

**DIE WACHSQUALITÄT VON
FICHTENNADELN**

**Beurteilungsschlüssel
für den 2. Nadeljahrgang**

DIE WACHSQUALITÄT VON FICHTENNADELN

Beurteilungsschlüssel für den 2. Nadeljahrgang

Cristina TRIMBACHER
Otto ECKMÜLLNER

BE-125

Wien, September 1999

Autoren:

Cristina Trimbacher (Umweltbundesamt Wien)

Otto Eckmüller (Universität für Bodenkultur, Wien)

Layout:

Evelyn Neuhold

*Besonderer Dank gilt Herrn DI. Walter Wuggenig vom Amt der Kärntner Landesregierung,
Abteilung 10F-Landesforstdirektion, für die Probenwerbung und die freundliche Unterstützung.*

Impressum

Medieninhaber und Herausgeber: Umweltbundesamt GmbH, Spittelauer Lände 5, A-1090 Wien

Eigenvervielfältigung

© Umweltbundesamt GmbH, Wien, 1999
Alle Rechte vorbehalten (all rights reserved)
ISBN 3-85457-453-3

INHALT

	Seite
ZUSAMMENFASSUNG	5
Bioindikation mit Nadelwachsen	5
Beurteilungsschlüssel 1. Nadeljahrgang	5
Beurteilungsschlüssel 2. Nadeljahrgang	5
1 EINLEITUNG	7
1.1 Die Wachsqualität von Fichtennadeln	7
1.2 Beurteilungsschlüssel für den 1. Nadeljahrgang	7
1.3 Adaptierung des Beurteilungsschlüssels für den 2. Nadeljahrgang	8
2 PROBENAHE UND STANDORTSAUSWAHL	9
3 METHODEN	10
3.1 Rasterelektronenmikroskopie	10
3.1.1 Bestimmung der Wachsqualität	10
3.1.1.1 Beurteilungskriterien	11
3.1.1.2 Beurteilungsverfahren im Rasterelektronenmikroskop	12
4 ERGEBNISSE	16
4.1 Ergebnisse der Nadeluntersuchungen	16
4.1.1 Unbelastete Hintergrundstandorte	16
4.1.2 Standorte mit winterlicher Immissionsbelastung	16
4.1.3 Standorte mit ganzjähriger Immissionsbelastung	17
4.2 Ergebnisse der statistischen Auswertungen	18
4.2.1 Streuungen	18
4.2.2 Mittelwerte (Wachsqualität)	18
4.2.3 Änderung der Wachsqualität im 2. Nadeljahrgang gegenüber dem 1. Nadeljahrgang	19
4.2.4 Mechanische Beeinträchtigungen	20
5 FOLGERUNGEN	21
6 LITERATUR	22

ZUSAMMENFASSUNG

Bioindikation mit Nadelwachsen

Fichtennadeln sind an ihrer Oberfläche als Schutz vor natürlichen wie anthropogenen Umwelteinflüssen und übermäßigem Wasserverlust von einer Wachsschicht überzogen. Diese sog. Epicuticularwachse weisen besonders im Bereich der Spaltöffnungen eine sehr feinmaschige Mikrostruktur auf. Luftschadstoffe und luftgetragene Stäube können die Wachsmikrostruktur beeinträchtigen und somit eine raschere Alterung der Wachstrukturen herbeiführen. In weiterer Folge kann es zu einem frühzeitigen Nadelverlust kommen. Witterungseinflüsse führen ebenfalls zu Beeinträchtigungen der Nadelwachse, welche jedoch von immissionsbedingten Veränderungen unterschieden werden können.

Als Ergänzung zu den klassischen Verfahren der Waldschadenserhebung hat sich die Rasterelektronenmikroskopische Untersuchung von Fichtennadeln zur Früherkennung von Schadstoffeinflüssen sowie zur Eingrenzung von Immissionseinflüssen an ausgewählten Standorten als Bioindikationsmethode etabliert.

Beurteilungsschlüssel 1. Nadeljahrgang

Für die Untersuchung der Fichtennadelwachse im Rasterelektronenmikroskop wurde 1995 vom Umweltbundesamt in Kooperation mit der Universität für Bodenkultur ein standardisiertes Beurteilungsverfahren für die Wachsqualität des 1. Nadeljahrganges entwickelt. Dieser Beurteilungsschlüssel wurde im Laufe jährlich stattfindender Erhebungen dazu verwendet, anhand der damit möglichen Klassifizierung der Nadelwachse die jeweils aktuelle Umweltsituation in einem Untersuchungsgebiet darzustellen und ggf. Hinweise auf vorliegende Immissionseinflüsse zu geben. Aktuell deshalb, weil die Nadeln des 1. Nadeljahrganges durch ihre kurze Expositionszeit von rd. sechs Monaten (Mai bis zum Ende der Vegetationsperiode im September bzw. Oktober desselben Jahres) nur die Immissionseinflüsse in diesem Zeitraum widerspiegeln.

Beurteilungsschlüssel 2. Nadeljahrgang

Bis dato lag jedoch noch kein Beurteilungsschlüssel für die Wachsqualität des 2. Nadeljahrganges vor. Für Fragestellungen, wie beispielsweise über den Einfluß von Hausbrandimmissionen, von kalorischen Kraftwerken oder über die Auswirkung von Streusalzeinsatz auf Autobahnen auf die Fichtennadelwachse bietet sich die Untersuchung des 2. Nadeljahrganges an, der eine Winterperiode lang exponiert war. Ziel der vorliegenden Untersuchung war daher die Erarbeitung eines rasterelektronenmikroskopischen Beurteilungsverfahrens für den 2. Nadeljahrgang. Als Basis wurde das für den 1. Nadeljahrgang entwickelte Verfahren angewendet.

Es zeigte sich, daß der Beurteilungsschlüssel, der für die Klassifizierung der Wachsqualität von Fichtennadeln des 1. Nadeljahrganges entwickelt wurde, ohne daß eine Adaptierung notwendig ist, auch für die Beurteilung der Wachsqualität im 2. Nadeljahrgang verwendet werden kann.

Bei der Gesamtbeurteilung ist jedoch eine Korrektur – analog zu den Schwefelgrenzwerten in den Fichtennadeln (0,11% im 1. Njg, 0,14% im 2. Njg) erforderlich. Liegt ab einem Mittel-

wert von 2,0 für die Wachsqualität im 1. Nadeljahrgang eine leichte Beeinträchtigung vor, sind die Nadelwachse im 2. Nadeljahrgang ab einem Wert von 2,3 als leicht beeinträchtigt einzustufen.

Somit liegt ab nun eine erweiterte Bioindikationsmethode vor, die – unter Berücksichtigung der Grenzen – vielfältige Anwendungsmöglichkeiten bietet:

1. Nadeljahrgang

Anwendungen

- Charakterisierung aktueller Immissionseinflüsse
- Dokumentation von Belastungsveränderungen an Standorten anhand von Zeitreihen

Vorteile

- Geringere mechanische Beeinträchtigung
- Geringere Gefahr der Überlagerung mit immissionsbedingten Nadelwachsveränderungen

2. Nadeljahrgang

Anwendung

- Charakterisierung winterlicher Immissionseinflüsse

Vorteil

- Deutlichere Ausprägung immissionsbedingter Veränderungen

Nachteile

- Höhere Gefahr mechanischer Beeinträchtigung
- Höhere Gefahr der Überlagerung mit immissionsbedingten Veränderungen

Kombination 1. und 2. Nadeljahrgang

Anwendungen

- Höherer Informationsgehalt in Gebieten mit wenigen verfügbaren Standorten
- Standorte mit nicht eindeutig immissionsbedingten Veränderungen im 1. Nadeljahrgang

1 EINLEITUNG

1.1 Die Wachsqualität von Fichtennadeln

Epicuticularwachse bilden die äußerste Schichte von Fichtennadeln und sind primäre Angriffspunkte für Umwelteinflüsse. Über den eingesenkten Spaltöffnungen, den Atmungsorganen der Nadel, ist diese Wachsschicht als dichtes Geflecht von Wachsröhrchen ausgebildet. Dieses Maschenwerk wirkt gleichsam wie ein Filter und unterstützt dadurch die Funktion der Spaltöffnungen (Regulation des Gasaustausches bei der Photosynthese und Atmung, Schutz vor übermäßiger Verdunstung).

Die sehr sensiblen Epicuticularwachse unterliegen einem natürlichen Alterungsprozeß. Witterungseinflüsse, wie Wind, Regen oder Schnee, denen die Nadeln über mehrere Jahre hindurch ausgesetzt sind, führen allmählich zu Veränderungen (Verschmelzungen und Erosion) der Wachsröhrchen. Solcherart durch mechanische Beeinflussung veränderte Wachsstrukturen sind durch Rekristallisationseffekte gekennzeichnet (BERMADINGER-STABENTHEINER, 1994), wodurch sie von Immissionsschäden unterschieden werden können.

Vor allem anthropogene Luftschadstoffe können die Mikrostruktur dieser Nadelwachse erheblich beeinträchtigen. Mit Hilfe des Rasterelektronenmikroskops (REM) können diese Wachsstrukturen untersucht und Veränderungen dokumentiert werden. Zahlreiche Studien zeigen übereinstimmend, dass jede Beeinflussung durch Immissionen den natürlichen Verwitterungsprozeß der Nadelwachse im Freiland beschleunigt (z.B.: HUTTUNEN & LAINE, 1983; CROSSLEY & FOWLER, 1986; HAFNER, 1986; KARHU & HUTTUNEN, 1986; SAUTER ET AL., 1987; TRIMBACHER, 1991). Neben gasförmigen Luftschadstoffen können ebenso luftgetragene Stäube in der Nähe von Emissionsquellen die Wachsstrukturen schädigen (z.B.: alkalischer Magnesitstaub - BERMADINGER ET AL., 1987) oder die Spaltöffnungen vollständig bedecken, wodurch deren Funktion erheblich beeinträchtigt werden kann (TRIMBACHER & DITRICH, 1989).

1.2 Beurteilungsschlüssel für den 1. Nadeljahrgang

Zur quantitativen Erfassung struktureller Veränderungen von Fichtennadelwachsen wurde im Rahmen einer Studie des Umweltbundesamtes eine Klassifizierungsmethode für das Rasterelektronenmikroskop entwickelt (TRIMBACHER ET AL., 1995, TRIMBACHER & ECKMÜLLNER, 1997). Dieses Beurteilungsverfahren beruht auf einer Einteilung der im REM beobachtbaren Mikrostrukturen der Stomatawachse, d.h. der über den eingesenkten Spaltöffnungen befindlichen Wachse (Grad der Wachsverschmelzung in Prozent der Gesamtstomatafläche) in fünf Qualitätsklassen. Dieser Beurteilungsschlüssel wurde für Fichtennadeln des ersten, noch nicht überwinterten Nadeljahrganges entwickelt.

Durch die Standardisierung des Beurteilungsverfahrens sind vergleichbare Ansprachen der Wachsqualität von Fichtennadeln möglich. Somit ist eine sensible und effiziente Bioindikationsmethode gegeben, welche sowohl als Monitoringinstrument zur Früherkennung von Schadstoffeinflüssen anwendbar ist als auch zur Charakterisierung von veränderten Belastungssituationen vor allem in Untersuchungsgebieten im Einflußbereich von Emittenten.

1.3 Adaptierung des Beurteilungsschlüssels für den 2. Nadeljahrgang

Die Untersuchung der Nadelwachse des 1. Nadeljahrganges gibt primär Auskunft über den aktuellen Schadstoffeinfluß auf Fichtennadeln in einem Untersuchungsgebiet. Die jeweils diesjährigen Nadeln, die im Frühjahr austreiben, werden am Ende der Vegetationsperiode im Oktober nach rd. sechs Monaten Expositionszeit geworben.

Um den Einfluß von winterlichen Immissionen, wie beispielsweise aus dem Hausbrand, von kalorischen Kraftwerken, Streusalzeinsatz auf Autobahnen, auf die Nadelwachse erfassen zu können, ist die Beurteilung des zweiten, bereits eine Winterperiode exponierten Nadeljahrganges notwendig.

Es war daher naheliegend, das bereits vorhandene, standardisierte Beurteilungsverfahren für den 1. Nadeljahrgang als Basis für die vorliegende Studie zu verwenden. Dabei galt es zu überprüfen, ob der für den 1. Nadeljahrgang entwickelte Beurteilungsschlüssel zur Bestimmung der Wachsqualität von Fichtennadeln auch für den 2. Nadeljahrgang geeignet ist oder ob und in welcher Weise eine Adaptierung des bereits vorhandenen Beurteilungsverfahrens vorgenommen werden muß.

2 PROBENAHME UND STANDORTSAUSWAHL

Die Probenahme von Fichtennadeln des 1. und 2. Nadeljahrganges 1997 bzw. 1998 an den Untersuchungsstandorten erfolgte gemäß den Bestimmungen der 2. Verordnung gegen forstschädliche Luftverunreinigungen durch Mitarbeiter der jeweils zuständigen Landesforstdienste in den Monaten Oktober und November 1997 bzw. 1998. Das Nadelmaterial wurde dem Umweltbundesamt auf dem Postweg übermittelt.

Um feststellen zu können, ob und inwieweit Witterungseinflüsse, die besonders in der Winterperiode auf die Nadeln einwirken (z.B. Schnee, Rauheif), Immissionsbelastungen verstärken oder überlagern, wurden Bäume aus unterschiedlich belasteten Gebieten ausgewählt und folgenden drei Standortgruppen zugeordnet:

- Unbelastete Hintergrundstandorte
- Standorte mit winterlicher Immissionsbelastung
- Standorte mit ganzjähriger Immissionsbelastung

Die primäre Zuordnung der Fichten zu den drei genannten Standortgruppen erfolgte auf Basis ihrer Lage zu den Emittenten. Anhand der Nadelspiegelwerte, vor allem der Schwefelgehalte der Nadeln, die im Rahmen des Österreichischen Bioindikatornetzes jährlich erhoben werden, wurde die Richtigkeit der Zuordnung überprüft.

Unbelastete Hintergrundstandorte lagen in großer Entfernung zu Punktquellen, Straßen und Siedlungen. Alle Schwefelgehalte im 1. Nadeljahrgang lagen unter dem Grenzwert der 2. Verordnung gegen forstschädliche Luftverunreinigungen von 0,11% S (WOHANKA & STÜRZENBECHER, 1989).

Standorte mit winterlicher Immissionsbelastung wiesen ebenfalls, wie die Hintergrundstandorte, Schwefelgehalte von max. 0,11% im 1. Nadeljahrgang auf. Sie lagen außerhalb des Einflusses von industriellen Emissionsquellen, waren aber durch den winterlichen Hausbrand und/oder verkehrsbedingte Emissionen beeinflusst.

Standorte mit ganzjähriger Immissionsbelastung lagen im Nahbereich von Industrieanlagen und hatten durchwegs Schwefelgehalte von 0,11% bis 0,17% in den Nadeln, die über dem Grenzwert der 2. Verordnung gegen forstschädliche Luftverunreinigungen lagen.

3 METHODEN

3.1 Rasterelektronenmikroskopie

Für die Untersuchungen mit dem Rasterelektronenmikroskop wurden die Fichtennadeln im Labor bei Raumtemperatur (ca. 20° C) in Papierkuverts über Silicagel luftgetrocknet. Dadurch wurde eine mögliche Entstehung von Schimmelpilzen bei der Lagerung des Nadelmaterials vermieden. Nach dem Lufttrocknen wurden insgesamt 24 Nadeln der jeweiligen Ausgangsprobe auf sechs Aluminium-Trägertischchen montiert und mit einer leitenden Goldschicht versehen (5 Min., 1.8×10^{-2} bar, 16-20 mA). Die Entnahme des Nadelmaterials erfolgte rein zufällig. Bei der Untersuchung der Stomatawachse im REM wurde stets eine Beschleunigungsspannung von 15 keV und eine Standardvergrößerung von 2000fach gewählt. Mittels röntgenenergie-dispersiver Mikroanalyse (EDX) wurde die elementare Zusammensetzung anhaftender Fremdpartikel (Staub, Kristalle) bestimmt.

3.1.1 Bestimmung der Wachsqualität

In der vorliegenden Studie wurden als erster Schritt sowohl die Nadelwachse des 1. als auch des 2. Nadeljahrganges mit dem gleichen Beurteilungsverfahren untersucht, welches für den 1. Nadeljahrgang bereits entwickelt wurde. Zum besseren Verständnis sind in den folgenden Kapiteln 3.1.1.1 und 3.1.1.2 die wesentlichsten Kriterien bzw. Untersuchungsschritte dieses Beurteilungsverfahrens angeführt.

Um den subjektiven Aspekt bei der Evaluierung der Wachsqualität im Rasterelektronenmikroskop bzw. eine Vorinterpretation zu vermeiden, wurde eine „Codierung“ vorgenommen. Das bedeutet, dass die Bewertungen im Rasterelektronenmikroskop ohne vorherige Kenntnis des Nadeljahrganges und der Standortsgruppe (unbelasteter Hintergrund, Ganzjahresimmission, winterliche Immissionen) durchgeführt wurden.

Bekanntlicherweise wirken mechanische Einflüsse (z.B.: Schnee, Frost) verstärkt im Winter auf die Nadeln. Vor Beginn der Untersuchungen war es jedoch noch ungeklärt, ob sich die Witterungseinflüsse des Winters dahingehend auswirken, dass im 2. Nadeljahrgang intakte Wachsstrukturen entsprechend Qualitätsklasse 1 (siehe Abb. 1a) vollständig fehlen. Bei der Beobachtung im Rasterelektronenmikroskop zeigte sich jedoch, dass auch die Nadelwachse des 2. Nadeljahrganges, wenn auch vergleichsweise weniger, durchwegs intakte Wachsmikrostrukturen aufwiesen. Hätte sich hingegen herausgestellt, dass im 2. Nadeljahrgang unbeeinträchtigte Wachsstrukturen nicht mehr vorkommen, wäre als zweiter Schritt eine geänderte Beurteilung der Qualitätsklassen 2, 3 und 4 vorzunehmen gewesen. Auf diesen in der ursprünglichen Konzeption vorgesehenen Arbeitsschritt konnte verzichtet werden.

3.1.1.1 Beurteilungskriterien

Für die Beurteilung der Wachsqualität von Fichtennadeln wurde ausschließlich das Stomatawachs herangezogen. Das zwischen den Spaltöffnungen befindliche Nadelwachs wurde dabei nicht berücksichtigt. Zur Beurteilung der Wachsqualität und Einteilung in die einzelnen Qualitätsklassen wurden zwei Kriterien, der Verschmelzungsgrad in % der Gesamtstomatafläche und die Art der Wachsverschmelzung gewählt.

Intaktes Stomatawachs besteht aus einem dichten Geflecht von Wachsröhrchen, das die über den eingesenkten Schließzellen befindliche sog. äußere Atemhöhle, auch epistomatärer Hohlraum genannt, auskleidet (Abb. 1a). Erste Strukturveränderungen der Epicuticularwachse äußern sich in kleinflächigen, apikal beginnenden Fusionen einzelner bzw. einiger weniger Wachstubuli (Abb. 1b). In weiterer Folge können netzartige Wachsverschmelzungen beobachtet werden (Abb. 1c), die in manchen Fällen die gesamte Stomatafläche bedecken können. Allgemein wirken die Wachsstrukturen kürzer und gedrungen. In einer fortgeschrittenen Degradationsstufe treten vermehrt großflächige Aggregationen, sog. Wachsplatten auf (Abb. 1d).

Zur Quantifizierung der epistomatären Nadelwachsveränderungen mit dem REM wurden fünf Qualitätsklassen definiert:

Qualitätsklasse 1: Diese bezeichnet intakt ausgebildetes Stomatawachs mit deutlich sichtbaren Einzelfilamenten. Maximal an 10% der Gesamtstomatafläche sind beginnende apikale Fusionen einzelner Wachsfäden zu erkennen.

Qualitätsklasse 2: Mehrere solcher an ihren Enden miteinander verschmolzenen Wachstubuli können in weiterer Folge an verschiedenen Stellen im Spaltöffnungsbereich zu kleinflächigen Aggregationen, sog. „Wachstufen“ fusionieren, die mehr als 10% bis max. 25% der Gesamtstomatafläche einnehmen.

Qualitätsklasse 3: Neben den Wachstufen treten auch großflächigere Wachsverplattungen auf, die zusammen mit diesen über 25% bis zu 50% der Gesamtstomatafläche bedecken. Weist das Stomatawachs zu 100% netzartige Aggregationen, aber noch keine Wachsplatten auf, so ist eine derartige Wachsmorphologie ebenfalls der Qualitätsstufe 3 zuzuordnen.

Qualitätsklasse 4: Diese bezeichnet einen fortgeschrittenen Verschmelzungsgrad des Stomatawachses. Mehr als 50% bis max. 75% der Gesamtstomatafläche sind durch kleinflächige Wachsaggregationen und/oder großflächige Wachsplatten gekennzeichnet.

Qualitätsklasse 5: Mehr als 75% der Gesamtstomatafläche weisen plattenartige Wachsverschmelzungen auf, d.h. der epistomatäre Raum ist fast zur Gänze oder sogar vollständig von einer amorphen Wachskruste ausgekleidet.

Sonderklasse 6: In dieser Klasse werden jene Spaltöffnungen zusammengefaßt, die entweder durch das Fehlen jeglicher Wachsstruktur gekennzeichnet sind oder deren Bewertung durch das Auftreten eines dichten Staubüberzuges oder durch massiven Befall von Pilzen, Algen und ähnlichen pflanzlichen oder tierischen Mikroorganismen nicht möglich ist (Abb. 1e, 1f). Fremdpartikel, die in die Spaltöffnung eindringen, können diese entweder vollständig verschließen oder offen halten, wodurch es zu einer Störung des Schließmechanismus kommen kann. Derartige „Sonderfälle“ werden bei der Bildung des Standortsmittels nicht berücksichtigt. Es handelt sich dabei jedoch um eine wichtige Zusatzinformation, die zur Beurteilung eines Standortes herangezogen wird.

3.1.1.2 Beurteilungsverfahren im Rasterelektronenmikroskop

Basierend auf einer umfangreichen statistischen Auswertung wurde folgendes Erhebungsdesign erstellt: Es werden 72 Spaltöffnungen, d.h. drei zufällig ausgewählte Spaltöffnungen (eine Spaltöffnung von der Nadelbasis, eine von der Nadelmitte sowie eine von der Nadelspitze) auf 24 Nadeln pro Standort bewertet. Die Beurteilung der Wachsqualität jeder einzelnen Spaltöffnung erfolgt stets unter Zuhilfenahme einer aus neun quadratischen, gleich großen Einzelfeldern bestehenden Rasterfolie, die über den Bildschirm des REMs und damit über das Bild der Spaltöffnung gelegt wird. Dabei wird jedes der je nach Spaltöffnungsgröße maximal 9 Einzelfelder dieses Rasters nach den 5 Qualitätsklassen und auch gegebenenfalls entsprechend Sonderklasse 6 des Schlüssels für die gesamte Spaltöffnung angesprochen. Der aus den bis zu 9 Einzelbeurteilungen resultierende Mittelwert gibt die mittlere Wachsqualität der Spaltöffnung wieder. Das Standortsmittel (= mittlere Wachsqualität) und die Standardabweichung werden aus diesen 72 Mittelwerten gebildet. Die relativ große Anzahl an Beurteilungen, beruhend auf einer Ordinalskala (jedoch im ursprünglichen Sinn eigentlich eine Intervallskala - Prozentsatz der Wachsverschmelzungen) erlauben bzw. ermöglichen die Umgehung der parameterfreien Statistik, da bei dieser Anzahl der zentrale Grenzwertsatz bereits Gültigkeit hat.

Eine detaillierte Beschreibung des Beurteilungsverfahrens der rasterelektronenmikroskopischen Bestimmung der Wachsqualität von Fichtennadeln findet sich in TRIMBACHER ET AL., 1995 sowie TRIMBACHER & ECKMÜLLNER, 1997.

Alle statistischen Tests wurden mit dem Programmpaket SAS Institute (1987) durchgeführt.

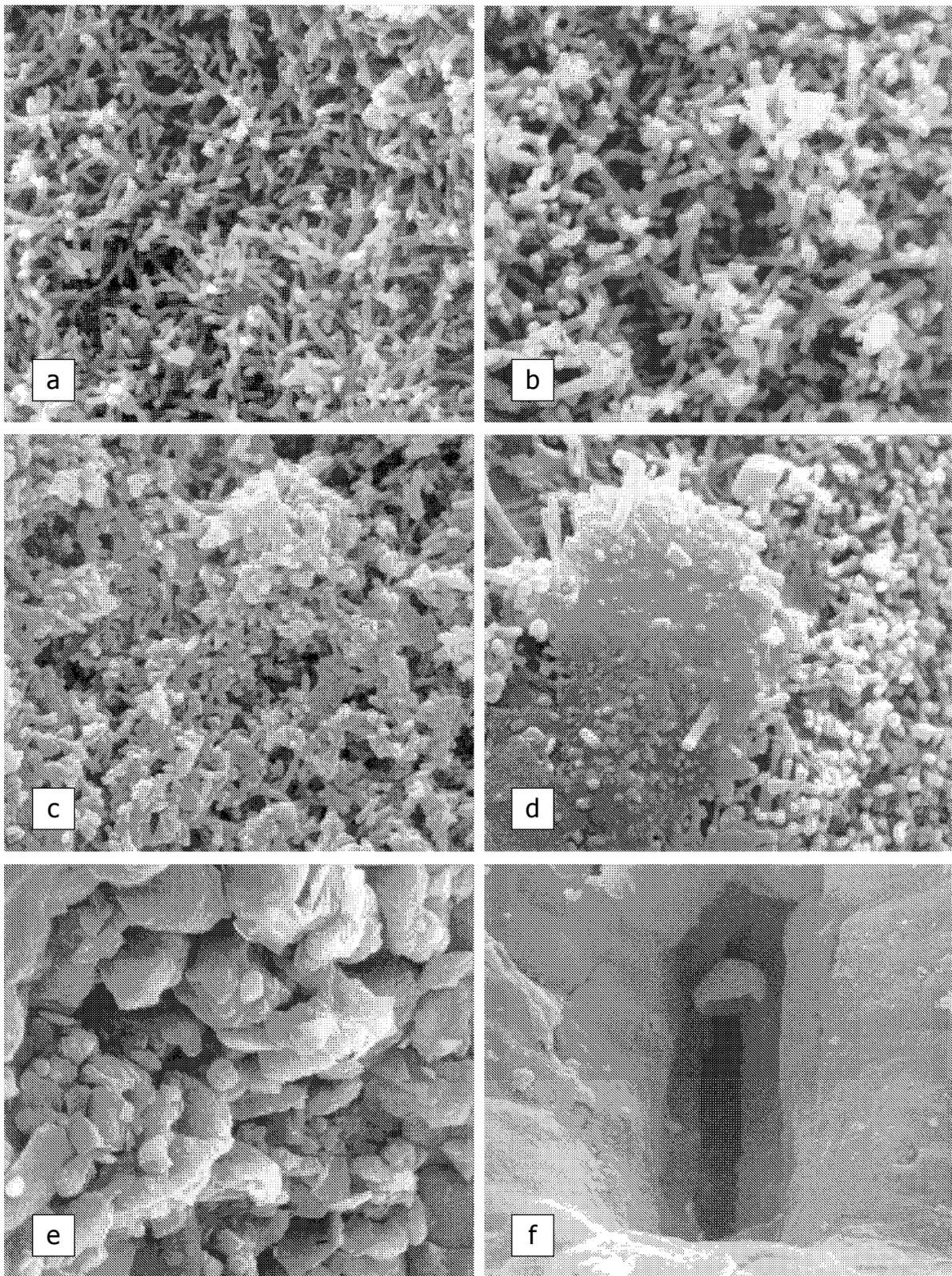
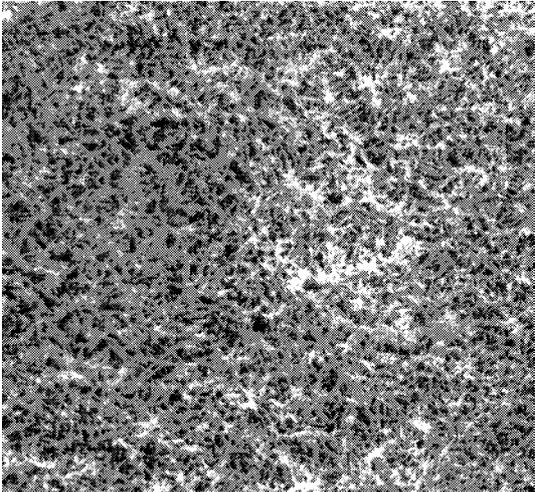
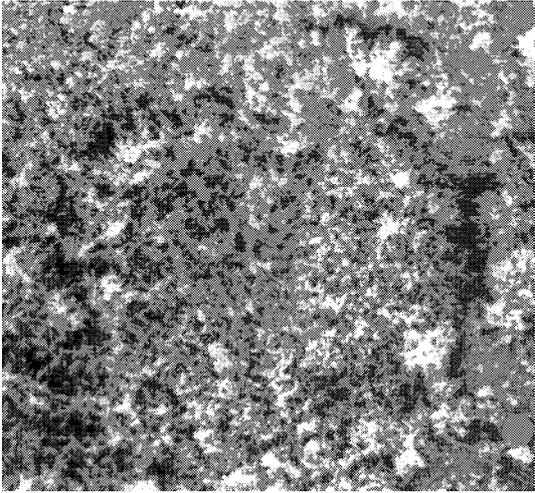
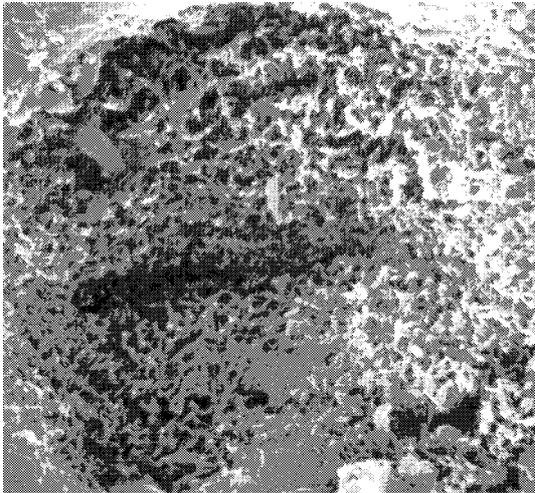


Abb. 1: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen unterschiedlicher Ausbildungsformen der Stomatawaxse bei der Fichte. Intakte Wachsröhrchen (1a), kleinflächige Wachsfusionen (1b), netzartige Wachsstrukturen (1c), Wachsplatte (1d), Staubbelaag (1e), vollständig kahle Spaltöffnung (1f). Abb. 1a-1d: Vergrößerung ca. 7000fach, Abb. 1e, 1f: 3000fach.

Qualitäts- klasse	Beurteilung des Stomatawachses	Typisches Erscheinungsbild im REM, 2000x
1	<p>Null bis max. 10 % der Stomatafläche weisen eine beginnende apikale Verschmelzung einzelner Wachsfilamente auf.</p> <p>Ein derartiges Erscheinungsbild mit intakter Mikromorphologie der Epicuticularwachse ist für einjährige Nadeln aus unbelasteten Gebieten charakteristisch.</p>	
2	<p>Mehr als 10 bis max. 25% der Stomatafläche weisen verschmolzene Wachsstrukturen auf.</p>	
3	<p>Mehr als 25 bis max. 50 % des Stomatawachses sind verschmolzen.</p>	

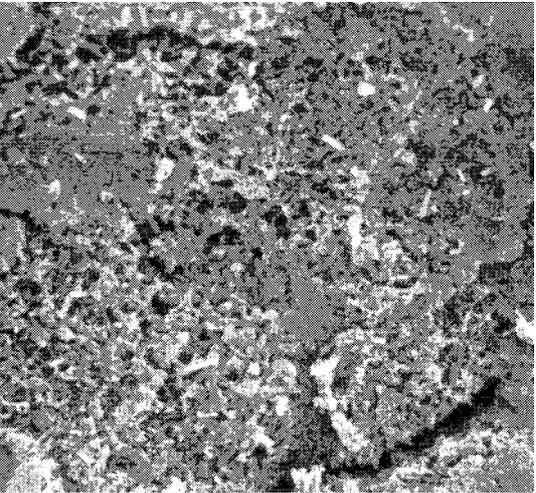
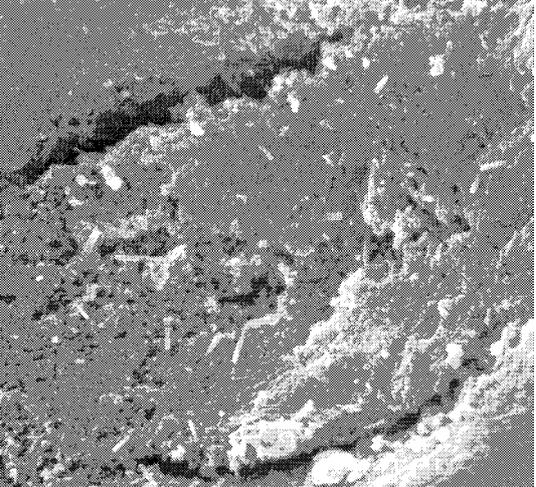
Qualitäts- klasse	Beurteilung des Stomatawachses	Typisches Erscheinungsbild im REM, 2000x
4	Mehr als 50 bis max. 75 % der Stomatafläche weisen plattenartig verschmolzene Wachsstrukturen auf.	
5	Mehr als 75 bis 100 % der Stomatafläche weisen verschmolzene Wachsstrukturen auf, d.h. die Spaltöffnung ist fast zur Gänze von einer amorphen Wachskruste überzogen.	

Abb. 2: Beurteilungsschlüssel zur Klassifizierung der stomatären Wachsqualität bei der Fichte.

4 ERGEBNISSE

4.1 Ergebnisse der Nadeluntersuchungen

4.1.1 Unbelastete Hintergrundstandorte

An den untersuchten Hintergrundstandorten lag die Wachsqualität der Fichtennadeln im

1. Nadeljahrgang zwischen 1,8 und 2,4 (siehe Tab. 1). Für die Nadeln des
2. Nadeljahrganges wurden Werte zwischen 2,2 und 3,0 ermittelt.

Die schlechtere Wachsqualität an zwei Standorten im 2. Nadeljahrgang läßt sich auf mechanische Beeinträchtigungen, die durch Abrieb der Oberflächenwachse aufgrund von verschiedenen Witterungseinflüssen entstehen, zurückführen. Mechanisch bedingte Beeinträchtigungen der Wachstrukturen weisen im Unterschied zu immissionsbedingten Veränderungen charakteristischerweise rekristallisierte Wachstubuli auf. Somit ist aufgrund des Erscheinungsbildes der Wachsmikrostruktur eine Differenzierung möglich.

Tab. 1: Gegenüberstellung der Wachsqualität von Fichtennadeln (Mittelwert \pm Standardabweichung) des 1. und 2. Nadeljahrganges von unbelasteten Hintergrundstandorten.

HINTERGRUND	
Wachsqualität 1. Nadeljahrgang	Wachsqualität 2. Nadeljahrgang
1,8 \pm 0,35	2,2 \pm 0,58
2,3 \pm 0,64	2,4 \pm 0,27
2,4 \pm 0,74	2,4 \pm 0,63
2,2 \pm 0,35	3,0 \pm 0,79
1,9 \pm 0,34	2,3 \pm 0,41
2,2 \pm 0,76	2,5 \pm 0,44
2,2 \pm 0,77	2,8 \pm 1,07

4.1.2 Standorte mit winterlicher Immissionsbelastung

Die Wachsqualität im 1. Nadeljahrgang an den untersuchten Standorten mit winterlicher Immissionsbeeinflussung lag im Bereich von 1,6 bis 2,2.

Für die Nadeln des zweiten, bereits einmal überwinterten Nadeljahrganges lagen die Mittelwerte der Wachsqualität im Bereich von 2,0 bis 2,7 (siehe Tab. 2).

Tab. 2: Gegenüberstellung der Wachsqualität von Fichtennadeln (Mittelwert \pm Standardabweichung) des 1. und 2. Nadeljahrganges von Standorten mit winterlicher Immissionsbeeinflussung.

WINTERLICHE IMMISSION	
Wachsqualität 1. Nadeljahrgang	Wachsqualität 2. Nadeljahrgang
2,2 \pm 0,98	2,7 \pm 0,58
2,1 \pm 1,23	2,2 \pm 0,65
2,0 \pm 0,49	2,5 \pm 0,57
1,6 \pm 0,36	2,0 \pm 0,52
1,9 \pm 0,74	2,0 \pm 0,57
1,7 \pm 0,46	2,0 \pm 0,59

4.1.3 Standorte mit ganzjähriger Immissionsbelastung

Die Wachsqualität an den Untersuchungsstandorten mit ganzjähriger Immissionsbeeinflussung lag im 1. Nadeljahrgang im Bereich von 2,1 und 2,4. An allen Standorten war die Wachsqualität im 1. Nadeljahrgang, im Gegensatz zu den beiden Kategorien Hintergrund und winterlicher Immissionseinfluß, leicht beeinträchtigt. Fichtennadeln des 2. Nadeljahrganges wiesen eine Wachsqualität im Bereich von 2,4 und 2,9 auf.

Tab. 3: Gegenüberstellung der Wachsqualität von Fichtennadeln (Mittelwert \pm Standardabweichung) des 1. und 2. Nadeljahrganges von Standorten mit ganzjähriger Immissionsbelastung.

GANZJAHRESIMMISSION	
Wachsqualität 1. Nadeljahrgang	Wachsqualität 2. Nadeljahrgang
2,1 \pm 0,55	2,8 \pm 0,61
2,3 \pm 0,70	2,5 \pm 0,66
2,2 \pm 0,56	2,8 \pm 0,86
2,4 \pm 0,98	2,7 \pm 0,69
2,4 \pm 0,71	2,9 \pm 0,66
2,1 \pm 0,57	2,5 \pm 0,48
2,4 \pm 0,71	2,8 \pm 0,53
2,2 \pm 0,83	2,4 \pm 0,60
2,4 \pm 0,52	2,7 \pm 0,57
2,1 \pm 0,43	2,6 \pm 0,60

4.2 Ergebnisse der statistischen Auswertungen

Es wurden verschiedene statistische Verfahren angewendet, um die Eignung des bestehenden Beurteilungsschlüssels für den 2. Nadeljahrgang zu testen und sofern möglich, um auch Vorteile bzw. Nachteile der beiden Jahrgänge aufzuzeigen und gegenüberzustellen.

Für die statistische Auswertung der Ergebnisse wurden die Standorte ursprünglich in die drei Kategorien Hintergrund, winterliche Immission und Ganzjahresimmission eingeteilt. Da sich jedoch zeigte, dass sich die Hintergrundstandorte und die Standorte mit winterlichem Immissionseinfluß hinsichtlich der Wachsqualität nicht signifikant voneinander unterschieden und auch keine signifikant erhöhten Schwefelwerte im 2. Nadeljahrgang an den Standorten mit winterlichem Immissionseinfluß gegenüber den Hintergrundstandorten festzustellen waren, wurden die beiden genannten Kategorien zu einer gemeinsamen Gruppe vereinigt und für die weiteren statistischen Tests der Gruppe „Ganzjahresimmission“ gegenübergestellt.

4.2.1 Streuungen

- Es zeigte sich für das gesamte Datenkollektiv, d.h. sowohl für die Hintergrund- als auch für alle immissionsbeeinflussten Standorte, dass bezüglich der ***Streuungen der Wachsqualität innerhalb eines Baumes kein signifikanter Einfluß des Nadeljahrganges*** zu erkennen war. Die mittlere Streuung innerhalb eines Baumes lag im 1. Nadeljahrgang bei $\pm 0,65$, im 2. Nadeljahrgang bei $\pm 0,61$, d.h. die Wachsqualität der 72 beurteilten Stomata pro Baum zeigte eine weitgehend gleiche Streuung im 1. wie im 2. Nadeljahrgang.
- Es wurde bezüglich der mittleren Streuung der Wachsqualität innerhalb eines Baumes ***keine signifikante Wechselwirkung zwischen Nadeljahrgang und Belastung*** festgestellt. Somit war die Streuung der Wachsqualität an belasteten Standorten im 1. wie im 2. Nadeljahrgang weitgehend gleich hoch.
- Der Zweigruppenvergleich ergab einen ***signifikanten Einfluß der Belastung*** auf die mittlere Streuung der Wachsqualität innerhalb eines Baumes. An unbelasteten Standorten lag die mittlere Streuung der Wachsqualität innerhalb eines Baumes bei $\pm 0,57$. An belasteten Standorten war sie deutlich höher und lag bei $\pm 0,69$.

4.2.2 Mittelwerte (Wachsqualität)

- Die statistische Auswertung für das gesamte Datenkollektiv ergab einen ***signifikanten Einfluß des Nadeljahrganges auf die Wachsqualität***. Das bedeutet, dass Nadeln des 1. Nadeljahrganges eine signifikant bessere Wachsqualität (Mittelwert 2,09) aufweisen, als Fichtennadeln des zweiten, einmal überwinterten Nadeljahrganges (Mittelwert 2,42).
- Im Zweigruppenvergleich zeigte sich hinsichtlich der Mittelwerte der Wachsqualität ***keine signifikante Wechselwirkung zwischen Nadeljahrgang und Belastung***. Immissionsbedingte Veränderungen wirken sich gleichermaßen auf die Nadelwachsstrukturen aus, unabhängig vom Nadeljahrgang. Dennoch ist eine immissionsbedingte Veränderung der Nadelwachsstrukturen im 2. Jahrgang deutlicher erkennbar.
- Weiters ergab der Zweigruppenvergleich eine ***signifikante positive Korrelation zwischen Wachsqualität und Belastung***. Die mittlere Wachsqualität lag an unbelasteten Hintergrundstandorten bei MW 2,10, an den belasteten Standorten bei MW 2,41 (Tab. 4).

Tab.4: Mittelwerte der Wachsqualität und Standardfehler (pooled) getrennt nach Nadeljahrgang (Njg) und Belastungsgruppen (unbel/bel) und deren Wechselwirkungen

Varianzursache	n	Mittelwert	Standardfehler	unteres Limit	oberes Limit
<i>gesamt</i>	46	2,25			
<i>Njg</i>					
1	23	2,09	0,0451	1,9977	2,1800
2	23	2,42	0,0451	2,3287	2,5110
<i>Bel</i>					
1 unbel.	26	2,10	0,0421	2,0143	2,1841
2 bel.	20	2,41	0,0480	2,3127	2,5063
<i>Njg/bel</i>					
1/1	13	1,96	0,0595	1,8384	2,0785
1/2	10	2,22	0,0678	2,0821	2,3449
2/1	13	2,24	0,0595	2,1200	2,3600
2/2	10	2,60	0,0678	2,4631	2,7369

4.2.3 Änderung der Wachsqualität im 2. Nadeljahrgang gegenüber dem 1. Nadeljahrgang

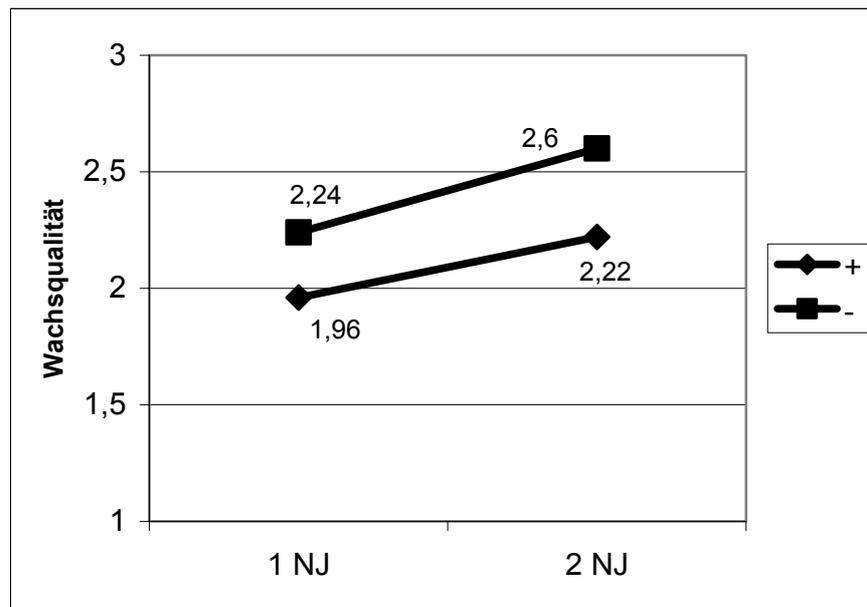
- Die statistischen Auswertungen ergaben hinsichtlich der **immissionsbedingten Mehrveränderung** (Verschlechterung) **der Wachsqualität im 2. Nadeljahrgang** gegenüber dem 1. Nadeljahrgang **keinen signifikanten Einfluß der Belastung**. Das bedeutet, dass obwohl die Änderung (allgemeine Verschlechterung der Wachsqualität im 2. Nadeljahrgang) für belastete Standorte im Mittel 0,381 beträgt und somit doch deutlich größer ist als jene der unbelasteten Standorte mit einem Mittel von 0,282, diese Differenzierung angesichts der nicht sehr hohen Stichprobenanzahl gerade nicht signifikant ist (Tab. 5, Abb. 3).

Tab. 5: Änderung der Wachsqualität vom 1. auf den 2. Nadeljahrgang getrennt nach Belastungsgruppen

Bel	n	Mittelwert	Standardfehler		
			(pooled s)	oberes Limit	unteres Limit
1 unbel.	13	0,282	0,0480	0,2110	0,3521
2 bel.	10	0,381	0,0547	0,3005	0,4615
<i>gesamt</i>	23	0,325			

- Insgesamt ist die **Änderung der Wachsqualität hochsignifikant von Null verschieden** (Mittelwert 0,325, Standardabweichung $\pm 0,176$, t-Wert 8.829***). Unabhängig davon, ob die Änderung der Wachsqualität mechanisch bedingt oder auf Immissionsbeeinflussung zurückzuführen ist, weisen Nadeln des 2. Nadeljahrganges eine schlechtere Wachsqualität auf.

Abb. 3: Graphische Darstellung der Änderung der Wachsqualität vom 1. auf den 2. Nadeljahrgang getrennt nach Belastungsgruppen. +...unbelastete Standorte, -...belastete Standorte



4.2.4 Mechanische Beeinträchtigungen

- Die statistischen Auswertungen ergaben einen **signifikanten Einfluß der mechanisch bedingten Beeinträchtigungen der Wachsqualität auf den Nadeljahrgang**. An Nadeln des 2., bereits einmal überwinterten Nadeljahrganges wurden deutlich mehr mechanische Veränderungen der Wachsstrukturen verzeichnet, als an Nadeln des 1. Nadeljahrganges. Dieses Ergebnis war zu erwarten, da bekanntlicherweise mechanische Einflüsse verstärkt im Winter auf die Nadeln wirken, und sich daher auch erwartungsgemäß deutlicher im 2. Nadeljahrgang zeigen.
- Weiters ergab **sich kein signifikanter Zusammenhang zwischen Nadeljahrgang und Belastung** hinsichtlich der mechanischen Beeinträchtigungen der Nadelwache.
- Die statistischen Auswertungen ergaben **keinen signifikanten Einfluß der Belastung**. An den unbelasteten Standorten (MW 4,90) war die mechanisch bedingte Veränderung der Nadelwachsstrukturen im 2. Jahrgang sogar stärker ausgeprägt als vergleichsweise an den belasteten Standorten (MW 3,17).
- Insgesamt war die **mechanisch bedingte Veränderung signifikant von Null verschieden** (Mittelwert 4,25, Standardabweichung $\pm 8,30$, t-Wert 2,05*).

5 FOLGERUNGEN

Die Ergebnisse der statistischen Tests lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- *Der Beurteilungsschlüssel, der für die Klassifizierung der Wachsqualität von Fichtennadeln des 1. Nadeljahrganges entwickelt wurde, kann, ohne dass eine Adaptierung notwendig ist, für die Beurteilung der Wachsqualität im 2. Nadeljahrgang verwendet werden.*

Bei der Gesamtbeurteilung ist jedoch eine Korrektur – analog zu den Schwefelgrenzwerten in den Fichtennadeln (0,11% im 1. Njg, 0,14% im 2. Njg) erforderlich. Liegt ab einem Mittelwert von 2,0 für die Wachsqualität im 1. Nadeljahrgang eine leichte Beeinträchtigung vor, sind die Nadelwachse im 2. Nadeljahrgang ab einem Wert von 2,3 als leicht beeinträchtigt einzustufen.

- *Mechanische Beeinträchtigungen, die durch verschiedene Witterungseinflüsse verursacht werden, wodurch es zu einem mechanischen Abrieb der Nadelwachse kommt, sind – im Hintergrund wie an belasteten Standorten - deutlich mehr im 2. Nadeljahrgang ausgeprägt.*

An belasteten Standorten kommt es statistisch gesehen auch im 2. Nadeljahrgang zu keiner Überlagerung der immissionsbedingten Veränderungen der Wachsstrukturen. Jedoch besteht an Nadeln des 2. Nadeljahrganges im Vergleich zu Nadeln des 1. Nadeljahrganges immer eine potentiell höhere Gefahr einer Überlagerung. Es kann nie vollständig ausgeschlossen werden, dass Witterungseinflüsse in der Winterperiode, die Jahr für Jahr unterschiedlich intensiv ausfallen können, Immissionsschäden überdecken.

- *Immissionsbedingte Veränderungen der Wachsqualität manifestieren sich deutlicher im 2. Nadeljahrgang.*

Analog zu den Schwefelgehalten der Nadeln, welche an belasteten Standorten im 2. Nadeljahrgang vergleichsweise höher liegen, ist auch die Wachsqualität der Fichtennadeln in immissionsbeeinflussten Regionen im 2. Nadeljahrgang schlechter.

Dennoch ist von einer standardmäßigen Untersuchung des 2. Nadeljahrganges anstelle des 1. Nadeljahrganges aus den oben genannten Gründen abzuraten.

- *Bei künftigen Untersuchungsprogrammen ist es sinnvoll, sowohl Nadeln des 1. als auch des 2. Nadeljahrganges zu werben.*

Dies gilt insbesondere für Regionen mit wenigen verfügbaren Standorten. Durch die zusätzliche Analyse des 2. Nadeljahrganges kann bei wenigen Standorten ein höherer Informationsgehalt über einen möglichen Immissionseinfluß erzielt werden.

Eine zusätzliche Untersuchung der Nadelwachse des 2. Nadeljahrganges in Ergänzung zum 1. Nadeljahrgang ist auch an denjenigen Standorten notwendig, an denen ein Immissionseinfluß im 1. Nadeljahrgang nicht eindeutig festgestellt aber auch nicht ausgeschlossen werden kann.

6 LITERATUR

- BERMADINGER, E.; GRILL, D.; GOLOB, P. (1987): Einfluß von Magnesitstäuben auf Fichtennadelwachse. *Phyton (Austria)* 27/1, 15-29.
- BERMADINGER-STABENTHEINER, E. (1994). Problems in interpreting effects of air pollutants on spruce epicuticular waxes. In: PERCY, K. E. (Hrsg.): *Air Pollutants and the Leaf Cuticle*. NATO ASI Series, Vol. G 36. Berlin, Heidelberg, Springer Verlag, 320-327.
- CROSSLEY, A. & FOWLER, D. (1986): The weathering of Scots pine epicuticular wax in polluted and clean air. *New Phytol.* 103, 207-218.
- HAFNER, L. (1986): Zur Feinstruktur der geschädigten Kiefernadel. *AFZ* 45, 1119-1121.
- HUTTUNEN, S. & LAINE, K. (1983): Effects of air-borne pollutants on the surface wax structure of *Pinus sylvestris* needles. *Ann. Bot. Fennici* 20, 79-86.
- KARHU, M. & HUTTUNEN, S. (1986): Erosion effects of air pollution on needle surfaces. *Water, Air & Soil Pollut.* 31, 417-423.
- SAS INSTITUTE (1987): *SAS/STAT Guide for personal computer*, version 6 ed. Cary, NC, 1028 pp.
- SAUTER, J. J.; KAMMERBAUER, H.; PAMBOR, L.; HOCK, B. (1987): Evidence for the accelerated micromorphological degradation of epistomatal waxes in Norway spruce by motor vehicle emissions. *Eur. J. For. Path.* 17, 444-448.
- TRIMBACHER, C. & DITRICH, H. (1989): Epicuticuläre Wachsstrukturen von Fichtennadeln als Indikatoren für Langzeitimmissionsbelastungen. UBA-Report-89-039, Umweltbundesamt Wien.
- TRIMBACHER, C. (1991): REM-Untersuchungen an Fichtennadeln besonders exponierter Standorte. VDI Berichte 901, 285-289.
- TRIMBACHER, C., ECKMÜLLNER, O., WEISS, P. (1995): Die Wachsqualität von Fichtennadeln österreichischer Hintergrundstandorte. UBA-M-057, Umweltbundesamt Wien.
- TRIMBACHER, C. & ECKMÜLLNER, O. (1997): A method for quantifying changes in the epicuticular wax structure of Norway spruce needles. *Eur. J. For. Path.* 27, 83-93.
- WOHANKA, E. & STÜRZENBECHER, K. (1989): *Forstgesetz 1975 in der Fassung der Forstgesetznovelle 1987*. Verlag der Österreichischen Staatsdruckerei, Wien.