

Jahresberichte
des Natur-
wissenschaftlichen
Vereins
in Wuppertal

Heft
40

Wuppertal 1987

ISSN 0547-9789

Zur Filterkapazität und zum Bestandsklima eines Buchen- und Fichtenforstes im Bergischen Land. Teil II (Abschlußbericht)*

WILHELM KUTTLER

Mit 9 Abbildungen und 11 Tabellen

Kurzfassung:

Im Staatswald Burgholz/Solingen (Bergisches Land) wurden Untersuchungen zur Ausfiltration von Luftschadstoffen durch einen Buchen- und Fichtenbestand durchgeführt. Analysiert wurden die „bulk“-Niederschläge auf Calcium, Chlorid, Sulfat, Nitrat und Blei; ferner wurden der pH-Wert und die elektrische Leitfähigkeit der Regenwasserproben bestimmt. Die Messungen erfolgten in einem relativ trockenen (1983) und einem niederschlagsreicheren Sommerhalbjahr (1984). Die Spurenstoffkonzentrationen der niederschlagsärmeren Meßperiode waren höher als die des nasserer Meßzeitraumes. Die Eintragsraten der Spurenstoffe waren hingegen in beiden Meßzeiträumen annähernd gleich hoch.

Die über zwei Jahre durchgeführten Lufttemperatur- und Luftfeuchtigkeitsmessungen im Buchen- und Fichtenbestand sowie im Freiland zeigen die bioklimatischen Wohlfahrtswirkungen der Waldatmosphären, die sich in einer Kappung der Extremwerte der Lufttemperaturen und einer Erhöhung des Feuchtigkeitsangebots dokumentieren.

Summary:

Research on filtration of air pollutants by a beech- and pine-forest has been carried out in the Burgholz/Solingen (Bergisches Land) state forest. The "bulk"-precipitations were analysed referring to their calcium, chloride, sulphate, nitrate and lead contents. Furthermore the pH-value and the electrical conductivity of the rainwater samples were calculated. These measurements were made in a relatively dry summer half-year (1983) and in one with higher precipitation (1984). Airborne element concentrations of the low precipitation measuring period were higher than those of the wetter period whereas the precipitation rates of the airborne elements in both measuring periods had nearly the same values.

The measurements of air temperature and air humidity carried out during the two years in the beech- and pine-forest as well as in the free area show the bioclimatically beneficial effects of the forest atmosphere, which are documented in a cutting of air temperature extremes and an increase in humidity offer.

1. Einleitung

Im Zeitraum von 1983 bis 1985 wurden im Staatswald Burgholz (Solingen, Bergisches Land) Messungen zur Filterwirksamkeit eines Fichten- (*Picea abies*) und eines Buchenforstes (*Fagus sylvatica*) hinsichtlich Luftverunreinigungen durchgeführt. Ergänzend wurden die Lufttemperaturen und die relativen Luftfeuchtigkeiten in Wetterhütten mittels Thermogrographen erfaßt.

* Herrn Prof. Dr. rer. nat. Detlef Schreiber, Geographisches Institut der Ruhr-Universität Bochum, mit herzlichem Gruß zum 60. Geburtstag gewidmet.

Die auf trockenem und nassem Wege aus der Luft entfernten Spurenstoffe wurden im Freiland sowie unter den Kronendächern von Buche und Fichte mit „bulk“-Depositionssammlern aufgefangen und auf pH-Wert, elektrische Leitfähigkeit, weiter auf die Spurenstoffe Calcium, Sulfat, Chlorid, Nitrat und Blei untersucht.

Aus technischen Gründen wurden diese Arbeiten ausschließlich in der warmen Jahreszeit, und zwar von April bis Oktober 1983 sowie von April bis November 1984 durchgeführt. Die Lufttemperatur- und die Luftfeuchtigkeitsmessungen umfaßten hingegen den Zeitraum April 1983 bis März 1985.

Eine erste Darstellung von Teilergebnissen über den Berichtszeitraum April bis Oktober 1983 erfolgte als Teil I in Heft 37 der Jahresberichte des Naturwissenschaftlichen Vereins in Wuppertal (KUTTLER 1984). Dort wurden auch ausführlich die angewandten Meß-, Analyse- und Berechnungsverfahren erläutert, so daß an dieser Stelle mit Verweis auf die bereits genannte Quelle darauf verzichtet werden kann.

2. Ergebnisse

2.1 Niederschlagsmessungen

2.1.1 Freiland- und Bestandsniederschläge

Der den Waldboden erreichende Niederschlag setzt sich zusammen aus dem **Kronendurchlaß**, der durch Lücken im Blätterdach unbeeinflusst am Waldboden auftritt, der **Kronentraufe**, demjenigen Niederschlagswasser, welches von den Blättern und Zweigen abtropft, und dem **Stammabfluß**, jenem am Stamm abfließenden Wasser, das insbesondere bei steilstehenden Ästen und glatter Borke große Mengen am Fußbereich erreichen kann.

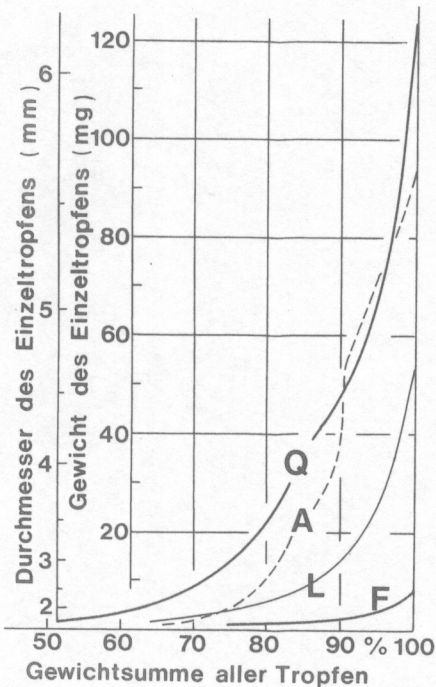


Abb. 1: Spektrale Tropfenverteilung in einem Eichen (Q)-, Tannen (A)- und Lärchen (L)-Stangenholz im Vergleich zum Freiland (F) (nach OVINGTON 1954 aus GEIGER 1961).

(Die Problematik der Berechnung und Messung des Stammabflusses, der für diese Untersuchung nicht ermittelt wurde, ist im Teil I, KUTTLER 1984 näher beschrieben.)

Bevor jedoch der Niederschlag am Waldboden anlangt, wird ein Teil davon zur Kronenbenetzung verbraucht. Der Kronenbenetzungsgrad ist von Baumart zu Baumart unterschiedlich groß. Bei Nadelbäumen erreicht dieser, von GEIGER „Speicherwert“ genannt, 2–3 mm, bei Laubbäumen ca. 1 mm (GEIGER 1961; HÖPPE & MAYER 1983). Niederschlagshöhen von 1–3 mm erreichen somit, insbesondere wenn es sich um kleine, langsam fallende Tropfen handelt, den Waldboden nur sehr selten.

Zusammenfassend bezeichnet man die Benetzungs- und Verdunstungsverluste im Wald als „Niederschlagsrückhaltung bzw. Interception“ (GEIGER 1961).

Beim Passieren des Blätterdaches verändert sich nicht nur die Niederschlagsmenge, sondern auch das Größen- und Gewichtsspektrum der Regentropfen, wie dies OVINGTON (1954 in GEIGER 1961) für verschiedene Baumarten festgestellt hat (Abb. 1). Während nach seinen Messungen im Freiland 90% der Gewichtssumme aller Tropfen einen Durchmesser von unter 2 mm haben, schnell dieser Wert in einem Eichenwald z. B. auf 4,5 mm hoch. Tannen- und Lärchenwälder erreichen Werte, die zwischen denen des Freilandes und denen des Eichenwaldes liegen. Die Kenntnis der durch die Blätter vergrößerten Tropfen stellt für leicht abspülbare Waldböden eine wichtige Größe im Hinblick auf die Abschätzung der Erosionsanfälligkeit dar.

Neben der unterschiedlichen Größenverteilung der Tropfen spielt bei Messungen von Niederschlägen auch deren räumliche Verteilung eine ausschlaggebende Rolle. Diese kann im Vergleich zum Freiland aufgrund eines unterschiedlichen Kronenschlusses und Bestandsaufbaus sehr heterogen sein.

Dies muß bei Niederschlagsmessungen im Wald für die Standortwahl von Niederschlagsmessern beachtet werden, insbesondere dann, wenn normale HELLMANN-Regenmesser – wie sie in der vorliegenden Untersuchung verwendet wurden – zum Einsatz kommen. Da die beiden Waldflächen, in denen die hier beschriebenen Messungen durchgeführt wurden, nur eine relativ geringe Größe aufwiesen, wurden je drei Standorte unter Buche

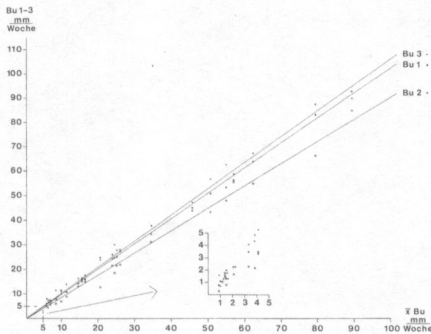


Abb. 2: Zusammenhang zwischen den Einzelwerten der Kronendurchlaßniederschläge dreier Standorte unter Buche (Bu 1–3) und dem Buchenbestandsmittel im Burgholz/Solingen (April bis November 1984).

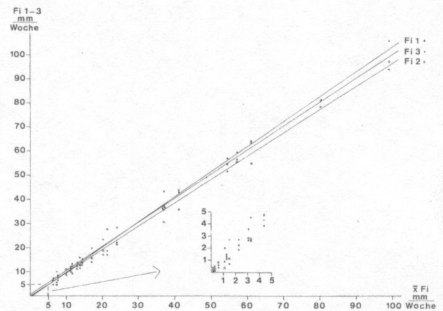


Abb. 3: Zusammenhang zwischen den Einzelwerten der Kronendurchlaßniederschläge dreier Standorte unter Fichte (Fi 1–3) und dem Fichtenbestandsmittel im Burgholz/Solingen (April bis November 1984).

und Fichte zur Messung der Bestandsniederschläge als ausreichend erachtet. Es wurde dafür gesorgt, daß jeder Standort in etwa gleiche Kronendeckungsverhältnisse aufwies. Aus den an den jeweils drei Standorten gewonnenen Niederschlagsmengen wurden später für die beiden Untersuchungsflächen „Bestandsmittelwerte“ sowohl für die Niederschlagshöhen als auch für die Eintragsraten an Spurenstoffen berechnet.

Um zu überprüfen, wie groß die Unterschiede der an den drei Stationen gewonnenen Meßdaten im Vergleich zum entsprechenden „Bestandsmittelwert“ sind, wurden die Wochenwerte zu den „Bestandsmittelwerten“ der gleichen Zeitspanne mit Hilfe der Regressions- und Korrelationsrechnung in Beziehung gesetzt (Abb. 2, Abb. 3). Es zeigte sich, daß die für jeden der drei Standorte berechneten Regressionsgeraden Bestimmtheitsmaße (r^2) von $r^2 > 0,99$ zum „Mittelwert“ des entsprechenden Bestands aufwies.

Erwartungsgemäß streuen die Werte der Standorte unter Buche (Abb. 2) – wegen des weniger dichten Kronenschlusses und des saisonabhängigen Belaubungszustandes – stärker als diejenigen unter Fichte (Abb. 3). Die insgesamt außerordentlich geringen Unterschiede der Werte zwischen den Einzelstandorten lassen den „Bestandsmittelwert“ als geeigneten Parameter für eine weitere Auswertung erscheinen.

2.1.2 Interceptionsverluste

Bestimmende Größen der Interception eines Bestandes sind die Intensität, Dauer und zeitliche Verteilung eines Niederschlages sowie der Bestandsaufbau und dessen Dichte. Darüber hinaus spielen die Windgeschwindigkeit, -richtung, das Sättigungsdefizit der Luft und die Lufttemperatur eine Rolle.

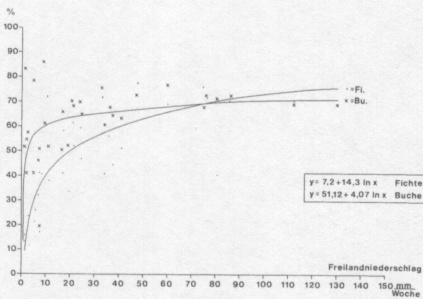


Abb. 4: Kronendurchlaß von Buche und Fichte in % des Freilandniederschlages in Abhängigkeit von verschiedenen Niederschlagssummen für den Zeitraum April bis November 1984 im Burgholz/Solingen.

Die Interception kann aufgrund wechselnder Größe der genannten Parameter sehr unterschiedliche Werte aufweisen, wie Abb. 4 für den von April bis November 1984 untersuchten Buchen- und Fichtenbestand entnommen werden kann. Neben annähernd gleich großen Kronendurchlaßwerten von Buche und Fichte (z. B. in der Woche vom 16. 7. 1984) gab es auch Zeitabschnitte, während derer die Kronendurchlässe von Buche und Fichte sehr unterschiedlich waren, wie z. B. in den Wochen vom 27. 8. 1984 und vom 12. 11. 1984. Bei den beiden letztgenannten Regenfällen handelte es sich um kurzdauernde Schauerniederschläge, die nach mehreren vorausgegangenen niederschlagsfreien Tagen 4 mm (27. 8. 1984) und 2 mm (12. 11. 1984) Regen brachten. Die Unterschiedlichkeit der Kronendurchlaßmenge bei Buche (78,5% am 27. 8. 1984) und Fichte (29% am 27. 8. 1984) dürfte auf die bereits oben genannten verschiedenen großen Kronenbenutzungsgrade bei Laubbäumen (ca. 1 mm) und Nadelbäumen (ca. 2–3 mm) zurückzuführen sein.

Allgemein kann festgestellt werden, daß sich in einem Bestand dann eine hohe Interception respektive ein niedriger Kronendurchlaß einstellt, wenn der Niederschlag kurz, häufig un-

terbrochen und von geringer Intensität ist; eine geringe Interception und damit ein großer Kronendurchlaßwert ist hingegen bei starkem Regen, aber auch langandauerndem Landregen zu erwarten.

Nadelwälder erreichen nach den in der Literatur genannten Werten (EIDMANN 1960, LARCHER 1980) Interceptionsverluste von durchschnittlich 20–35%, Laubwälder von 15–30% des Freilandniederschlags.

Der Stammablauf bei Fichte kann, da er nur einen Anteil von 0 bis 1% der Freilandniederschlagsmenge erreicht, vernachlässigt werden; für Buche muß jedoch ein wesentlich größerer Wert im Sommer und Winter mit rund 17% des Freilandniederschlags berücksichtigt werden.

Der Stammablauf in beiden Beständen wurde im Rahmen dieses Projekts nicht gemessen. Eine Abschätzung erfolgte jedoch nach der bei WIGHAM (1973) angegebenen Formel in Teil I dieses Berichts (KUTTLER 1984).

Während der Meßperioden im Untersuchungsgebiet Burgholz wurden für den Buchenbestand mittlere Interceptionsverluste von 37,9% (1983) und 32,8% (1984), für den Fichtenbestand Durchschnittswerte von 48,7% (1983) und 35,5% (1984) berechnet (Tab. 1).

Monat	Buche		Fichte	
	1983	1984	1983	1984
Mai	61,9	66,8	52,2	56,4
Juni	59,6	68,1	63,9	71,7
Juli	69,8	63,6	64,5	62,6
August	55,5	62,2	44,5	46,2
September	58,6	70,0	39,9	69,1
Oktober	59,6	68,8	38,7	62,3
	62,1	67,2	51,3	64,5

Tab. 1: Anteil der Kronendurchlaßniederschläge unter Buche und Fichte am Freilandniederschlag (Freiland = 100%) im Burgholz/Solingen (jeweils Mai bis Oktober 1983 und 1984).

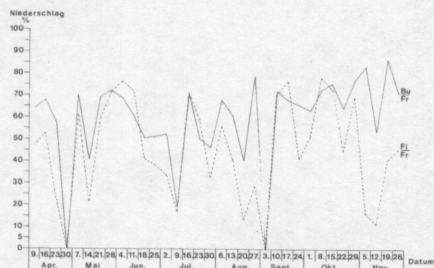


Abb. 5: Kronendurchlaßwerte wöchentlicher Niederschläge unter Buche und Fichte (Freiland = 100%) im Burgholz/Solingen für den Zeitraum April bis November 1984.

Die in Abb. 5 dargestellte logarithmische Abhängigkeit zwischen Kronendurchlaß und wöchentlicher Freilandniederschlagssumme verdeutlicht einen erst schnell erfolgenden Anstieg der Kronendurchlaßwerte bei langsam steigenden Freilandniederschlagswerten; nehmen letztere stärker zu, so gehen damit nur noch geringe Anstiege der Kronendurchlaßwerte einher.

Monat	Freiland		Buche		Fichte	
	1983	1984	1983	1984	1983	1984
Mai	184,3	50,0	114,0	33,4	96,2	28,2
Juni	43,8	235,3	26,1	160,3	28,0	168,7
Juli	115,2	156,1	80,4	99,2	74,6	97,7
August	26,5	79,4	14,7	49,4	11,8	36,7
September	117,7	183,3	69,0	128,3	46,9	126,7
Oktober	59,4	159,5	35,4	109,8	23,0	99,3
Summe	546,9	863,6	339,6	580,4	280,5	557,3
Differenz N ₁₉₈₄ - N ₁₉₈₃	316,7		240,8		276,8	
% von 1983	57,9		70,9		98,7	

Tab. 2: Monatssummen (in mm) der Freiland- und Kronendurchlaßniederschläge in den Biotopen Freiland, Buche und Fichte im Burgholz/Solingen (jeweils Mai bis Oktober 1983 und 1984).

In dem hier untersuchten Fichten- und Buchenbestand wurden als höchste mittlere Kronendurchlaßwerte 70% des Freilandniederschlags gemessen. Bei niedrigen wöchentlichen Freilandniederschlägen herrscht bei Fichte erwartungsgemäß ein geringerer Kronendurchlaß vor als bei Buche. Darüber hinaus sind die Schwankungen der Einzelwerte um die Regressionskurve bei Buche wesentlich höher als bei Fichte. Dies drückt sich auch in dem für die Kurven berechneten Bestimmtheitsmaß (r^2) aus, das für Buche den schlechten Wert von $r^2 = 0,13$, für Fichte hingegen $r^2 = 0,70$ erreicht.

Die sehr stark wechselnden Kronendurchlaßwerte unter Buche bei gleich hohen, wöchentlich gemessenen Freilandniederschlägen – insbesondere bei Werten unter 30 mm/Woche – werden auf unterschiedliche Niederschlagsintensitäten zurückgeführt, wobei – wie bereits oben dargelegt – heftige Schauer hohe Kronendurchlässe erzielen, mithin zu niedrigen Interceptionsverlusten führen, Niederschläge geringer Stärke hingegen kleine Kronendurchlaßwerte und hohe Interceptionsverluste verursachen. Darüber hinaus ist zu berücksichtigen, daß der jahreszeitenabhängige Blattflächenindex bei Buche die Kronendurchlaßwerte während des Meßzeitraumes beeinflusst.

2.1.3 Freiland- und Bestandsniederschlagssummen

Die beiden Vergleichszeiträume Mai bis Oktober der Jahre 1983 und 1984 wiesen sehr unterschiedliche Monatssummen der Niederschläge auf (Tab. 2). Im regennasseren Jahr 1984 wurden an der Freilandstation das 1,6fache, unter Buche das 1,7- und unter Fichte das rund 2fache der für 1983 ermittelten Werte gemessen.

Insbesondere im zu nassen Juni 1984 wurden wesentlich höhere Monatssummen an den drei Biotopen ermittelt als im gleichen Monat des Vorjahres. Die Kronendurchlaßwerte erhöhten sich jedoch gegenüber Juni 1983 trotz höherer Niederschläge nur geringfügig, und zwar unter Buche um 8,5%, unter Fichte um 7,8%.

Bezogen auf den gesamten Zeitraum Mai bis Oktober 1984 ergaben sich im Vergleich zu 1983 unter Buche mittlere Erhöhungen der Kronendurchlaßwerte von nur 5,1%, unter Fichte hingegen von 13,2%.

	pH		elektr. Leitf.		Ca ²⁺		SO ₄ ²⁻ -S		Cl ⁻		NO ₃ ⁻ -N		Pb ²⁺	
	1983	1984	1983	1984	1983	1984	1983	1984	1983	1984	1983	1984	1983	1984
Freiland	4,12	4,11	55,2	67,9	1,85	1,80	2,60	3,32	2,29	1,67	0,94	1,16	0,030	0,029
Buche	4,15	4,39	124,50	111,5	8,21	5,65	8,14	7,00	5,10	5,35	1,92	1,89	0,039	0,028
Fichte	3,40	3,50	444,14	265,0	11,39	7,86	23,70	15,84	12,04	9,17	6,18	3,90	0,096	0,079

Tab. 3: Arithmetische Mittelwerte der Spurenstoffkonzentrationen ($\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$), pH-Werte und elektr. Leitfähigkeiten ($\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$) in den Biotopen Freiland, Buche und Fichte im Burgholz/Solingen (jeweils Mai bis Oktober 1983 und 1984).

	pH		elektr. Leitf.		Ca ²⁺		SO ₄ ²⁻ -S		Cl ⁻		NO ₃ ⁻ -N		Pb ²⁺	
	1983	1984	1983	1984	1983	1984	1983	1984	1983	1984	1983	1984	1983	1984
Freiland	4,12	4,06	55,2	62,0	1,85	1,38	2,60	2,93	2,29	1,69	0,94	0,95	0,030	0,031
Buche	4,15	4,25	124,5	87,0	8,21	3,91	8,14	5,33	5,10	4,33	1,92	1,41	0,039	0,032
Fichte	3,40	3,41	444,1	268,6	11,39	6,65	23,70	15,42	12,04	7,40	6,18	3,30	0,096	0,073

Tab. 4: Gewichtete Mittelwerte der Spurenstoffkonzentrationen ($\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$), pH-Werte und elektr. Leitfähigkeiten ($\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$) in den Biotopen Freiland, Buche und Fichte im Burgholz/Solingen (jeweils Mai bis Oktober 1983 und 1984).

2.2 Messungen zur Filterkapazität

2.2.1 Spurenstoffkonzentrationen der Freiland- und Bestandsniederschläge

Die für die Meßzeiträume 1983 und 1984 aus den Niederschlägen ermittelten Spurenstoffkonzentrationen, pH-Werte und elektr. Leitfähigkeiten sind als arithmetische und gewichtete Mittelwerte in den Tabellen 3 und 4 enthalten. Es soll in diesem Zusammenhang ausschließlich auf die in Tab. 4 enthaltenen, mit der Niederschlagsmenge gewichteten Mittelwerte eingegangen werden.

Für die Freilandwerte kann festgestellt werden, daß die Unterschiede der Spurenstoffkonzentrationen, der pH-Werte und der elektr. Leitfähigkeiten zwischen beiden Untersuchungszeiträumen letztlich nicht sehr groß sind, z. T. sogar weitgehend übereinstimmen, wenn man von dem wesentlich niedrigeren Chloridwert 1984 absieht.

Trotz der unterschiedlich hohen Niederschlagssummen beider Meßzeiträume (vgl. Tab. 2) waren die Spurenstoffkonzentrationen am Freilandbiotop relativ einheitlich.

Unter Buche und Fichte aber wiesen die Spurenstoffkonzentrationen im Vergleich der beiden Meßzeiträume größere Unterschiede auf.

Während die pH-Werte sowohl unter Buche als auch unter Fichte beider Meßzeiträume noch annähernd gleich waren, ergaben sich für alle anderen Parameter z. T. sehr große Unterschiede.

Prinzipiell kann festgestellt werden, daß 1983 um bis zu zweifach höhere Werte der elektr. Leitfähigkeiten und Spurenstoffkonzentrationen auftraten als im nassen Sommer 1984. Neben der höheren Niederschlagssumme in der Zeit von Mai bis Oktober 1984 war auch die Anzahl der Regentage ($N_d > 0,1 \text{ mm}$) erhöht: 114 Regentagen 1984 standen 91 Regentage 1983 gegenüber (Werte der Station des Deutschen Wetterdienstes Wuppertal-Buchenhofen; Deutscher Wetterdienst 1983 und 1984). Der Meßzeitraum 1983 war somit wesentlich trockener, was dazu geführt hat, daß sich auf trockenem Wege mehr Luftschadstoffe an den Blättern und Zweigen absetzen konnten; d. h. die Filterwirksamkeit bei der trockenen Deposition des Buchen- und Fichtenbestandes war 1983 gegenüber 1984 erhöht, u. a. auch deshalb, weil häufiger zwischen den einzelnen Regenfällen mehrere niederschlagsfreie Tage auftraten.

2.2.2 Spurenstoffdepositionen

Obwohl während des Meßzeitraumes 1984 wesentlich mehr Niederschlag fiel, erhöhten sich nicht für alle Spurenstoffe die Einträge (Tab. 5). Teilweise wurden 1984 in den beiden Forstbeständen sogar geringere Mengen an Spurenstoffen dem Boden zugeführt (z. B. Calcium und Sulfat unter Buche, Sulfat und Nitrat unter Fichte).

Vergleicht man die Anreicherungsfaktoren der Spurenstoffe der beiden Waldbiotope (Freiland = 1) (Tab. 6), dann läßt sich feststellen, daß im Fichtenbiotop erwartungsgemäß z. T. wesentlich höhere Spurenstoffeinträge gemessen wurden als im Buchenbiotop.

Während im Buchenbiotop in beiden Meßzeiträumen weniger Einträge an H^+ -Ionen und Blei festgestellt wurden als an der Freilandstation, wurden die anderen Spurenstoffe bis maximal zum 2,6fachen des Freilandwertes angereichert. Unter Fichte wurden die höchsten Anreicherungsfaktoren für Sulfat (3,3- bzw. 4,9fach) und Calcium (3,4- bzw. 3,5fach) erreicht, die geringsten für den Spurenstoff Blei (1,5- bzw. 1,6fach).

Ein Blick auf die Quotienten der Eintragsraten Fichte/Buche zeigt, daß ein Fichtenbestand zwischen dem 1,3- und 3,3fachen mehr an Spurenstoffen ausfiltert als ein Buchenbestand. Das gilt nicht für den Vergleich der H^+ -Einträge, die unter Fichte zwischen 3,1- und 7,3mal höher sind als unter Buche. Hierbei muß berücksichtigt werden, daß die Messungen während des hydrologischen Sommerhalbjahres, das mit der Buchenbelaubung zusammenfällt, durchgeführt wurden.

	H ⁺		Ca ²⁺		SO ₄ ²⁻ -S		Cl ⁻		NO ₃ ⁻ -N		Pb ²⁺	
	1983	1984	1983	1984	1983	1984	1983	1984	1983	1984	1983	1984
Freiland	0,319	0,409	5,2	6,0	8,8	12,8	7,9	7,4	3,2	4,1	0,113	0,135
Buche	0,300	0,177	13,4	11,6	16,3	15,8	11,1	12,9	3,3	4,2	0,075	0,096
Fichte	0,900	1,178	18,1	20,3	43,1	41,9	18,5	20,1	10,6	9,0	0,180	0,198

Tab. 5: Spurenstoffdepositionsraten (mg · m⁻² · d⁻¹) in den Biotopen Freiland, Buche und Fichte im Burgholz/Solingen (jeweils Mai bis Oktober 1983 und 1984).

	H ⁺		Ca ²⁺		SO ₄ ²⁻ -S		Cl ⁻		NO ₃ ⁻ -N		Pb ²⁺	
	1983	1984	1983	1984	1983	1984	1983	1984	1983	1984	1983	1984
Buche	0,9	0,4	2,6	1,9	1,9	1,2	1,4	1,7	1,0	1,0	0,7	0,7
Fichte	2,8	2,9	3,5	3,4	4,9	3,3	2,3	2,7	3,3	2,2	1,6	1,5
Fichte												
———	3,1	7,3	1,3	1,8	2,6	2,8	1,6	1,6	3,3	2,2	2,3	2,1
Buche												

Tab. 6: Anreicherungsfaktoren von Spurenstoffdepositionen im Kronendurchlaß von Buche und Fichte (Freiland = 1) im Burgholz/Solingen (jeweils Mai bis Oktober 1983 und 1984).

2.2.3 Vergleich der Ergebnisse der Spurenstoffmessungen mit anderen Untersuchungen
In den Tabellen 7, 8 und 9 werden die in dieser Untersuchung ermittelten Ergebnisse mit denjenigen der Arbeiten aus dem Sauerland (16 Meßstellen; KUTTLER 1985) und denen der Schadstoffdepositionsmessungen der Landesanstalt für Ökologie (LÖLF) (insgesamt 25 Freiland- und Waldbestandsmeßstellen, von denen für den hier angestrebten Vergleich drei Stationen herangezogen wurden) verglichen.

Die Stationen des Sauerlandprojektes repräsentieren weitgehend „unbelastete Gebiete“, die mit der Maßgabe eingerichtet wurden, die Immissionsbelastung siedlungsferner waldreicher Gebiete zu erfassen. In den Tabellen 7 bis 9 wurden für die dort genannten Meßzeiträume jeweils die höchsten und niedrigsten Stationsmittelwerte, die für das Sauerlandmeßnetz berechnet wurden, mitgeteilt.

Die Werte der drei aus dem LÖLF-Projekt herangezogenen Stationen repräsentieren eine „Mittelgebirgsstation in Kammlage des Eggegebirges“, mit Hauptwindrichtung im Lee des Ruhrgebietes gelegen mit Standort bei Paderborn, eine „Flachlandstation am linken Niederrhein, in Hauptwindrichtung dem Ruhrgebiet vorgelagert“ mit dem Standort Xanten, und eine „Mittelgebirgsstation (Eifel) in Leelage der Ardennen“ mit dem Standort Monschau.

Tab. 7 enthält die Werte der Spurenstoffkonzentrationen und Depositionen von Freilandniederschlägen. Hierzu läßt sich feststellen, daß sowohl die Konzentrations- als auch die Depositionswerte im Burgholz im Vergleich zu denen der LÖLF-Standorte niedriger sind. Andererseits liegen die „Burgholz“-Werte – abgesehen von dem etwas höheren Sulfat-

A) Station/Ort	Zeitraum	pH	H ⁺	elektr. Leitf.	Ca ²⁺	SO ₄ ²⁻ -S	Cl ⁻	NO ₃ ⁻ -N	Pb ²⁺	F ⁺	Bearbeiter
Burgholz/ Solingen	05. 83-10. 83	4,12	0,076	55,2	1,9	2,6	2,3	0,9	0,03	-	diese Arbeit
	05. 84-10. 84	4,06	0,087	62,0	1,4	2,9	1,7	1,0	0,03	-	
Sauerland	03. 83-11. 83	3,99- 4,42	0,102- 0,038	34,9- 60,2	- -	1,2- 2,3	1,2- 2,4	0,5- 1,0	- -	0,06- 0,23	KUTTLER 1985
Paderborn	11. 82-10. 83	4,30	0,050	38,0	0,9	2,0	2,2	0,9	-	0,010 ¹⁾	BLOCK & BARTELS 1985
Xanten	11. 82-10. 83	4,60	0,032	37,0	0,9	2,3	2,3	0,8	-	0,010 ¹⁾	
Monschau	11. 82-10. 83	4,30	0,050	30,0	0,8	1,6	1,6	0,6	-	0,010 ¹⁾	
B) Burgholz/ Solingen	05. 83-10. 83	-	0,319	-	5,2	8,8	7,9	3,2	0,11	-	diese Arbeit
	05. 84-10. 84	-	0,409	-	6,0	12,8	7,4	4,1	0,14	-	
Sauerland	03. 83-11. 83	-	-	-	-	3,8- 6,0	3,0- 7,1	1,4- 2,5	- -	0,14- 0,50	KUTTLER 1985
Paderborn	11. 82-10. 83	-	0,137	-	2,7	5,8	6,5	2,5	-	0,027 ¹⁾	BLOCK & BARTELS 1985
Xanten	11. 82-10. 83	-	0,055	-	1,9	5,1	5,1	1,7	-	0,027 ¹⁾	
Monschau	11. 82-10. 83	-	0,123	-	2,1	4,2	4,3	1,6	-	0,027 ¹⁾	

Tab. 7: A) Gewichtete Mittelwerte von Spurenstoffkonzentrationen (in $\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$), pH-Werten und elektr. Leitfähigkeiten (in $\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$) im Freilandniederschlag des Burgholzes/Solingen im Vergleich zu anderen Untersuchungen.

B) Deposition von Spurenstoffen mit dem Freilandniederschlag des Burgholzes/Solingen im Vergleich zu anderen Untersuchungen (in $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$).

1) Schätzwert, da über 50% der Monatsanalysen unterhalb der Nachweisgrenze

A) Station/Ort	Zeitraum	pH	H ⁺	elektr. Leitf.	Ca ²⁺	SO ₄ ²⁻ -S	Cl ⁻	NO ₃ ⁻ -N	Pb ²⁺	F ⁺	Bearbeiter
Burgholz/ Solingen	05. 83–10. 83	4,15	0,071	124,5	8,2	8,1	5,1	1,9	0,04	–	diese Arbeit
	05. 84–10. 84	4,25	0,056	87,0	3,9	5,3	4,3	1,4	0,03	–	
Paderborn	11. 82–10. 83	4,40	0,040	58,0	2,0	3,3	4,0	1,3	–	0,05	BLOCK & BARTELS 1985
Xanten	11. 82–10. 83	4,80	0,016	107,0	2,5	6,4	7,6	1,3	–	0,13	
Monschau	11. 82–10. 83	4,20	0,063	58,0	2,1	3,3	3,6	1,1	–	0,03	
B)											
Burgholz/ Solingen	05. 83–10. 83	–	0,300	–	13,4	16,3	11,1	3,3	0,08	–	diese Arbeit
	05. 84–10. 84	–	0,177	–	11,6	15,8	12,9	4,2	0,10	–	
Paderborn	11. 82–10. 83	–	0,090	–	4,2	7,0	8,4	2,8	–	0,112	BLOCK & BARTELS 1985
Xanten	11. 82–10. 83	–	0,080	–	3,5	8,8	10,5	1,8	–	0,181	
Monschau	11. 82–10. 83	–	0,107	–	3,8	6,0	6,5	1,9	–	0,047	

Tab. 8: A) Gewichtete Mittelwerte von Spurenstoffkonzentrationen (in $\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$), pH-Werten und elektr. Leitfähigkeiten (in $\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$) im Kronendurchlaßniederschlag von Buchenbeständen des Burgholzes/Solingen im Vergleich zu anderen Untersuchungen. B) Deposition von Spurenstoffen mit dem Kronendurchlaßniederschlag von Buchenbeständen des Burgholzes/Solingen im Vergleich zu anderen Untersuchungen (in $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$).

A) Station/Ort	Zeitraum	pH	H ⁺	elektr. Leitf.	Ca ²⁺	SO ₄ ²⁻ -S	Cl ⁻	NO ₃ ⁻ -N	Pb ²⁺	F ⁺	Bearbeiter
Burgholz/ Solingen	05. 83–10. 83	3,40	0,398	444,1	11,4	23,7	12,0	6,2	0,10	–	diese Arbeit
	05. 84–10. 84	3,41	0,389	268,6	6,7	15,4	7,4	3,3	0,08	–	
Paderborn	11. 82–10. 83	3,60	0,250	160,0	3,1	9,1	7,4	2,6	–	0,11	BLOCK & BARTELS 1985
Xanten	11. 82–10. 83	4,40	0,040	178,0	3,8	13,3	10,3	2,9	–	0,25	
Monschau	11. 82–10. 83	3,70	0,200	142,0	3,4	7,4	6,9	2,2	–	0,06	
B) Burgholz/ Solingen	05. 83–10. 83	–	0,900	–	18,1	43,1	18,5	10,6	0,20	–	diese Arbeit
	05. 84–10. 84	–	1,178	–	20,3	41,9	20,1	9,0	0,20	–	
Paderborn	11. 82–10. 83	–	1,890	–	6,5	18,8	15,3	5,3	–	0,21	BLOCK & BARTELS 1985
Xanten	11. 82–10. 83	–	0,200	–	4,8	17,0	13,2	3,7	–	0,30	
Monschau	11. 82–10. 83	–	0,282	–	4,6	10,0	9,5	3,0	–	0,08	

Tab. 9: A) Gewichtete Mittelwerte von Spurenstoffkonzentrationen (in $\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$), pH-Werten und elektr. Leitfähigkeiten (in $\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$) im Kronendurchlaßniederschlag von Fichtenbeständen des Burgholzes/Solingen im Vergleich zu anderen Untersuchungen. B) Deposition von Spurenstoffen mit dem Kronendurchlaßniederschlag von Fichtenbeständen des Burgholzes/Solingen im Vergleich zu anderen Untersuchungen (in $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$).

Wert – innerhalb des Bereiches, den das aus 16 Meßstationen bestehende Sauerlandmeßnetz aufweist.

Die in Tab. 8 enthaltenen Meßwerte für Buchenbestände zeigen, daß die Spurenstoffkonzentrationen nach dem Passieren des Blätterdaches im Burgholz höher sind als an den Standorten Paderborn und Monschau. In Xanten hingegen werden höhere Ausfilterungsraten für Chlorid und z. T. für Sulfat erreicht. Die Depositionsraten (Tab. 8 B) waren im Burgholz im Vergleich zu den „LÖLF-Werten“ immer – z. T. sogar wesentlich – höher; dies ist nicht nur auf eventuell höhere Niederschlagssummen zurückzuführen, sondern auch auf eine stärkere Belastung des Standortes Burgholz durch die Ballungsräume der Rhein-schiene und des Ruhrgebiets.

Für die in Tab. 9 dargestellten Spurenstoffkonzentrationen und -depositionen für Fichte gilt – bei naturgemäß höheren absoluten Filterwerten als bei Buche – der bereits in Tab. 8 A und 8 B gezeigte Sachverhalt, wonach in lufthygienischer Hinsicht die Eintragsrate luft-tragener Spurenstoffe am Standort Burgholz wesentlich größer ist als an den Stationen Monschau, Paderborn und Xanten.

3. Lufttemperatur- und Luftfeuchtigkeitsverhältnisse

3.1 Lufttemperaturen

In der Zeit von April 1983 bis März 1985 wurden an den drei Standorten in Gießener Hütten mit Thermohygrographen die Lufttemperatur und relative Luftfeuchtigkeit gemessen und registriert. Die Auswertung des Datenmaterials erfolgte nach den in Teil I dieser Jahresberichte genannten Kriterien (KUTTLER 1984).

Eine Zusammenstellung der berechneten Daten für die Lufttemperaturen und die relativen Luftfeuchtigkeiten findet sich in den Tabellen 10 und 11; die Monatsmittelwerte sind in den Abb. 6 und Abb. 7 enthalten (hierauf wird aus Platzgründen nicht weiter eingegangen, es sei nur bei der Lufttemperatur auf deren zeitweise antagonistisches Verhalten zwischen Freiland und den Waldbiotopen im Jahresverlauf hingewiesen und bei der relativen Luftfeuchtigkeit auf die z. T. erheblich höheren Feuchtigkeitswerte unter Fichte).

Ein Blick auf die in Tabelle 10 auf der rechten Seite dargestellten Abweichungen der Mittelwerte der Waldbiotope vom Freiland zeigt für die Temperaturen morgens die geringsten und mittags die größten Unterschiede. Mittags führt der schattenspendende kühlende Stammraum sowohl von Buche als auch verstärkt von Fichte zu niedrigeren mittleren Lufttemperaturen, wie deutlich zu sehen ist. Dies ist auf die an der „aktiven Oberfläche“ der Baumkronen ablaufende Strahlungsabsorption zurückzuführen.

Die Temperaturhaltefähigkeit der beiden Waldbiotope läßt sich insbesondere zum Abendtermin beobachten, wo etwas höhere Lufttemperaturen an den Waldstandorten (bis zu 0,9 K) als im Freiland auftreten. An den sich unter Buche und Fichte ergebenden niedrigeren mittleren täglichen Temperaturamplituden zeigt sich im Vergleich zum Freiland die größere Dämpfung der Maxima- und Minimatemperaturen.

Sehr deutliche Unterschiede zwischen den drei Biotopen traten beim Vergleich meteorologisch besonderer Tage auf. So ergab sich im Stammraum von Fichte im Verlauf der gesamten Meßperiode nur ein heißer Tag, während unter Buche sechs und im Freiland sogar elf heiße Tage registriert wurden. Auch Sommer- und Frosttage wurden unter Buche und Fichte wesentlich weniger registriert als im Freiland.

Hingegen gab es am Fichtenstandort mehr Eistage (56 d) als im Freiland- und Buchenbiotop (jeweils 42 Tage). Da sich die Erhaltensneigung tiefer Lufttemperaturen – auch tagsüber – meist in Verbindung mit einer Schneedecke einstellt, und da der Stammraum des untersuchten Fichtenforstes aufgrund der größeren Bestandsdichte einen nur stark verringerten Energieaustausch mit der Umgebung zuläßt, konnte sich, nachdem sich einmal

	Freiland	Buche	Fichte	Differenzen Freil.-Buche	Differenzen Freil.-Fichte
Mittelwert 7 Uhr (°C)	6,7	6,8	6,8	-0,1	-0,1
Mittelwert 14 Uhr (°C)	11,3	10,7	9,9	0,6	1,4
Mittelwert 21 Uhr (°C)	7,6	8,5	8,5	-0,9	-0,9
Jahresmittelwert (°C)	8,3	8,6	8,3	-0,3	0,0
Mittleres tägl. Minimum (°C)	4,8	5,7	5,9	0,9	-1,1
Mittleres tägl. Maximum (°C)	12,2	11,5	10,7	0,7	1,5
Mittlere tägl. Temperaturamplitude (K)	7,4	5,8	4,7	1,6	2,7
Heiße(r) Tag(e) (Gesamtzahl)	11	6	1	5	10
Sommertage (Gesamtzahl)	53	32	30	21	23
Frosttage (Gesamtzahl)	123	102	72	21	51
Eistage (Gesamtzahl)	42	42	56	0	-14

Tab. 10: Lufttemperaturwerte sowie Anzahl meteorologisch besonderer Tage in den Biotopen Freiland, Buche und Fichte im Burgholz/Solingen für den Zeitraum April 1983 bis März 1985.

	Freiland	Buche	Fichte	Differenzen Freil.-Buche	Differenzen Freil.-Fichte
Mittelwert 7 Uhr (%)	86,0	87,5	88,6	-1,5	-2,6
Mittelwert 14 Uhr (%)	64,9	68,2	73,5	-3,3	-8,6
Mittelwert 21 Uhr (%)	82,6	79,6	81,9	3,0	0,7
Jahresmittelwert (%)	78,1	78,7	81,6	-0,6	-3,5
Mittleres tägl. Minimum (%)	58,3	61,8	67,7	-3,5	-9,4
Mittleres tägl. Maximum (%)	93,6	92,1	92,6	1,5	1,0
Mittlere tägl. Amplitude (%)	35,6	31,0	25,5	4,6	10,1
Absolute Luftfeuchtigkeit ($g \cdot m^{-3}$)	6,9	7,0	7,4	-0,1	-0,5
Dampfdruck (hPa)	9,3	9,5	9,9	-0,2	-0,6

Tab. 11: Angaben zu verschiedenen Werten der relativen und absoluten Luftfeuchtigkeit für die Biotope Freiland, Buche und Fichte im Burgholz/Solingen für den Zeitraum April 1983 bis März 1985.

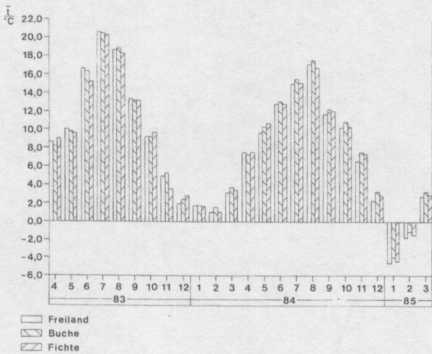


Abb. 6: Monatsmittelwerte der Lufttemperaturen (in °C) an den Biotopen Freiland, Buche und Fichte im Burgholz/Solingen für den Zeitraum April 1983 bis März 1985.

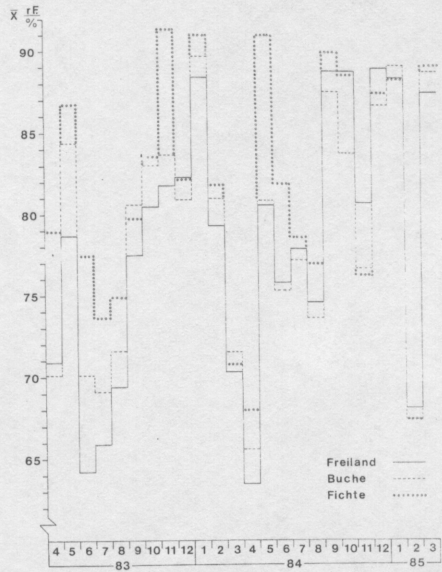


Abb. 7: Monatsmittelwerte der relativen Luftfeuchtigkeit (in %) an den Biotopen Freiland, Buche und Fichte im Burgholz/Solingen für den Zeitraum April 1983 bis März 1985.

tiefe Lufttemperaturen über einer Schneedecke bei Windarmut im Stammraum von Fichte eingestellt hatten, die Kälte hier relativ lange halten. Dies läßt sich an einer Auswahl dreier typischer winterkalter Tage in Abb. 8 zeigen, wonach der „Temperaturkonservierungseffekt“ im Fichtenbestand insbesondere beim Abflauen einer Kälteperiode am 16. und 17. 2. 1985 an den dort unter 0° C verbleibenden Temperaturen im Gegensatz zu den bereits am 16. 2. 1985 im Freiland und unter Buche auf über 0° C ansteigenden Werten deutlich wird.

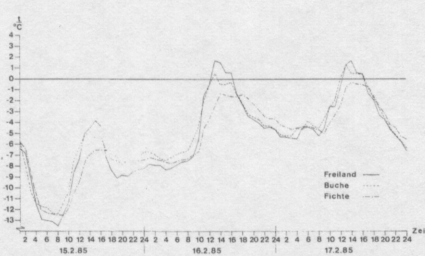


Abb. 8: Stundenmittelwerte der Lufttemperaturen für eine winterliche Kälteperiode vom 15. 2.–17. 2. 1985 an den Biotopen Freiland, Buche und Fichte im Burgholz/Solingen.

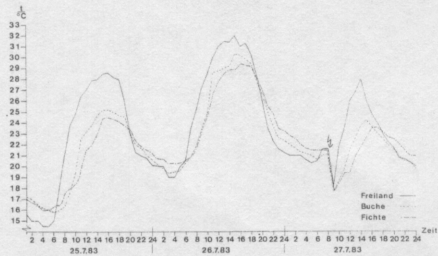


Abb. 9: Stundenmittelwerte der Lufttemperaturen für eine sommerliche Kältewetterlage vom 25. 7.–27. 7. 1983 an den Biotopen Freiland, Buche und Fichte im Burgholz/Solingen.

Am Beispiel einer sommerlichen Strahlungswetterlage, in die am 27. 7. 1983 ein Gewitter eingeschaltet war (Abb. 9), lassen sich im Tagesverlauf für die drei Biotope die unterschiedliche Lage der Maxima und Minima, deren Eintrittszeiten sowie die Abkühlungs- und Erwärmungsraten erkennen.

Während im Freiland die größten Temperaturschwankungen bei Strahlungswetter zu beobachten sind, zeigen die Waldbiotope geringe Abkühlungs- und Erwärmungsraten, die zeitweise zu einer Verschiebung der Maxima und Minima führen.

Am 27. 7. 1983 gegen neun Uhr setzt in allen drei Biotopen nach Beginn eines Gewitters ein plötzlicher Temperaturrückgang auf Werte um 18° C ein; nach dessen Beendigung verläuft aufgrund der unterschiedlichen Trocknungsphasen der drei Biotope der erneute Anstieg der Lufttemperaturen sehr differenziert. Hierbei weist der Freilandstandort die höchste Erwärmungsrate auf, Buche und Fichte – mit deutlicher zeitlicher Verzögerung der Maxima-bildung – haben hingegen wesentlich geringere Raten. Die Energie im Wald wird zunächst für die Verdunstung des Wassers verbraucht, dann erst wird der fühlbare Wärmestrom (= Ansteigen der Lufttemperatur) erfüllt.

3.2 Luftfeuchtigkeit

Die in Tabelle 11 und Abbildung 7 enthaltenen Angaben verdeutlichen, daß im Jahresmittel die relativen Luftfeuchtigkeitswerte an den beiden Waldstandorten z. T. erheblich höher sind als an der Freilandstation. Dieses gilt sowohl für die drei klimatologischen Termine, für den Jahresmittelwert als auch für die mittleren täglichen Minima und Maxima. Während der Fichtenbestand im Durchschnitt eine um 3,5% höhere mittlere relative Luftfeuchtigkeit aufweist, liegen die Mittelwerte am Buchenstandort nur um 0,6% über denjenigen des Freilandes. Eine besonders deutliche Veränderung erfährt der Wert des mittleren Minimums, der unter Fichte um 9,4%, unter Buche um 3,5% im Vergleich zum Freiland angehoben ist. Auch die mittlere Schwankung der relativen Luftfeuchtigkeit ist unter Fichte und Buche mit 25,5% und 31,0% gegenüber dem Freiland, wo 35,6% erreicht werden, deutlich gedämpft. Für den Dampfdruck und die absolute Luftfeuchtigkeit stellen sich in den Waldbiotopen ebenfalls z. T. deutlich höhere Werte ein.

Die sowohl für den thermischen als auch hygrischen Bereich ermittelten Werte belegen die günstige Beeinflussung des Bioklimas in Wäldern, wo vornehmlich der Kappung von Temperaturextremwerten und dem sich überwiegend in den Sommermonaten einstellenden höheren Feuchtigkeitsangebot für das Wohlbefinden des Menschen große Bedeutung zu fällt.

4. Danksagung

Diese Arbeit hätte ohne die finanzielle und technische Hilfe durch den Leiter des Fuhlrott-Museums, Herrn Dr. W. Kolbe, und seine Mitarbeiter nicht durchgeführt werden können. Die Probenaufbereitung lag in Händen der Mitarbeiter des Labors des Geographischen Instituts der Ruhr-Universität Bochum. Allen Beteiligten sei auch an dieser Stelle herzlichst gedankt.

Literatur

- BLOCK, J. & BARTELS, U. (1985): Ergebnisse der Schadstoffdepositionsmessungen in Waldökosystemen in den Meßjahren 1981/82 und 1982/83. – Forschung und Beratung, Reihe C, Wiss. Berichte u. Diskussionsbeiträge, **39**, Landesanstalt für Ökologie, Landschaftsentwicklung und Forstplanung.
- Deutscher Wetterdienst (1983 u. 1984): Monatlicher Witterungsbericht. – Amtsblatt des Deutschen Wetterdienstes, **32.** und **33.** Jahrgang; Offenbach.
- EIDMANN, F. E. (1960): Die Interception in Buchen- und Fichtenbeständen; Ergebnis mehrjähriger Untersuchungen im Rothaargebirge (Sauerland). – Colloquium Hannover-Münden, Sept. 1959. Publ. No. **48**, Ass. Int. Hydrol. Sci., 5–25.
- GEIGER, R. (1961): Das Klima der bodennahen Luftschicht. – Ein Lehrbuch der Mikroklimatologie. **4.** Auflage; Braunschweig.
- HÖPPE, P. & MAYER, H. (1983): Bioklimatische Aspekte des Waldklimas. – Z. Phys. Med. Baln. Med. Klim. **12**, 5–11.
- KUTTLER, W. (1984): Zur Filterkapazität und zum Bestandsklima eines Buchen- und Fichtenforstes im Bergischen Land. – Jber. naturwiss. Ver. Wuppertal, **37**, 145–155; Wuppertal.
- (1985): Einträge atmosphärischer Spurenstoffe in Waldgebiete des Sauerlandes (Abschlußbericht). – Umweltforschungsplan des Bundesministers des Inneren. Luftreinhaltung, Forschungsprojekt 10402715. Projektleiter: Prof. Dr. H.-W. Georgii. – Im Auftrag des Instituts f. Met. u. Geophys. d. Univ. Frankfurt/M. u. d. Umweltbundesamtes, Pilotstation Frankfurt/M., 166 Seiten.
- LARCHER, W. (1980): Ökologie der Pflanzen auf physiologischer Grundlage. **3.** Auflage; Stuttgart.
- WIGHAM, J. M. (1973): Interception, Section IV, p. 4.1–4.9 – GRAY, D. M. (ed.): Handbook on the Principles of Hydrology; Toronto.

Anschrift des Verfassers:

Prof. Dr. W. KUTTLER, Universität – GHS – Essen, Fachbereich 9, Landschaftsökologie, Postfach 10 37 64, D-4300 Essen 1.