A.: Erfassung, Prognose und Bewertung von Stoffeinträgen und ihren Wirkungen in Deutschland. UBA-Texte 38/2011. <http://www.umweltbundesamt.de> (2011)
- 14) COLLETT, J.L., DAUBE, B.C. and HOFFMANN, M.R.: Spatial and temporal variations in precipitation and cloud interception in the Sierra Nevada of central California. TELLUS, 43 B, 390-400 (1991)
- 15) COLLETT, J.R., OBERHOLZER, B. and STAEHELIN, J.: Cloud chemistry at Mt. Rigi, Switzerland: Dependence on drop size and relationship to precipitation chemistry. Atmos. Environ. 27, 33-42 (1993).
- 16) DÄMMGEN, U. und SUTTON, M.A.: Die Umwelt-Wirkungen von Ammoniak-Emissionen. KTBL-Schrift 401, 14-25 (2001)
- 17) DIEFFENBACH - FRIES, H. and BEUDERT, B. Report on national ICP IM activities in Germany. Fifteen years of monitoring in the Forellenbach area – using mass balances, bioindication, and modelling approaches to detect air pollution effects in a rapidly changing ecosystem: main results. In: KLEEMOLA; S., FORSIUS; M. (eds.). 16th Annual Report 2007, The Finnish Environment, 26/2007: 6381 (2007)
- 18) GAUGER, T., HAENEL, H.-D., RÖSEMANN, C., NAGEL, H. - D., BECKER, R., KRAFT, P., SCHLUTOW, A., SCHÜTZE, G. WEIGELT-KIRCHNER, R. und ANSHELM, F.: Nationale Umsetzung UNECE-Luftreinhaltekonvention (Wirkungen). Teil 2: Wirkungen und Risikoabschätzungen, Critical Loads, Biodiversität, Dynamische Modellierung, Critical Levels Überschreitungen, Materialkorrosion. UBA-Texte 39/08. <http://www.umweltbundesamt.de> (2008)

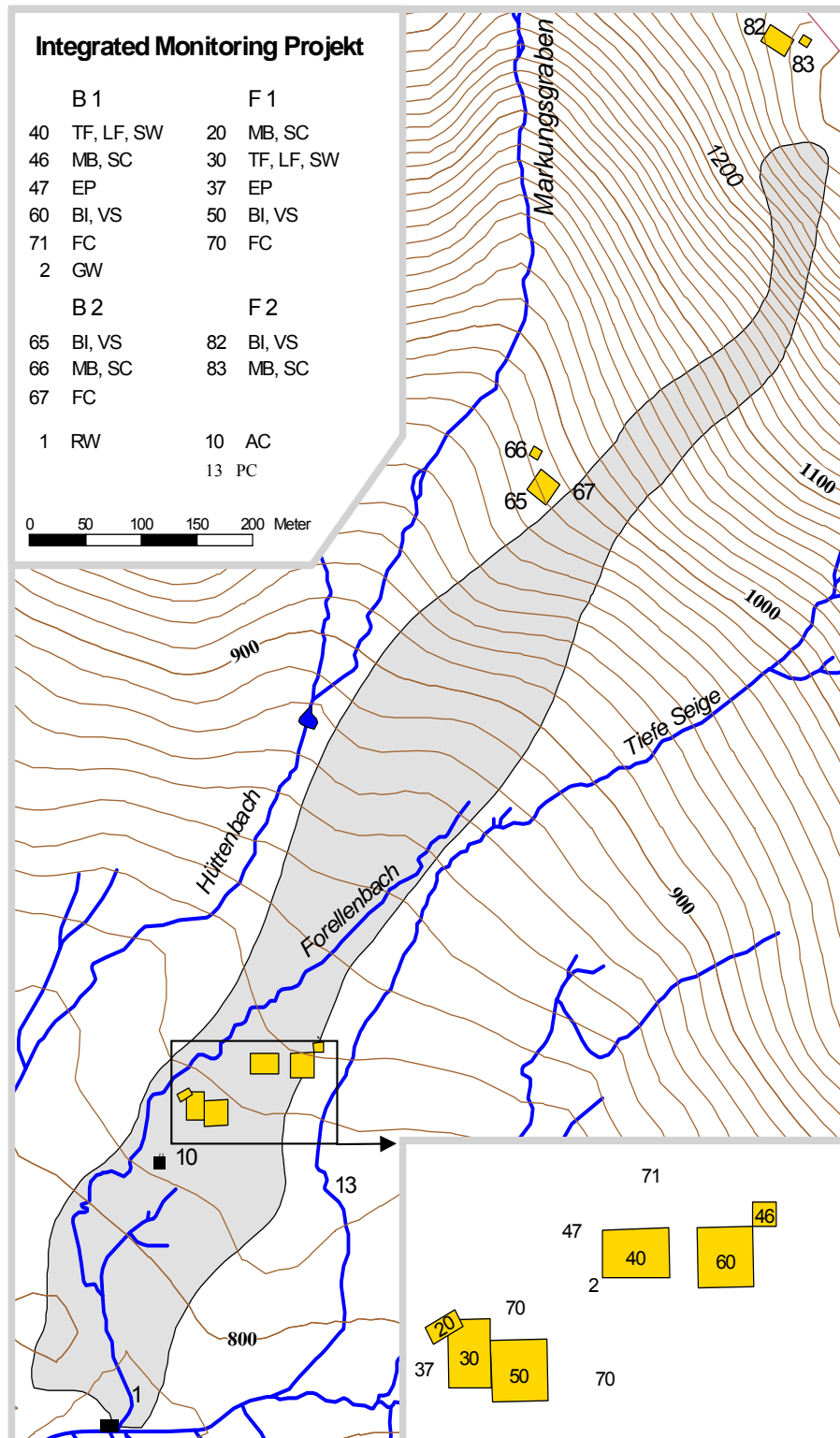
- 19) GIERAY, R., LAMMEL, G. and METZIG, G.: Size dependent single particle and chemical bulk analysis of droplets and interstitial particles in an orographic cloud. *Atmospheric Research* 30 (4), 263-293 (1993)
- 20) GRUNOW, J.: Bedeutung und Erfassung des Nebelniederschlags. *IAHS Info* 36, 402-415 (1954)
- 21) GRUNOW, J.: Vergleichende Messungen des Nebelniederschlags. *IAHS Info* 44, 485-501 (1958)
- 22) HERCKES, P., WENDLING, R., SAURET, N., MIRABEL, P. and WORTHAM, H.: Cloudwater studies at a high elevation site in the Vosges Mountains. *Environ. Poll.* 117, 169-177 (2002)
- 23) HOLWERDA, F., BURKARD, R., EUGSTER, W., SCATENA, F.N., MEESTERS, A.G.C.A. and BRUIJNZEEL, L.A.: Estimating fog deposition at a Puerto Rican elfin cloud forest site: comparison of the water budget and eddy covariance methods. *Hydrological Processes* 20, 2669-2692 (2006)
- 24) KIMMINS, J.P.: Some Statistical Aspects of Sampling Throughfall Precipitation in Nutrient Cycling Studies in British Columbian Coastal Forests. *Ecology*, Vol. 54 (5), 1008-1019 (1973)
- 25) KLEMM, O. and WRZESINSKY, T.: Fog deposition fluxes of water and ions to a mountainous site in Central Europe. *Tellus B* (59), 705-714 (2007)
- 26) KLÖCKING, B., SCHWARZE, R., BEUDERT, B., SUCKOW, F., LASCH, P., BADECK, F. und PFÜTZNER, B.: Auswirkungen des Borkenkäferbefalls auf den Wasser- und Stoffhaushalt zweier Gewässereinzugsgebiete im Nationalpark Bayerischer Wald. *Schriftenreihe Wasserhaushalt und Stoffbilanzen im naturnahen Einzugsgebiet Große Ohe*, Heft 8, 170 S., ISSN 0937-0056, Grafenau (2005).
- 27) KOPÁČEK, J. and HEJZLAR, J.: Water chemistry of surface tributaries of the acidified mountain lakes in the Bohemian Forest. *Silva Gabreta* (2), S. 175 - 197 (1998).
- 28) KOPÁČEK, J. and HRUŠKA, J.: Reconstruction of acidic deposition in the catchments of Plešné and Čertovo lakes (the Bohemian Forest). *Silva Gabreta* 16(3), 149-163 (2010).
- 29) KRAMER, H. und DONG, P. H.: Kronenanalyse für Zuwachsuntersuchungen in immissionsgeschädigten Nadelholzbeständen. *Der Forst und Holzwirt* 40, S. 115-118 (1985)
- 30) LOUSTAU, D., BERBIGIER, P. GRANIER, A. and MOUSSA, F.: Interception loss, throughfall and stemflow in a maritime pine stand. I. Variability of throughfall and stemflow beneath the pine canopy *Journal of Hydrology* 138 (3-4), 449-467 (1992)
- 31) MOORE, K.F., SHERMAN, D.E., REILLY, J.E. and COLLETT, J.L.: Drop size-dependent chemical composition in clouds and fogs. Part I. Observations. *Atmosph. Environment* 38 (10), 1389-1402 (2004)
- 32) OLIVER, B. G., THURMAN, E. M. and MALCOLM, R. L.: The contribution of humic substances to the acidity of coloured natural waters. *Geochim. Cosmochim. Acta* (47), S.2031 - 2035 (1983).
- 33) PAHL, S.: Feuchte Deposition auf Nadelwäldern in den Hochlagen der Mittelgebirge. *DWD-Berichte* 198 (1996)
- 34) RÖSEMANN C., HAENEL, H.-D., PODDEY, E., DÄMMGEN, U., DÖHLER, H., EURICH-MENDEN, B., LAUBACH, P., DIETERLE, M. und OSTERBURG, B.: Berechnung von gas- und partikelförmigen Emissionen aus der deutschen Landwirtschaft 1990 – 2009. *Landbauforschung; Sonderheft* 342 (2011).
- 35) STRAETER, E., WESTBELD, A. and KLEMM, O.: Pollution in coastal fog at Alto Patache, Northern Chile. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 17, 1563-1573 (2010).
- 36) UBA: Manual on methodologies and criteria for mapping Critical Levels & Loads and geographical areas where they are exceeded. *UBA-Texte* 71/96 Berlin (1996).
- 37) UBA: German Informative Inventory Report 2012. <http://iir-de.wikidot.com/explanation-of-key-trends> (2012)
- 38) ULRICH, B.: Rechenweg zur Schätzung der Flüsse in Waldökosystemen - Identifizierung der sie bedingenden Prozesse. *Ber. Forschungszent. Waldökosysteme/Waldsterben*, Reihe A, Bd. 84. Göttingen (1988).
- 39) WRZESINSKY, T.: Direkte Messung und Bewertung des nebelgebundenen Eintrags von Wasser und Spurenstoffen in ein montanes Waldökosystem. *Dissertation, Uni Bayreuth*, 108 S., Bayreuth (2002)
- 40) ZIEGLER, A.D., GIAMBELLUCA, T.W., NULLET, M.A., SUTHERLAND, R.A., TANTASARIN, C., VOGLER, J.B. and NEGISHI, J.N.: Throughfall in an evergreen-dominated forest stand in northern Thailand: Comparison of mobile and stationary methods. *Agric. and Forest Meteorology* 149, 373-384 (2009).
- 41) ZIMMERMANN, L. und ZIMMERMANN, F.: Fog deposition to Norway Spruce stands at high-elevation sites in the Eastern Erzgebirge (Germany). *Journal of Hydrology* (256), 166-175 (2002)
- 42) ZIMMERMANN, L.: Wasser- und Stoffeintrag durch Nebel an Fichtenstandorten in den Hochlagen des Erzgebirges. In: *Einzugsgebiet Große Ohe – 20 Jahre hydrologische Forschung im Nationalpark Bayerischer Wald. Schriftenreihe Wasserhaushalt und Stoffbilanzen im naturnahen Einzugsgebiet Große Ohe*, Heft 7, 49-60, ISSN 0937-0056, Nationalpark Bayerischer Wald, Grafenau (1999).

Anhang

Karte 1: Topographische Karte des Forellenbachgebiets mit den Dauerbeobachtungsflächen und Messstationen sowie den dort durchgeführten Untersuchungsprogrammen (Programmcodes und Flächennummern siehe Tab. 1).....	42
Abb. 1: Bulk-Sammler, wet-only, Monatstotalisator und Distrometer am Großen Falkenstein.....	46
Abb. 2: Depositionssammler unter Fichte am Großen Falkenstein.	46
Abb. 3: Niederschlagshöhen im Freiland (bulk-A) und im Bestand (A, B, C) am Großen Falkenstein.	47
Abb. 4: Gesammeltes Wasservolumen im Nebelfänger (ml) versus Niederschlag (mm) bei 15 Sammelintervallen am Großen Falkenstein.	47
Abb. 5: oben: Tagesmittel (Säulen) und maximale Halbstundenmittel (Striche) der NO _x -Konzentrationen am Messturm Schachtenau (µg/m ³) unten: Lufttemperaturen am Großen Falkenstein (1310 m ü. NN + 20 m) und in der Schachtenau (807 m ü. NN + 51 m).	48
Tab. 1: Größe und Höhenlage der Untersuchungsflächen und Messstationen.....	41
Karte 1: Topographische Karte des Forellenbachgebiets mit den Dauerbeobachtungsflächen und Messstationen sowie den dort durchgeführten Untersuchungsprogrammen (Programmcodes und Flächennummern siehe Tab. 1).....	42
Tab. 2: Waldwachstumskundliche Kennwerte von Fichten und Buche auf der Messfläche für den Bestandesniederschlag in der Weitau (Stand 2011).	43
Tab. 3: Niederschlagssummen am Großen Falkenstein, differenziert nach zusammengefassten SYNOP-Klassen (METEOMEDIA 2012), Tagesstunden mit Nebel und mittlere Sichtweite im Nebel am Großen Arber (DWD 2012) sowie Wasservolumen im Nebelfänger (ml).....	43
Tab. 4: Stoffkonzentrationen im Wasser des Nebelfängers am Großen Falkenstein	44
Tab. 5: Stoffkonzentrationen im Freilandniederschlag am Großen Falkenstein (1310 m ü. NN) und an der Station Taferlruck (762 m ü. NN). Die mittleren Konzentrationen für den Zeitraum vom 4.10. bis 5.12.2011 sind volumengewichtet.	44
Tab. 6: Stoffkonzentrationen im Bestandesniederschlag am Großen Falkenstein (1310 m ü. NN) und in der Weitau (782 m ü. NN). Die Konzentrationen für den Zeitraum vom 1.9. bis 5.12.2011 sind volumengewichtete Mittelwerte.	45

Tab. 1: Größe und Höhenlage der Untersuchungsflächen und Messstationen.

Bestand	Fläche/ Station	Höhe ü. NN (m)	Größe (ha)	Untersuchungsprogramme
Weitau Taferlruck	1	787		Vorfluter (RW)
	2	816		Grundwasser (GW)
	10	807		Luftchemie (AC)
	13	802		Niederschlagsdeposition (PC)
	14	762		Niederschlagsdeposition (PC)
B1 Buche	40	817	0.24	Deposition (TF, SF), Streufall (LF), Bodenwasser (SW)
	46	820	0.04	Bodenmikrobiologie (MB), Bodenchemie (SC)
	47	820		Epiphyten (EP)
	60	820	0.25	Bäume (BI), Vegetation (VS)
	71	820		Nährstoffversorgung (FC)
B2 Buche	65	992	0.25	Bäume (BI), Vegetation (VS)
	66	995	0.04	Bodenmikrobiologie (MB), Bodenchemie (SC)
	67	1010		Nährstoffversorgung (FC)
F1 Fichte	20	813	0.045	Bodenmikrobiologie (MB), Bodenchemie (SC)
	30	813	0.21	Deposition (TF), Streufall (LF), Bodenwasser (SW)
	37	813		Epiphyten (EP) bis 1996
	50	813	0.25	Bäume (BI), Vegetation (VS)
	70	813		Nährstoffversorgung (FC)
F2 Fichte	82	1290	0.25	Bäume (BI), Vegetation (VS) nur 1995
	83	1292	0.045	Bodenmikrobiologie (MB), Bodenchemie (SC)
F4 Fichte	10	782	0.04	Deposition (TF)



Karte 1: Topographische Karte des Forellenbachgebiets mit den Dauerbeobachtungsflächen und Messstationen sowie den dort durchgeführten Untersuchungsprogrammen (Programmcodes und Flächennummern siehe Tab. 1).

Tab. 2: Waldwachstumskundliche Kennwerte von Fichten und Buche auf der Messfläche für den Bestandesniederschlag in der Weitau (Stand 2011).

Art	N/ha	dg (cm)	d100 (cm)	Höhenfunktion	hg (m)	h100 (m)	G/ha (m ²)	V/ha (VfmD)	Mittlere Krone	
									Radius (m)	Fläche (m ²)
Fichte	350	52.0	76.9	Petterson	32.8	38.5	74.4	1097	3.1	35
				logarithmisch	32.7	38.6		1104		
				Messwerte				1099		
Buche	17	26.8		Messwert	21.7		0.94	10	4.3	59

Tab. 3: Niederschlagssummen am Großen Falkenstein, differenziert nach zusammengefassten SY-NOP-Klassen (METEOMEDIA 2012), Tagesstunden mit Nebel und mittlere Sichtweite im Nebel am Großen Arber (DWD 2012) sowie Wasservolumen (WW) im Nebelfänger (ml).

Phase	Sprüh- regen (mm)	Sprühregen mit Regen (mm)	durchgehend Regen (mm)	durchgehend Schneeregen (mm)	Schneefall (mm)	Graupel- schauer (mm)	Tagesstunden mit Nebel (Anzahl)	mittlere Sichtweite (m)	WW (ml)
1							22	109	130
2							4	326	20
3			3.7			0.1	24	71	480
4		0.3	0.4	1.7	14.9	4.8	14	19	490
5	0.3	2.1	2.7				16	10	950
6			0.4				8	69	10
7					0.2		10	172	25
8		0.2	3.2				11	47	60
9									230
10							14	38	310
11							4	76	150
12					0.2		11	120	390
13			0.3				9	138	145
14			0.2		4.5	0.1	9	6	390
15		0.5	18.2	0.1	0.5	0.1	16	3	250
Σ	0.3	3.1	29.1	1.8	20.3	5.1	12.3	85.9	

Tab. 4: Stoffkonzentrationen im Wasser des Nebelfängers am Großen Falkenstein (1310 m ü. NN)

Intervall	K	Na	Ca	Mg	Mn	NH ₄ -N	NO ₃ -N	Cl	SO ₄ -S	DOC	TN _b	Menge	pH	LF	Niederschlag (mm)
	mg/l										ml	μS/cm			
1	0.5	1.2	8.7	0.3	0.03	5.4	6.7	1.3	5.1	4.8	11.6	130	5.5	136	0.0
2	0.4	0.6	7.1	0.2	0.02	12.7	13.1	0.8	5.4	6.4	24.1	20			0.0
3	1.1	3.7	6.4	0.6	0.05	6.4	8.4	4.6	3.8	6.9	14.0	480	5.6	144	3.8
4	0.2	0.9	0.8	0.1	0.01	0.7	0.9	1.4	0.6	1.1	1.4	490	5.7	25	16.0
5	0.3	0.2	0.8	0.1	0.01	2.2	1.2	0.5	1.3	2.1	3.5	950	6.2	32	5.3
6	1.7	2.5	0.4	0.2	0.02	4.1	3.8	4.2	1.5	6.7	6.9	10			0.0
7	1.9	5.9	9.0	1.1	0.07	16.5	21.0	6.4	5.7	8.8	34.8	25			0.0
8	0.7	1.2	3.2	0.3	0.02	3.0	4.2	1.0	2.6	5.9	7.3	60	5.2	37	3.4
9	0.2	0.2	0.4	0.1	0.01	3.9	2.8	0.2	2.1	4.0	6.8	230	4.5	61	0.0
10	1.1	2.0	1.1	0.3	0.03	3.0	4.3	2.5	2.3	6.7	7.5	310	4.0	107	0.0
11	0.5	1.7	0.9	0.3	0.02	1.9	3.6	1.3	2.1	5.7	5.6	150	4.0	92	0.0
12	0.6	1.5	0.5	0.2	0.01	2.9	2.9	1.6	1.8	4.7	5.9	390	4.6	59	0.1
13	0.8	4.0	2.1	0.6	0.02	4.6	7.1	1.9	2.7	6.4	11.5	145	4.7	105	0.3
14	0.7	1.5	0.8	0.1	0.01	1.0	1.9	1.6	0.7	2.3	3.2	390	4.8	36	4.0
15	0.6	1.1	0.4	0.0	0.00	0.4	0.3	2.1	0.3	1.6	1.1	250	5.6	18	19.3
	0.6	1.5	0.9	0.2	0.02	3.0	3.8	1.6	2.1	5.7	6.9	230	5.0	60	

Tab. 5: Stoffkonzentrationen im Freilandniederschlag am Großen Falkenstein (1310 m ü. NN) und an der Station Taferluck (762 m ü. NN). Die mittleren Konzentrationen für den Zeitraum vom 4.10. bis 5.12.2011 sind volumengewichtet.

Großer Falkenstein		K	Na	Ca	Mg	Mn	NH ₄ -N	NO ₃ -N	Cl	SO ₄ -S	DOC	TN _b	Menge	pH	LF
Probenahme	Art	mg/l										mm	μS/cm		
06.09.2011	bulk-A	0.17	0.34	0.12	0.03	0.011	0.07	0.13	0.41	0.11	1.0	0.26	38	5.6	8
13.09.2011	bulk-A	0.32	0.51	0.15	0.05	0.006	0.40	0.37	0.84	0.30	1.7	0.81	23	5.5	11
20.09.2011	bulk-A	0.31	0.18	0.12	0.03	0.005	0.13	0.25	0.27	0.19	1.3	0.49	38	5.2	7
11.10.2011	bulk-A	0.33	0.24	0.12	0.03	0.004	0.19	0.28	0.52	0.18	1.1	0.43	44	5.2	8
	bulk-B	0.26	0.22	0.11	0.03	0.003	0.17	0.24	0.44	0.16	0.6	0.37	48	5.2	8
	wet-only	0.15	0.21	0.13	0.03	0.002	0.19	0.27	0.47	0.18	0.5	0.38	45	5.3	8
18.10.2011	bulk-A	0.15	0.09	0.12	0.03	0.002	0.09	0.18	0.17	0.10	0.5	0.25	39	5.1	5
	bulk-B	0.33	0.23	0.11	0.03	0.003	0.06	0.19	0.20	0.12	0.6	0.23	39	5.1	6
	wet-only	0.06	0.05	0.13	0.03	0.002	0.08	0.19	0.13	0.10	0.3	0.22	40	5.1	5
25.10.2011	bulk-A	0.67	0.52	0.48	0.11	0.016	1.23	1.30	0.99	0.57	3.3	2.65	4	5.2	25
	bulk-B	0.69	0.43	0.43	0.09	0.013	0.99	1.20	0.82	0.54	2.9	2.33	5	5.0	25
	wet-only	0.42	0.49	0.43	0.06	0.009	1.09	1.22	0.82	0.51	2.1	2.36	5	5.4	21
01.11.2011	bulk-A/B	0.58	0.17	0.37	0.09	0.026	0.09	0.24	0.33	0.14	3.8	0.48	4	5.9	7
	wet-only	0.14	0.10	0.13	0.02	0.004	0.07	0.13	0.33	0.14	0.9	0.45	4	5.5	5
05.12.2011	bulk-A	0.17	0.08	0.13	0.02	0.004	0.12	0.17	0.17	0.09	1.1	0.62	57	5.5	6
	bulk-B	0.14	0.08	0.13	0.03	0.004	0.15	0.18	0.20	0.09	1.0	0.58	59	5.3	6
	wet-only	0.15	0.06	0.13	0.03	0.004	0.16	0.11	0.13	0.09	0.8	0.49	50	5.5	5
04.10.2011	bulk-A	0.24	0.14	0.14	0.03	0.004	0.16	0.24	0.30	0.13	1.1	0.52	149	5.3	7
bis	bulk-B	0.26	0.17	0.13	0.03	0.004	0.16	0.24	0.30	0.13	0.9	0.48	154	5.2	7
05.12.2011	wet-only	0.14	0.12	0.14	0.03	0.003	0.17	0.22	0.27	0.13	0.6	0.44	144	5.3	6
Taferluck		K	Na	Ca	Mg	Mn	NH ₄ -N	NO ₃ -N	Cl	SO ₄ -S	DOC	TN _b	Menge	pH	LF
12.09.2011	bulk	0.27	0.41	0.13	0.03	0.004	0.29	0.25	0.58	0.19	0.7	0.63	39	6.0	8
19.09.2011	bulk	0.10	0.15	0.20	0.02	0.005	0.16	0.22	0.17	0.20	0.5	0.36	19	5.6	6
26.09.2011	bulk	0.36	0.43	0.17	0.03	0.007	0.14	0.32	0.53	0.24	0.3	0.42	5	5.2	9
10.10.2011	bulk	0.26	0.35	0.05	0.03	0.007	0.14	0.21	0.58	0.15	0.3	0.39	56	5.4	6
17.10.2011	bulk	0.10	0.46	0.05	0.01	0.001	0.19	0.30	0.34	0.23	0.7	0.45	50	5.1	7
24.10.2011	bulk	0.45	0.59	0.22	0.04	0.009	0.78	0.77	1.03	0.36	1.1	1.68	1	5.6	18
31.10.2011	bulk	0.40	0.77	0.10	0.02	0.008	0.29	0.20	1.05	0.15	1.4	0.49	4	6.1	8
05.12.2011	bulk	0.26	0.18	0.05	0.01	0.004	0.25	0.18	0.24	0.12	0.3	0.39	39	5.7	5
04.10. - 05.12.	bulk	0.21	0.35	0.05	0.02	0.004	0.19	0.23	0.42	0.17	0.4	0.42	150	5.3	6

Tab. 6: Stoffkonzentrationen im Bestandesniederschlag am Großen Falkenstein (1310 m ü. NN) und in der Weitau (782 m ü. NN). Die Konzentrationen für den Zeitraum vom 1.9. bis 5.12.2011 sind volumengewichtete Mittelwerte.

Großer Falkenstein		K	Na	Ca	Mg	Mn	NH ₄ -N	NO ₃ -N	Cl	SO ₄ -S	DOC	TN _b	Menge	pH	LF
Probenahme	Art	mg/l													
		mm													
		μS/cm													
06.09.2011	Bestand A	0.55	0.35	0.36	0.05	0.01	0.21	0.31	0.51	0.11	5.1	0.65	59	5.5	8
	Bestand B	1.39	0.31	0.58	0.08	0.02	0.16	0.28	0.43	0.10	18.1	0.93	45	4.8	18
	Bestand C	2.50	0.54	0.54	0.08	0.03	0.23	0.64	0.69	0.16	16.0	1.28	62	5.1	21
13.09.2011	Bestand A	1.50	0.80	0.54	0.10	0.02	0.40	0.57	1.45	0.43	10.0	1.23	41	5.3	20
	Bestand B	1.47	0.87	0.54	0.10	0.03	0.25	0.27	1.39	0.25	18.6	0.88	48	4.8	21
	Bestand C	2.96	0.97	0.70	0.10	0.05	0.18	0.30	1.44	0.32	20.4	0.95	110	5.4	21
20.09.2011	Bestand A	0.89	0.78	0.38	0.07	0.02	0.24	0.56	0.82	0.31	6.3	1.00	50	5.2	15
	Bestand B	1.36	0.56	0.52	0.10	0.03	0.17	0.35	0.85	0.20	15.9	0.94	40	4.8	19
	Bestand C	3.03	0.76	0.70	0.12	0.05	0.26	0.80	1.02	0.43	16.3	1.38	89	5.1	25
11.10.2011	Bestand A	0.92	0.54	0.58	0.11	0.02	0.50	0.84	1.02	0.42	6.0	1.28	86	4.9	21
	Bestand B	1.22	0.55	0.54	0.11	0.02	0.30	0.58	1.11	0.33	11.1	0.98	117	4.6	23
	Bestand C	1.93	0.54	0.55	0.11	0.03	0.30	0.81	1.07	0.40	8.6	1.11	176	5.0	22
18.10.2011	Bestand A	0.56	0.17	0.18	0.03	0.01	0.13	0.26	0.21	0.22	4.6	0.42	67	5.1	8
	Bestand B	0.61	0.21	0.17	0.03	0.01	0.09	0.18	0.21	0.16	7.1	0.36	65	4.9	10
	Bestand C	1.17	0.22	0.17	0.03	0.01	0.07	0.18	0.21	0.19	6.8	0.33	146	5.3	9
25.10.2011	Bestand A	0.74	0.77	0.31	0.08	0.01	1.39	1.36	1.35	0.62	3.2	2.87	3	5.4	27
	Bestand B	0.63	0.64	0.31	0.10	0.01	1.47	1.44	1.09	0.63	3.3	3.00	3	5.1	37
	Bestand C	0.99	0.76	0.49	0.12	0.03	1.71	1.80	1.29	0.80	4.5	3.58	4	5.0	35
01.11.2011	Bestand A	6.91	1.69	4.10	1.48	0.17	5.11	6.01	4.85	3.89	17.6	11.42	4	5.6	116
	Bestand B	7.74	5.64	11.41	2.94	0.59	8.07	14.60	12.07	9.12	35.6	22.78	1	5.0	120
	Bestand C	11.22	1.78	4.34	1.22	0.26	1.74	5.44	6.75	4.31	27.5	7.51	4	4.6	125
22.11.2011	Bestand A/B	7.24	2.24	11.66	2.60	0.50	5.55	14.03	8.92	7.24	28.0	18.61	2	3.9	267
	Bestand B/A	7.24	2.24	11.66	2.60	0.50	5.55	14.03	8.92	7.24	28.0	18.61	1	3.9	267
	Bestand C	7.70	1.86	6.72	1.55	0.39	3.29	8.76	6.22	4.92	25.2	11.70	10	4.2	170
28.11.2011	Bestand A/B	6.53	3.74	8.19	1.90	0.40	7.10	12.74	10.42	6.20	26.1	18.77	2	4.0	246
	Bestand B/A	6.53	3.74	8.19	1.90	0.40	7.10	12.74	10.42	6.20	26.1	18.77	1	4.0	246
	Bestand C	10.00	3.85	8.48	2.12	0.53	7.27	14.18	10.36	6.92	35.2	18.96	3	4.2	133
05.12.2011	Bestand A	1.02	0.35	0.62	0.12	0.02	0.72	1.04	0.93	0.56	9.3	2.00	76	4.8	25
	Bestand B	1.65	0.56	1.03	0.24	0.05	0.89	1.53	1.51	1.04	12.7	2.67	59	4.4	45
	Bestand C	1.63	0.37	0.55	0.13	0.04	0.53	0.97	0.93	0.55	10.1	2.03	132	4.8	26
1.09. - 5.12.	Bestand A	0.99	0.50	0.57	0.11	0.02	0.50	0.80	0.92	0.44	7.0	1.40	391	5.0	20
	Bestand B	1.28	0.53	0.61	0.13	0.03	0.36	0.64	1.00	0.40	13.0	1.24	380	4.7	24
	Bestand C	2.22	0.58	0.65	0.13	0.04	0.35	0.82	1.03	0.47	12.2	1.40	735	5.0	23
1.09. - 5.12.	Bestand	1.49	0.54	0.61	0.12	0.03	0.40	0.75	0.98	0.44	10.7	1.35	502	4.9	22
	± cv	43%	7%	7%	6%	34%	20%	13%	6%	8%	30%	7%	40%	4%	10%

Weitau

12.09.2011	Bestand	4.63	0.57	0.89	0.23	0.05	0.98	0.67	1.55	0.28	24.8	2.49	15	6.0	34
19.09.2011	Bestand	4.61	0.75	1.05	0.25	0.05	0.92	0.90	1.74	0.21	23.4	2.57	6	5.9	34
26.09.2011	Bestand	2.32	0.45	0.51	0.11	0.03	0.73	0.29	0.81	0.18	14.7	1.26	2	6.2	19
10.10.2011	Bestand	3.58	0.91	0.66	0.18	0.05	0.44	0.83	2.02	0.36	22.1	1.79	44	5.3	28
17.10.2011	Bestand	2.64	0.38	0.54	0.11	0.04	0.14	0.31	0.62	0.39	21.6	0.89	42	5.2	18
24.10.2011	Bestand	2.22	1.25	0.42	0.07	0.02	0.85	0.70	2.27	0.24	12.3	1.85	0	6.2	25
31.10.2011	Bestand	5.71	0.77	1.14	0.33	0.09	0.02	1.44	3.03	0.20	16.4	1.71	2	4.8	37
05.12.2011	Bestand	5.07	0.70	0.91	0.30	0.07	0.47	0.80	2.10	0.24	28.2	1.92	27	5.2	32
1.09. - 5.12.	Bestand	3.75	0.66	0.72	0.19	0.05	0.44	0.65	1.54	0.33	23.3	1.65	138	5.3	27



Abb. 1: Bulk-Sammler, wet-only, Monatstotalisator und Distrometer am Großen Falkenstein.



Abb. 2: Depositionssammler unter Fichte am Großen Falkenstein.

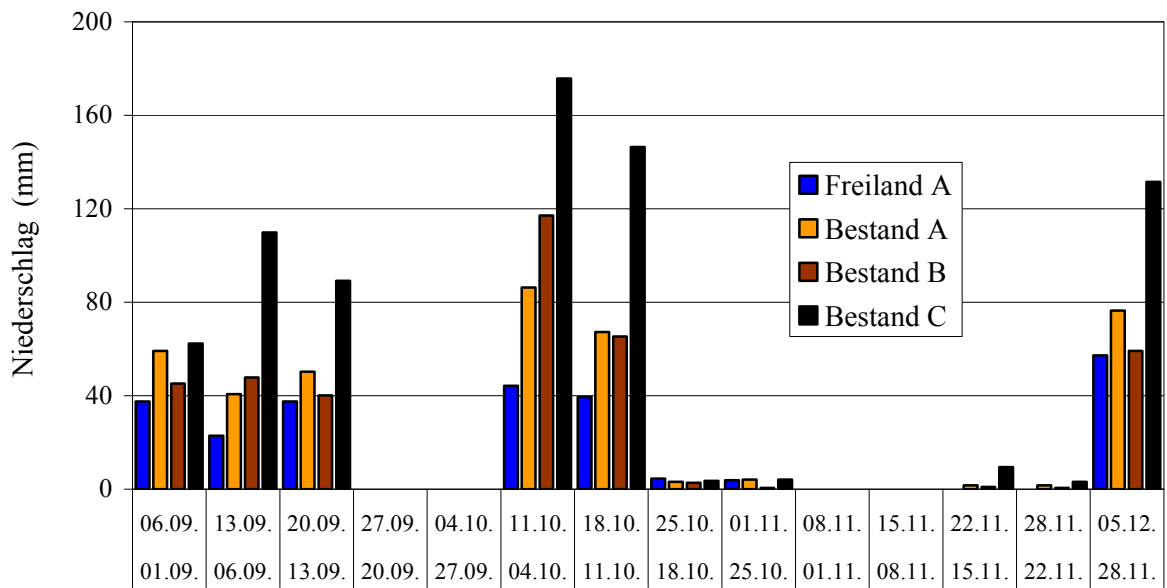


Abb. 3: Niederschlagshöhen im Freiland (bulk-A) und im Bestand (A, B, C) am Großen Falkenstein.

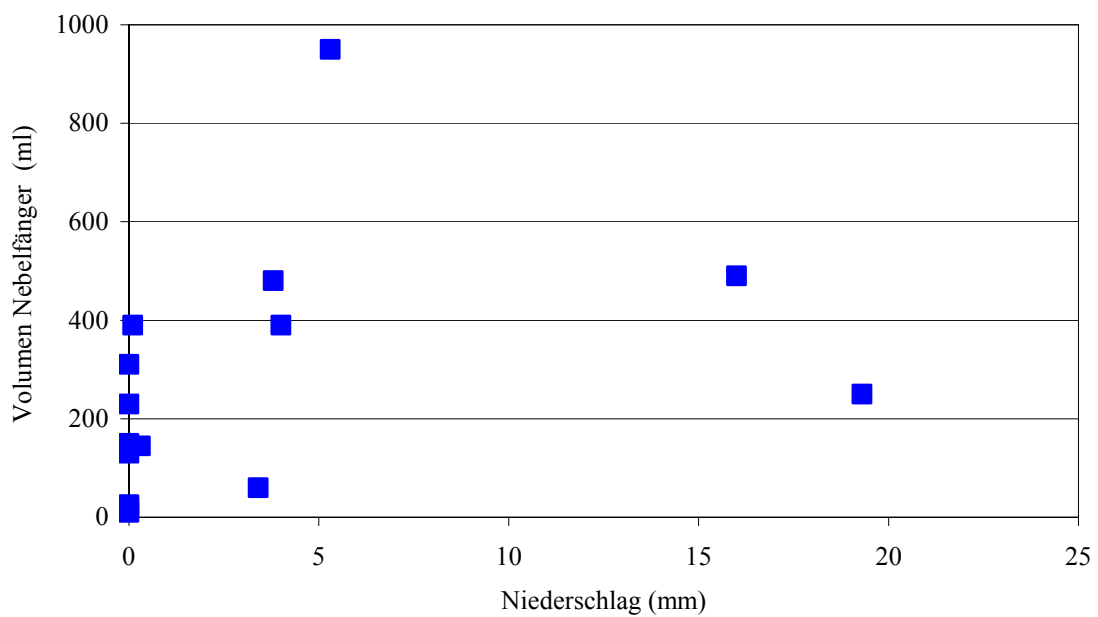


Abb. 4: Gesammeltes Wasservolumen im Nebelfänger (ml) versus Niederschlag (mm) bei 15 Sammelintervallen am Großen Falkenstein.

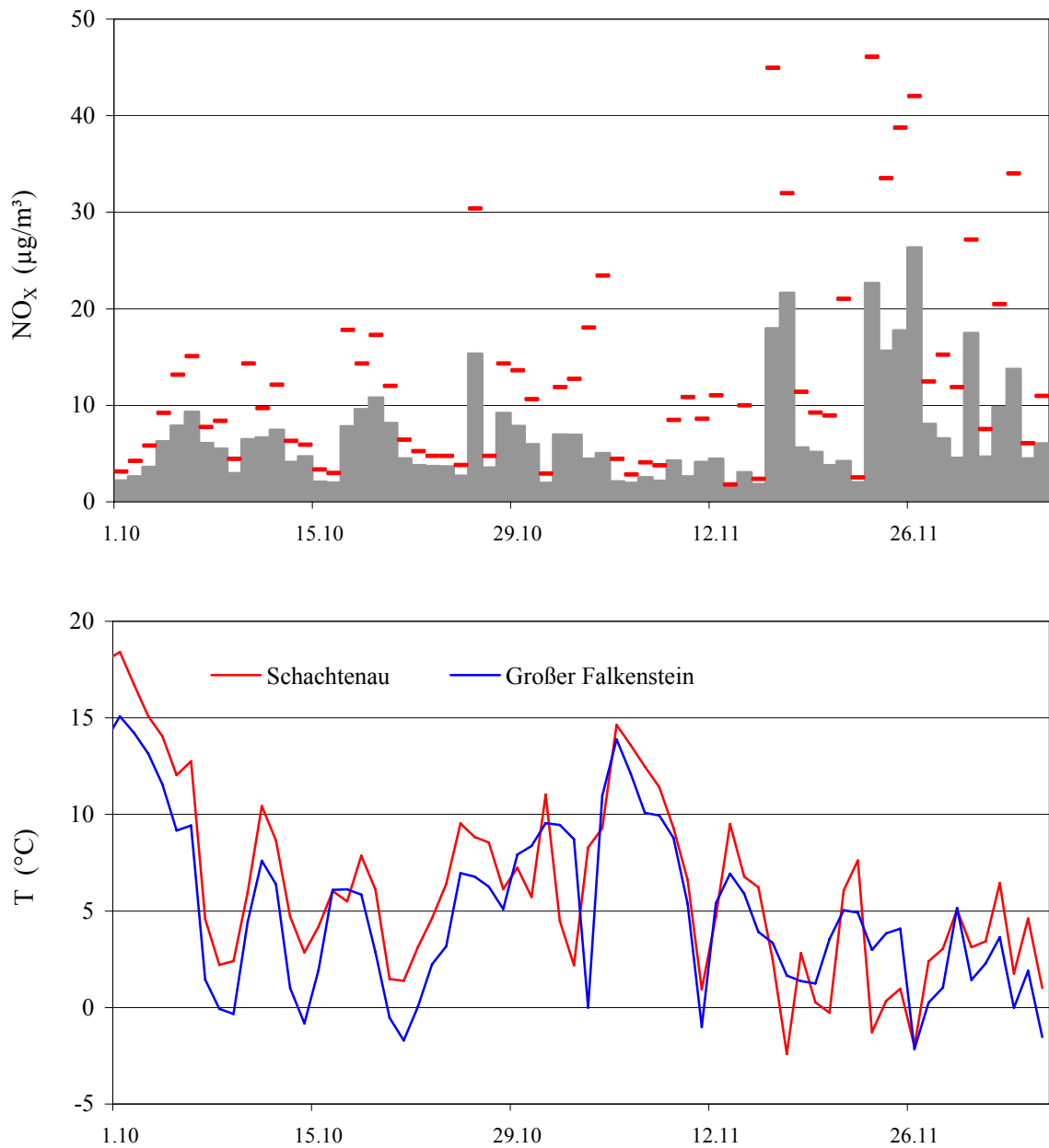


Abb. 5: oben: Tagesmittel (Säulen) und maximale Halbstundenmittel (Striche) der NO_x-Konzentrationen am Messturm Schachtenau (µg/m³)
 unten: Lufttemperaturen am Großen Falkenstein (1310 m ü. NN + 20 m) und in der Schachtenau (807 m ü. NN + 51 m).