

**FICHTENNADELUNTERSUCHUNGEN  
IN TIROL**

**RASTERELEKTRONENMIKROSKOPISCHE UND  
CHEMISCH-ANALYTISCHE ERGEBNISSE  
ZWISCHENBERICHT**



**FICHTENNADELUNTERSUCHUNGEN  
IN TIROL**

**Rasterelektronenmikroskopische und  
chemisch-analytische Ergebnisse**

**ZWISCHENBERICHT**

**BE-083**

Wien, März 1997

Bundesministerium für Umwelt, Jugend und Familie



**Autor:** Cristina Trimbacher

*Alle rasterelektronenmikroskopischen und chemisch-analytischen Untersuchungen wurden in den Labors des Umweltbundesamtes in Wien durchgeführt.*

*Wir danken den Mitarbeitern der Landesforstdirektion Tirol für die Probenahme und die freundliche Unterstützung.*

*Die immissionklimatologische Kurzcharakteristik des Raums Innsbruck (Kap. 3.1) wurde uns dankenswerterweise von Herrn Univ.-Doz. Dr. Vergeiner des Institutes für Meteorologie der Universität Innsbruck zur Verfügung gestellt.*

*Weiters möchten wir Frau Dr. Ida Pack für die Beschreibung der Standorte im Raum Innsbruck (Kap. 3.2) recht herzlich danken.*

**Impressum:**

Medieninhaber und Herausgeber: Umweltbundesamt, 1090 Wien, Spittelauer Lände 5

© Umweltbundesamt, Wien, März 1997

Alle Rechte vorbehalten  
ISBN 3-85457-363-4

## KURZFASSUNG

Nadelwachse sind sehr sensible Oberflächenstrukturen, die vor allem auf anthropogene Umwelteinflüsse durch Veränderungen ihrer Mikrostruktur reagieren können. Mit Hilfe des Rasterelektronenmikroskops können diese Wachsstrukturen untersucht und die Ergebnisse zur Dokumentation einer Belastungssituation eingesetzt werden. Daher werden Untersuchungen von Nadelwachsen bereits seit längerem zur Bioindikation herangezogen.

Fichtennadeln des 1. Nadeljahrganges 1995 von zwei Untersuchungsgebieten in Tirol mit unterschiedlicher Emissionscharakteristik wurden rasterelektronenmikroskopisch hinsichtlich des Erhaltungszustandes der Nadelwachse nach dem am UBA entwickelten Klassifizierungsverfahren untersucht. Wenn Staubpartikel oder Kristalle auf den Nadeloberflächen zu finden waren, wurde deren elementare Zusammensetzung mittels energiedispersiver Röntgenmikroanalyse (EDX) bestimmt. Weiters wurden chemische Nadelanalysen von Schwefel, zum Teil Chlor, Nährelementen und einigen ausgewählten Schwermetallen durchgeführt.

### Untersuchungsraum Innsbruck

Im Großraum Innsbruck wurden Fichtennadeln von insgesamt 12 Probepunkten untersucht. Acht dieser Standorte befinden sich entlang eines Nord-Süd-Profiles (Nordkette - Patscherkofel), weitere vier entlang eines Halbprofiles Richtung Süden (Wipptal). Die mittels Rasterelektronenmikroskop bestimmte Wachsqualität von Fichtennadeln im Raum Innsbruck lag im Bereich von MW 1,8 (unbeeinträchtigt) bis MW 2,5 (leicht beeinträchtigt). Ab einem Mittelwert von 2,0 kann eine beginnende Beeinflussung der Wachsstrukturen angenommen werden. An keinem der genannten Punkte wurden nennenswerte Mengen von Staubpartikeln auf den Nadeloberflächen, wie dies beispielsweise an industriell belasteten Standorten häufig zu beobachten ist, detektiert. Die chemischen Nadelanalysen ergaben für zehn der untersuchten Standorte Grenzwertüberschreitungen bei Schwefel und auch bei Chlor.

### Autobahnprofil Radfeld

An der A12 Inntalautobahn wurden Nadelproben entlang eines aus sieben Probepunkten bestehenden Querprofils in der Nähe von Rattenberg (Profil Radfeld) untersucht. Die Wachsqualität der untersuchten Fichtennadeln lag zwischen MW 1,9 (unbeeinträchtigt) und MW 2,3 (leicht beeinträchtigt). Der Einfluß des Autobahnverkehrs zeigt sich deutlich in der Belegung der Nadeloberflächen der drei der Fahrbahn am nächsten befindlichen Standorte mit Feinstaub und Gipskristallen. An allen sieben Probepunkten des Transekts wurden Grenzwertüberschreitungen bei Schwefel in den Nadeln verzeichnet. Die chemischen Analysen der verkehrsspezifischen Schwermetalle Cadmium und Blei in den Nadeln ergaben für die beiden nächstgelegenen Probepunkte die höchsten Blei-Werte aller untersuchten Nadeln des Profils.

**INHALTSVERZEICHNIS**

	<b>KURZ-ZUSAMMENFASSUNG</b> .....	<b>i</b>
<b>1</b>	<b>EINLEITUNG</b> .....	<b>1</b>
1.1	Nadelwachse und Bioindikation .....	1
1.2	Ziele der Arbeit .....	2
<b>2</b>	<b>METHODIK</b> .....	<b>3</b>
2.1	Probenahme und Probenvorbereitung .....	3
2.2	Beurteilungsmethode .....	4
2.2.1	Wachsmorphologie .....	4
2.2.2	Qualitätsklassen .....	4
2.2.3	Erhebungsdesign.....	6
2.3	Chemisch-analytische Methoden .....	6
<b>3</b>	<b>STADTPROFIL INNSBRUCK</b> .....	<b>11</b>
3.1	Lage und Klima.....	11
3.2	Umweltrelevante Angaben zm Untersuchungsgebiet.....	12
3.3	Ergebnisse der Nadeluntersuchungen .....	16
<b>4</b>	<b>AUTOBAHNPROFIL RADFELD</b> .....	<b>22</b>
4.1	Umweltrelevante Angaben zum Standort.....	22
4.2	Ergebnisse der Nadeluntersuchungen .....	25
<b>5</b>	<b>QUELENNACHWEIS</b> .....	<b>30</b>

## **1 EINLEITUNG**

### **1.1 NADELWACHSE UND BIOINDIKATION**

Wachse 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. Vor allem anthropogene Luftschadstoffe können die Mikrostruktur dieser Nadelwachse beeinträchtigen. Mit Hilfe des Rasterelektronenmikroskops (REM) können diese Wachsstrukturen sichtbar gemacht und Veränderungen (z. B.: Wachsverschmelzungen, Wachserosion) dokumentiert werden. Zahlreiche Untersuchungen 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 diesen 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 wird (TRIMBACHER & DITRICH, 1989). Daher werden Nadelwachse bereits seit längerem zur Bioindikation herangezogen.

Im Rahmen einer Studie des Umweltbundesamtes wurde eine Methode zur Klassifizierung von Nadelwachsverschmelzungen bei Fichten mit dem Rasterelektronenmikroskop entwickelt (TRIMBACHER ET AL., 1995). Diese Evaluierungsmethode beruht auf einer Einteilung der im REM beobachtbaren Strukturveränderungen der Stomatawachse, d. h. der über den eingesenkten Spaltöffnungen befindlichen Wachse (Grad der Wachsverschmelzung in Prozent der Gesamtstomatafläche) in fünf Qualitätsklassen. Die Standardisierung der Methode ermöglicht vergleichbare Ansprachen der Wachsqualität von Fichtennadeln.

## 1.2 ZIELE DER ARBEIT

Mit dieser Methode wurden in der vorliegenden Studie Fichtennadeln des 1. Nadeljahrganges 1995 zweier Standorte in Tirol untersucht um zu testen, inwieweit der Parameter der mittleren Wachsqualität zur Dokumentation der aktuellen Umweltsituation in der Umgebung von Emissionsquellen geeignet ist. Neben dem Großraum *Innsbruck* wurde ein *Autobahnprofil bei Rattenberg* an der Inntalautobahn (Profil „Radfeld“) für die Nadeluntersuchungen ausgewählt.

Die in diesem Zwischenbericht dargestellten Ergebnisse sind Teil eines umfangreichen österreichweiten Untersuchungsprogrammes, bei dem Fichtennadeln aus industriell belasteten Gebieten, aus urbanen Ballungsräumen, von Autobahnprofilen, sowie aus unbelasteten Hintergrundstandorten hinsichtlich ihrer Wachsqualität als auch ihrer Nadelgehalte an klassischen Schadstoffen wie Schwefel oder Chlor, der Nährelemente und ausgewählter Schwermetalle analysiert wurden. Der vorliegende Bericht beinhaltet noch keine Interpretation der Daten. Diese wird erst in einer Zusammenschau aller Ergebnisse des Untersuchungsjahres 1995 und nach einer umfangreichen statistischen Auswertung erfolgen und in einer eigenen Publikation des Umweltbundesamtes (Monographie oder Report) erscheinen.

## **2      *METHODIK***

### **2.1    PROBENAHEME UND PROBENVORBEREITUNG**

Die Probenahme von Fichtennadeln des 1. Nadeljahrganges 1995 an den Untersuchungsstandorten erfolgte gemäß den Bestimmungen der 2. Verordnung gegen forstschädliche Luftverunreinigungen und wurde durch Mitarbeiter der Landesforstdirektion Tirol durchgeführt. Die für die vorliegende Untersuchung ausgewählten Standorte sind Teile des Österreichischen Bioindikatornetzes (BIN). Vier Probepunkte im Untersuchungsgebiet Innsbruck wurden neu beerntet. Eine Mischprobe des 1. Nadeljahrganges von mehreren Ästen aus dem Lichtkronenbereich (7. Quirl) zweier benachbarter Fichten (vorherrschend und herrschend nach KRAFT, 1884) eines Standortes wurde geworben und dem Umweltbundesamt auf dem Postweg übermittelt.

Für die Untersuchungen mit dem Rasterelektronenmikroskop wurden die Fichtennadeln im Labor bei Raumtemperatur (ca. 20° C) in Papierkuverts über Silicagel luftgetrocknet. Dadurch wird eine mögliche Entstehung von Schimmelpilzen bei der Lagerung des Nadelmaterials vermieden. Anschließend wurden insgesamt 24 Nadeln der jeweiligen Ausgangsprobe auf sechs Aluminium-Trägertischchen montiert und mit einer leitenden Goldschicht versehen. 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. Die Klassifizierung der Nadelwachse bzw. Bestimmung der Wachsqualität erfolgte nach der im folgenden Kapitel beschriebenen Beurteilungsmethode. Mittels röntgenenergie-dispersiver Mikroanalyse (EDX) wurde die elementare Zusammensetzung anhaftender Fremdpartikel (Staub, Kristalle) bestimmt.

## **2.2 BEURTEILUNGSMETHODE**

### **2.2.1 Wachsmorphologie**

Für die Beurteilung der Wachsqualität von Fichtennadeln wurde ausschließlich das Stomatawachs von Nadeln des 1. Nadeljahrganges herangezogen. Das zwischen den Spaltöffnungen befindliche Nadelwachs wurde dabei nicht berücksichtigt. Die unterschiedlichen Ausbildungsformen und die verschiedenen Verschmelzungsgrade des epistomatären Wachses, wie sie im REM beobachtet werden können, werden im folgenden näher erläutert und photographisch dokumentiert. Dies ist deshalb notwendig, da diese Kriterien, nämlich der Verschmelzungsgrad in % der Stomatafläche sowie die Art der Wachsverschmelzung, den Definitionen der einzelnen Qualitätsklassen des Schlüssels zugrundegelegt sind.

Intaktes Stomatawachs besteht aus einem dichten Geflecht von Wachsröhrchen, das die über den beiden eingesenkten Schließzellen befindliche sog. äußere Atemhöhle, auch epistomatärer Hohlraum genannt, auskleidet (Abb. 1, S. 8). Erste Strukturveränderungen der Epicuticularwachse äußern sich in kleinflächigen, apikal beginnenden Fusionen einzelner bzw. einiger weniger Wachstubuli (Abb. 2, S. 8). In weiterer Folge können netzartige Wachsverschmelzungen beobachtet werden (Abb. 3, S. 8), die in manchen Fällen sogar die gesamte Stomatafläche bedecken können. Allgemein wirken die Wachsstrukturen kürzer und gedrungener. In einer fortgeschrittenen Degradationsstufe treten vermehrt großflächige Aggregationen, sog. Wachsplatten auf (Abb. 4, S. 8).

### **2.2.2 Qualitätsklassen**

Zur Quantifizierung der epistomatären Nadelwachsverschmelzungen mit dem REM wurden fünf Qualitätsklassen für den Grad der Wachsdegradation in Prozent der Stomatafläche des 1. Nadeljahrganges definiert. Dieser Beurteilungsschlüssel der Wachsqualität von Fichtennadeln ist mit rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen versehen, die für die jeweilige Qualitätsklasse charakteristisch sind (Abb. 7, S. 9 u. 10).

**Qualitätsklasse 1:** Diese bezeichnet ein intakt ausgebildetes Stomatawachs mit deutlich sichtbaren Einzelfilamenten, wie es für einjährige Nadeln aus unbelasteten Gebieten charakteristisch ist. Maximal an 10 % der Gesamtstomatafläche sind beginnende apikale Fusionen einzelner Wachsfäden zu erkennen.

**Qualitätsklasse 2:** Mehrere solcher an ihren Enden miteinander verschmolzenen Wachstuli können in weiterer Folge an verschiedenen Stellen im Spaltöffnungsbereich zu kleinflächigen Aggregationen, sog. "Wachstufen" fusionieren, die mehr als 10 % bis maximal 25 % der Gesamtstomatafläche ausmachen.

**Qualitätsklasse 3:** Neben den Wachstufen treten nun großflächigere Wachserplattungen 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 Wachsausbildung ebenso der Qualitätsstufe 3 zuzuordnen (Abb. 3).

**Qualitätsklasse 4:** Diese bezeichnet einen fortgeschrittenen Verschmelzungsgrad des Stomatawachses. Mehr als 50 % bis maximal 75 % der Gesamtstomatafläche sind durch kleinflächige Wachsaggregationen und 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 (Abb. 6, S. 8) oder deren Bewertung durch das Auftreten eines dichten Staubüberzuges (Abb. 5, S. 8) oder durch massiven Befall von Pilzen, Algen und ähnlichem biologischem Material nicht möglich ist. 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 Standortmittels nicht berücksichtigt (siehe 2.2.3 Erhebungsdesign). Es handelt sich dabei jedoch um eine wichtige zusätzliche Information, die bei der Beurteilung eines Standortes berücksichtigt wird.

### **2.2.3 Erhebungsdesign**

Es wurden 72 Spaltöffnungen, d. h. drei zufällig ausgewählte Spaltöffnungen (eine Spaltöffnung von der Nadelbasis, eine von der Nadelmittle sowie eine von der Nadelspitze) auf 24 Nadeln pro Standort bewertet. Die Beurteilung der Wachsqualität jeder einzelnen Spaltöffnung erfolgte stets unter Zuhilfenahme einer aus 9 Einzelfeldern bestehenden Rasterfolie, die über den Bildschirm des REMs, und damit über das Bild der Spaltöffnung gelegt wurde. Dabei wurde 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. Nach diesem Prinzip wurden 72 Spaltöffnungen pro Standort bewertet. Das Standortmittel (= mittlere Wachsqualität) und die Standardabweichung wurde aus diesen 72 Mittelwerten gebildet. Bewertungen entsprechend Sonderklasse 6 fließen jedoch nicht in die Mittelwertbildung ein, da daraus automatisch eine schlechtere Wachsqualität resultieren würde. 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.

## **2.3 CHEMISCH-ANALYTISCHE METHODEN**

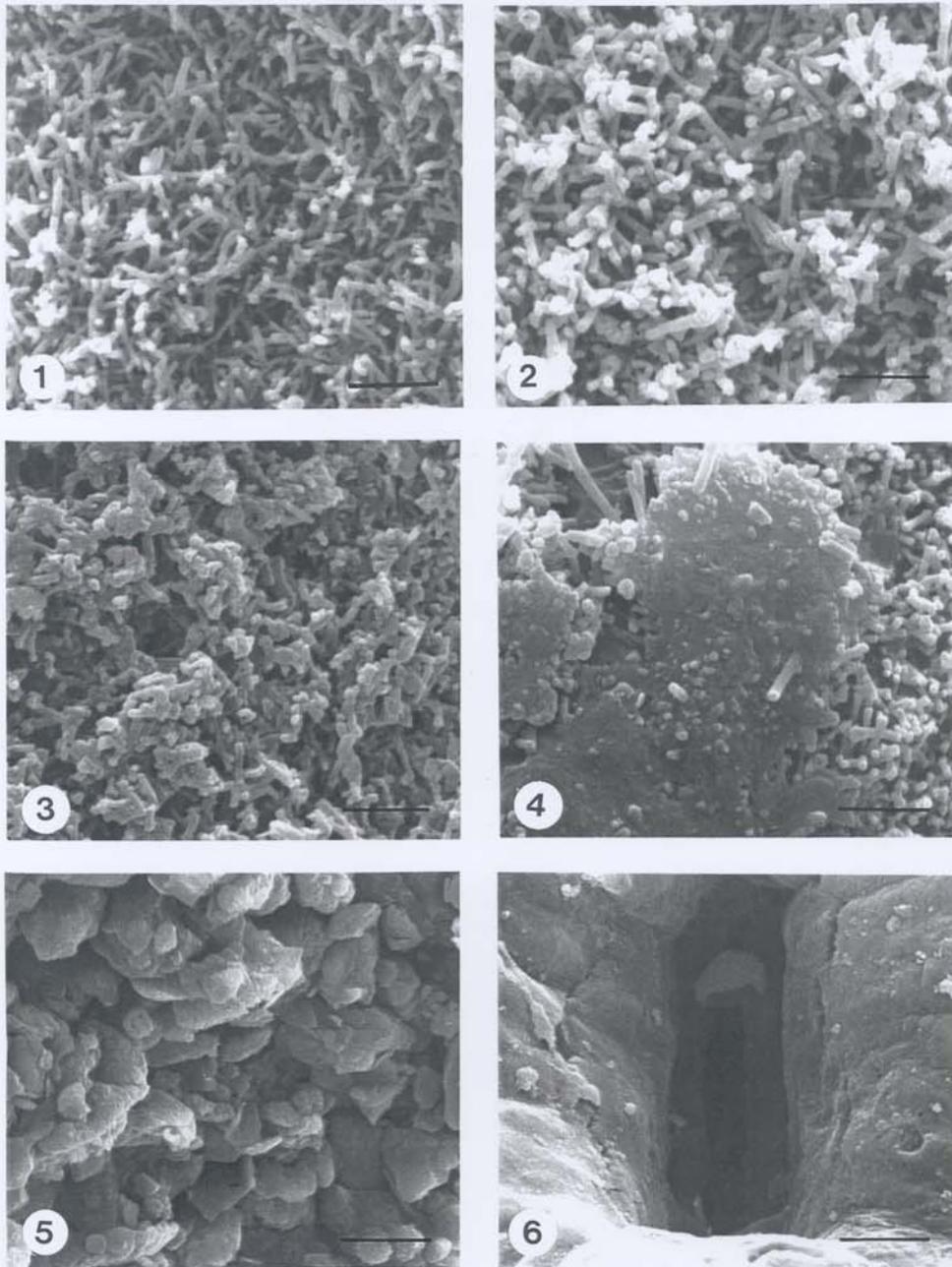
Zur Bestimmung der Schwefelgehalte der Nadeln wurden die Nadelproben bei 80° C im Umlufttrockenschrank getrocknet, von den Holzteilen befreit, anschließend vermahlen und vor der Analyse bei 105° C nachgetrocknet. Die Schwefelanalysen der Proben wurden mit einem LECO SC-132 Schwefelanalysator durchgeführt.

Für die Bestimmung des Chloridgehaltes wurden die Nadeln mit einem Salpetersäure-Eisessig-Gemisch extrahiert. Nach dem Filtrieren wurde der Chloridgehalt der Nadelproben elektrochemisch mit einem Chloridometer der Fa. Buchler bestimmt.

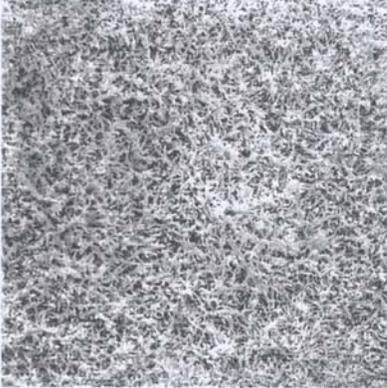
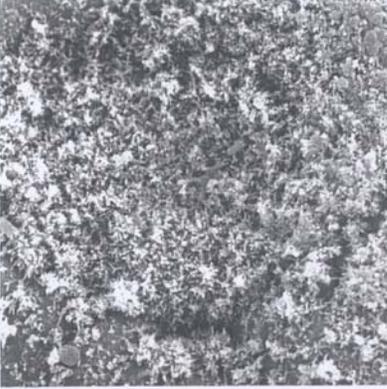
Die Bestimmung des Stickstoffgehaltes erfolgte nach Kjeldahl.

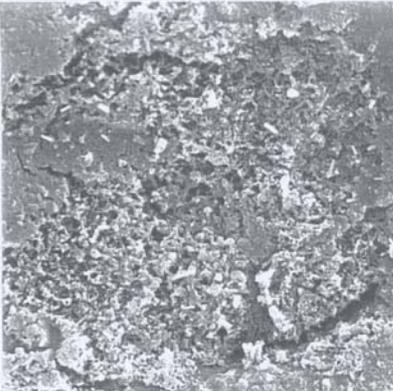
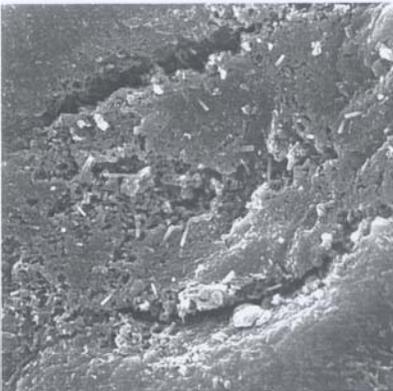
Für die Bestimmung der anderen Hauptnährelemente und der Schwermetalle wurden die Nadelproben bei 30° C getrocknet, vermahlen und anschließend mit einem Schwefelsäure-Salpetersäure-Gemisch aufgeschlossen. Die Analysen erfolgten mittels ICP-AES Gerät Optima 3000 XL (Fa. Perkin-Elmer) in Anlehnung an ÖNORM M 6279.

Alle Analysen wurden im Zentrallabor des Umweltbundesamtes durchgeführt. Alle Werte beziehen sich auf die bei 105°C getrocknete Nadelprobe.



*Abb. 1 - 6: REM-Aufnahmen unterschiedlicher Ausbildungsformen der Stomatawachse bei der Fichte. Intakte Wachsröhrchen (Abb. 1), kleinflächige Wachsfusionen (Abb. 2), netzartige Wachsstrukturen (Abb. 3), Wachsplatte (Abb. 4), Staubbelag (Abb. 5), vollständig kahle Spaltöffnung (Abb. 6). Abb. 1-4: Vergrößerungsmaßstab entspricht 2  $\mu\text{m}$ , Abb. 5, 6: Vergrößerungsmaßstab entspricht 5  $\mu\text{m}$ .*

Qualitätsklassen	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>	

Qualitätsklassen	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. 7: Schlüssel zur Klassifizierung von epistomatären Nadelwachsverschmelzungen bei der Fichte für den 1. Nadeljahrgang.*

### **3 STADTPROFIL INNSBRUCK**

#### **3.1 LAGE UND KLIMA**

Innsbruck liegt in der Mitte des hier beinahe in Ost-West-Richtung entlang der Alpennordseite verlaufenden Inntals. Charakteristisch für Wetter und Durchlüftung ist einerseits die hohe Abschirmung durch die Karwendelkette nach Norden hin, die im Mittel gut 1500 m über Talsohle beträgt und erst am Achenpaß bzw. an der Seefelder Senke unterbrochen wird, sodaß Kaltfronten aus dem Nordwest- bis Nordsektor trotz der Lage von Innsbruck nördlich des Alpenhauptkammes sich nicht in voller Stärke auswirken, sondern meist abgeschwächt und um einige Stunden verzögert von Osten her über das Unterinntal eindringen. Andererseits besteht über das Wipptal und den nur 30 km entfernten Brenner eine sehr tief eingeschnittene Paßverbindung nach der Alpensüdseite hin, die eine ca. 1500 m tiefe Schneise für dem „seichten Föhn“ bildet. Föhn in allen Varianten herrscht am Innsbrucker Talboden in nur ca. 5% aller Stunden, spielt aber trotzdem zusammen mit seinem regelmäßigen nächtlichen Vorläufer, dem „vorföhnigen Westwind“, eine bedeutsame Rolle bei der Durchlüftung der Talatmosphäre, speziell in den kritischen Jahreszeiten Herbst und Winter.

Bei wenig ausgeprägter Strömungslage (Hochdruckwetterlage) stellt sich im Inntal das klassische thermisch angeregte Talwindregime ein: Nächtlicher leichter Talauswind (WSW), Umschlag auf Taleinwind (ENE) etwa zwischen 9 Uhr (Sommer) und Mittag (Winter) und erneuter Umschlag auf Talaus etwa zwischen 15 Uhr (Winter) und 22 Uhr (Sommer). Der Nettotransport schadstoffreicher Stadtluft ist also im Sommer taleinwärts, im Winter talauswärts orientiert. Bemerkenswerterweise können lokale Unebenheiten auch am Talboden zu lokalen Unregelmäßigkeiten des Talwindregimes führen: als Beispiel seien die gelegentlichen nächtlichen Windkomponenten aus Ost in der bodennahen Schicht des Stadtgebietes von Hall genannt, die möglicherweise als Hangabwinde an einer Geländestufe bei Mils zu interpretieren sind. Auch sonst dürften entlang der nord- und südseitigen Hänge des Inntals lokale Kaltluftabflüsse ihre im Prinzip bekannte Rolle spielen. Was die Hangaufwinde betrifft, die bei Sonneneinstrahlung am späten Vormittag ihr Maximum erreichen, so scheint deren markantester Effekt in einer Art Querkirkulation zu den sonnenbeschienenen südexponierten Hängen der Nordkette hin zu bestehen, die Schadstoffe vom Talboden hangaufwärts verfrachtet, manchmal wahrscheinlich bis in Höhen unter das Kammniveau (Seegrube). Diese

Querzirkulation ist in der kalten Jahreszeit bei generell schwachen Talwinden am deutlichsten ausgeprägt. Talwinde in Seitentälern betreffen das Stadtgebiet von Innsbruck höchstens am Eingang des Wipptals.

Die oben erwähnte gradientschwache Wetterlage mit ihrem charakteristischen in Talrichtung kanalisierten und von äußeren Einflüssen ziemlich abgekoppelten Talwindregime herrscht in wenig gestörter Form an ca. 30% aller Tage des Jahres. Der entsprechende zeitliche Gang des Windes ist jedoch qualitativ an 80% oder 90% aller Tage nachweisbar.

Die Abschirmung durch die Gebirgsketten bewirkt also einerseits eine in talparalleler Richtung langgestreckte Windrose, andererseits mittlere Windstärken von kaum 1,5 m/s - beides im Gegensatz zu Alpenvorlandstationen oder auch zu Wien, wo mittlere Windgeschwindigkeiten zwei- bis dreimal so hoch sind. Inversionsschichtungen sind weniger extrem als über dem Alpenvorland, aber länger andauernd.

Alles in allem ist Innsbruck schlecht durchlüftet, allerdings noch besser als Klagenfurt oder Graz, die im Gegensatz zum praktisch nebfreien Innsbruck im Herbst und Winter wochenlang im Nebel bzw. unter Hochnebeldecken liegen können.

### **3.2 UMWELTRELEVANTE ANGABEN ZUM UNTERSUCHUNGSGEBIET**

Die Stadt Innsbruck hat keine Großemittenten. Es überwiegen gewerblich-industrielle Mittelbetriebe, die zu einem Teil auf Erdgasversorgung umgestellt wurden. Der Verkehr spielt im Ballungsraum Innsbruck eine bedeutende Rolle. Im Süden des Stadtgebietes verläuft die Inntalautobahn A 12 und aus dem Wipptal aus Richtung Süden mündet die Brennerautobahn A 13 ein.

Die Probepunkte U 0301, U 0302 und U 0303 liegen am Nordkettenrand durchwegs in Südexposition gegenüber den Immissionen aus dem Stadtgebiet Innsbruck. Mit der Thermik gelangen hier ganzjährig, aber besonders im Winterhalbjahr sehr häufig Immissionsbelastungen bis in den Bereich der unteren Hanglage am Punkt U 0303 (Hungerburgbahn), in

geringerem Ausmaß auch zu den höher gelegenen Punkten U 0302 (Nordkettenbahn) sowie U 0301 (Rastlboden). Daher sind alle diese Probepunkte als deutlich bis stark beeinflusst einzustufen.

Die Punkte U 0304 (Tummelplatz) und U 0309 (Andreas Hofer Weg) liegen im Süden der Stadt und sind ebenfalls deutlich bis stark von den Immissionen aus dem Stadtgebiet Innsbruck betroffen. Zusätzlich führt die Autobahn in unmittelbarer Nähe jeweils unterhalb der Meßpunkte vorbei. Insbesondere bei Inversionswetterlagen liegt dieses Gebiet innerhalb des belasteten Bereiches.

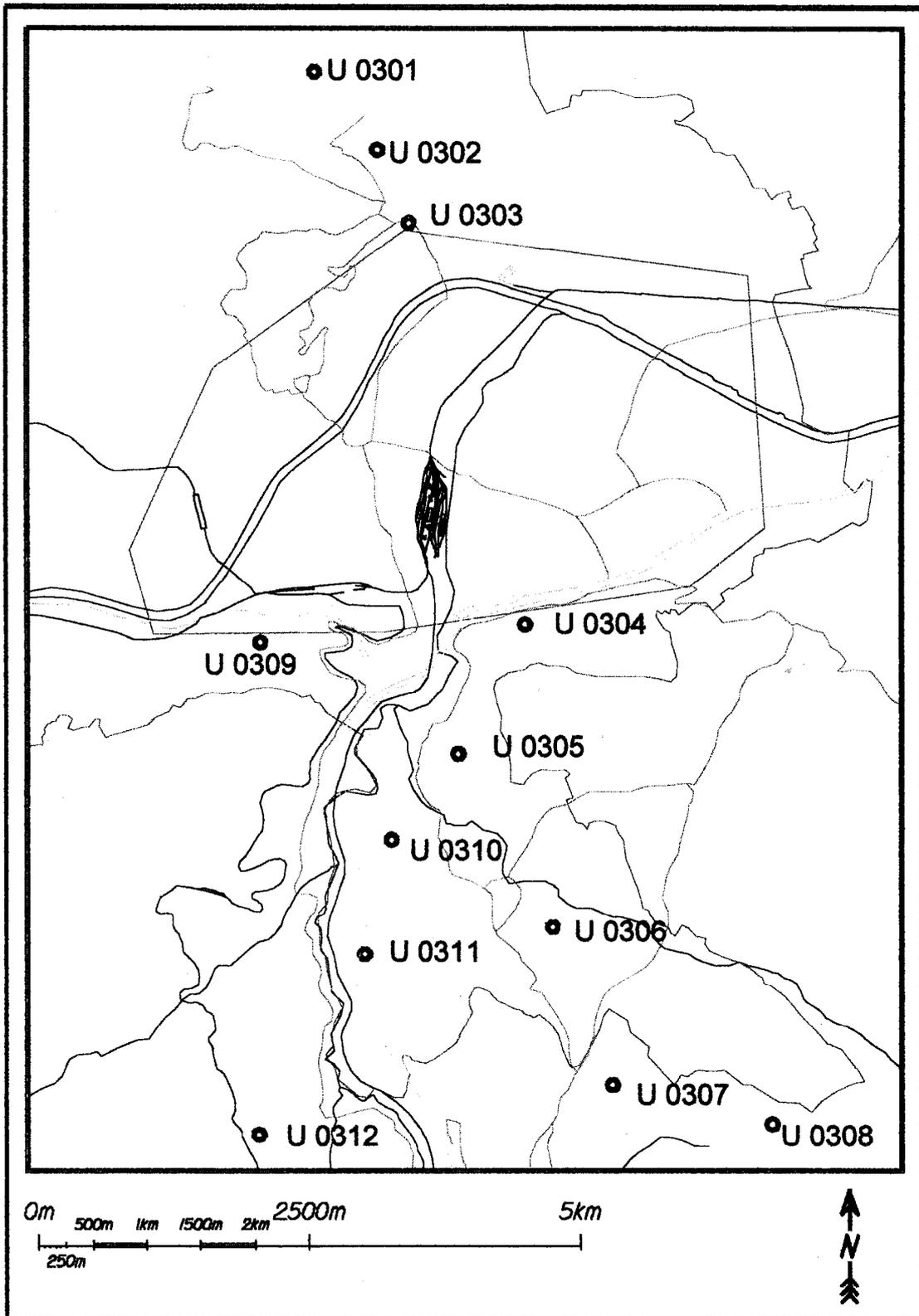
<b>Profil Innsbruck</b>		
<b>UBA Nummer</b>	<b>BIN Nummer</b>	<b>Standortsbezeichnung</b>
U 0301	T 0333	Rastelboden - Arzler Alm
U 0302	T 0332	Nordkettenbahn (= I34)
U 0303	T 0331	Hungerburgbahn (= I35)
U 0304	T 0330	Tummelplatz (= I12)
U 0305	T 0334	Grillhof
U 0306	T 0335	Kurhaus
U 0307	neu	Heiligwasser
U 0308	neu	Patscher Alm
<b>Halbprofil Innsbruck</b>		
U 0309	I 01	Andreas Hofer Weg
U 0310	neu	Sillschlucht Vill
U 0311	neu	BBA bei Ahrntal
U 0312	T 1706	Kreith

Tabelle 1: Probepunkt- und Standortsbezeichnungen im Untersuchungsgebiet Innsbruck.

Der Meßpunkt U 0305 (Grillhof) liegt am südlichen Mittelgebirgsplateau oberhalb von Innsbruck und ist mittel bis schwach gegenüber den Emissionen aus Innsbruck exponiert. Dies gilt auch für den Punkt U 0310 (Sillschlucht Vill). Der Punkt U 0306 (Kurhaus Igls) ist eher schwach beeinflusst von Innsbruck-Igls, ebenso der Punkt U 0307 (Heiligwasser). Weitgehend unbeeinflusst durch Innsbruck selbst sind die Punkte U 0311 (BBA-Ahrntal), U 0312 (Kreith) und U 0308 (Patscher Alm). Unmittelbar neben dem Punkt U 0311 führt eine Steigungsstrecke der Brennerautobahn A 13 vorbei. Außerdem liegt eine große Mülldeponie mit Abfackelung in unmittelbarer Nähe.

Probepunkt	Seehöhe	Baumalter	Exposition
U 0301	1500 m	90 Jahre	Süd
U 0302	1000 m	80 Jahre	Süd
U 0303	870 m	60 Jahre	Süd
U 0304	650 m	80 Jahre	Nord
U 0305	830 m	80 Jahre	Nordost/Nordwest
U 0306	900 m	80 Jahre	Nordwest
U 0307	1175 m	160 Jahre	Nordwest
U 0308	1700 m	*	West
U 0309	710 m	90 Jahre	Nord, eben
U 0310	*	*	*
U 0311	*	*	*
U 0312	880 m	80 Jahre	Südwest

*Tabelle 2: Standortparameter der Probepunkte im Untersuchungsgebiet Innsbruck; erhoben von der Landesforstdirektion Tirol, \*...keine Angaben vorhanden.*



Lageskizze der Probepunkte im Untersuchungsgebiet Innsbruck.

### 3.3 ERGEBNISSE DER NADELUNTERSUCHUNGEN

Für die Bestimmung der Wachsqualität von Fichtennadeln sowie der Nadelgehalte im Raum Innsbruck wurden acht Probepunkte entlang eines Nord-Süd-Profiles (Nordkette - Patscherkofel) und weitere vier Probepunkte entlang eines Halbprofiles Richtung Süden ausgewählt. Acht dieser Standorte sind Teil des Österreichischen Bioindikatornetzes. Vier Standorte wurden neu beprobt. Die Organisation bzw. Durchführung der Probenahme von Fichtennadeln erfolgte durch Mitarbeiter der Tiroler Landesforstdirektion.

Die mittels Rasterelektronenmikroskop bestimmte Wachsqualität von Fichtennadeln im Untersuchungsgebiet Innsbruck lag im Bereich von MW 1,8 bis MW 2,5 (Tabelle 3). Ab einem Mittelwert von 2,0 kann eine beginnende Beeinflussung der Wachsstrukturen angenommen werden. An keinem der untersuchten Probepunkte wurden nennenswerte Mengen von Staubpartikeln auf den Nadeloberflächen, wie dies beispielsweise an industriell belasteten Standorten häufig zu beobachten ist (TRIMBACHER 1995), detektiert.

Die beste Wachsqualität wurde für Nadeln des Probepunktes U 0312 des Halbprofiles Innsbruck ermittelt. 26 % der Spaltöffnungswachse dieses Standortes wurden aufgrund der intakten Wachsmikrostruktur mit Qualitätsklasse 1 bewertet. Wachsdegradationen entsprechend den Qualitätsklassen 4 und 5 konnten an keinem der untersuchten Stomata beobachtet werden. Weiters waren an den Nadeloberflächen weder staubförmige Fremdpartikel noch Epibionten zu verzeichnen. Die Wachsqualität an diesem Probepunkt entspricht somit derjenigen unbeeinflusster Hintergrundstandorte ohne lokaler Schadstoffquellen. Demgegenüber wurde jedoch für die Nadeln eine geringfügige Grenzwertüberschreitung bei Chlor (0,12 %) und Schwefel (0,12 %) nachgewiesen (Tabelle 4). Aus der Sicht der Immissionsüberwachung der Landesforstdirektion Tirol läßt sich dieser Punkt als weitgehend von Immissionen des Stadtgebietes Innsbruck unbeeinflusst einstufen.

Die stärksten Wachsdegradationen des Untersuchungsgebietes wiesen die Nadeln des Probepunktes U 0310 auf (MW 2,5). Dieser Wert entspricht einer leichten Beeinträchtigung der Nadelwachse. Eine Überblicksaufnahme eines charakteristischen Nadelbereichs ist in Abbildung 1 zu sehen.

Probepunkt	Wachsqualität	Staub %	Epibionten %
U - 0301	2,0 ± 0,74	0	0
U - 0302	2,1 ± 0,64	0	0
U - 0303	1,9 ± 0,86	0	10
U - 0304	2,0 ± 0,61	0	0
U - 0305	2,4 ± 1,00	0	0
U - 0306	1,9 ± 0,54	0	1
U - 0307	2,1 ± 0,58	0	1
U - 0308	2,2 ± 0,68	0	1
U - 0309	2,3 ± 0,50	0	32
U - 0310	2,5 ± 0,91	0	4
U - 0311	2,2 ± 0,68	0	0
U - 0312	1,8 ± 0,45	0	0

Tabelle 3: Wachsqualität (Mittelwert und Standardabweichung), Staubbelegung und Belegung der Nadeln mit Epibionten im Untersuchungsgebiet Innsbruck.

An den Nadeloberflächen des Probepunktes U-0311 in unmittelbarer Nähe zur Inntalautobahn und zu einer Mülldeponie konnten vereinzelt Gipskristalle beobachtet werden (Abb. 2). Feinstaub, der durch den Abrieb der Fahrbahn, der Bremsbeläge sowie der Reifen entstehen kann und der auf den Nadeln einiger Probepunkte des Autobahnprofils Radfeld teils massiv zu finden war (siehe Kapitel 4.2), wurde nicht verzeichnet.

In Freilanduntersuchungen an immissionsbelasteten Fichten aus der ehemaligen DDR konnte beobachtet werden, daß die Oberflächen der Nadeln vereinzelt Gipskristalle trugen (NEBE ET AL., 1988). Zusätzlich waren die Nadeln durch Ca-, Mg-, Mn- und Zinkmangel charakterisiert, was die Autoren auf Auslaugung zurückführten. Das Auftreten von Gipskristallen wurde auch an Kiefernadeln eines stark SO<sub>2</sub>-belasteten Standortes in der Dübener Heide beobachtet (FIEDLER ET AL., 1990). Aus einer weiteren Studie, bei der unter anderem Fichten mit einem Gemisch aus H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>/HNO<sub>3</sub> besprüht wurden, geht hervor, daß besonders an den

Nadeln des 1. Nadeljahrganges zahlreiche Gipskristalle nachgewiesen werden konnten (HUTTUNEN ET AL., 1990/91). Auch durch eine künstliche Säurebehandlung von Fichennadeln mit Ozon und saurem Nebel bei pH 3 konnte Gipskristallbildung an den Nadeloberflächen beobachtet werden (LÜTZ ET AL., 1990). In einer neueren Arbeit konnte durch saure Beregnung mit einem Schwefelsäure/Salpetersäure Gemisch bei pH 3 und 4 die Entstehung von Gipskristallen vor allem auf den jungen, noch nicht überwinterten Nadeln von Fichten und Kiefern induziert werden (TURUNEN ET AL., 1994). Man nimmt allgemein an, daß bedingt durch eine Säurebelastung vermehrt Calcium aus den Nadeln ausgewaschen wird und mit dem in der wässrigen Lösung befindlichen Schwefel reagiert.

PP Nr.	Cl %	S-Gesamt %	N-Kjeldahl %	Ca mg/kg	K mg/kg	Mg mg/kg	P mg/kg
U-0301	0,15	0,11	1,3	9554	7545	1403	1562
U-0302	0,29	0,12	1,3	7290	6281	1318	1679
U-0303	0,14	0,14	1,4	5096	4936	1389	2051
U-0304	0,15	0,14	1,4	4989	6367	1197	1547
U-0305	0,13	0,15	1,4	5717	8002	1296	1477
U-0306	0,14	0,13	1,5	5743	6614	1040	1518
U-0307	0,16	0,13	1,4	4074	9200	1789	2442
U-0308	0,12	0,11	1,2	4029	9307	1322	2078
U-0309	0,15	0,16	1,4	6034	4973	1930	1304
U-0310	0,10	0,13	1,4	6808	5270	1516	1697
U-0311	0,10	0,13	1,3	4781	7759	1387	1206
U-0312	0,12	0,12	1,4	3786	8006	1644	1538

Tabelle 4: Cl-, S- und Nährelementgehalte von Fichtennadeln im Untersuchungsgebiet Innsbruck.  
GW für S im 1. Njg: 0,11%, GW für Cl im 1.Njg.: 0,1%..

Die chemischen Nadelanalysen ergaben für Schwefel einen Wertebereich von 0,11 % bis 0,16%. Die Chlorwerte liegen zwischen 0,10% und 0,29% mit einem Median von 0,14%. Der erhöhte Chlorwert (0,29%) wurde in den Nadeln des in 1000 m Seehöhe bei der Nordkettenbahn gelegenen Standortes U-0302 gemessen. Der nahe der Inntalautobahn befindliche Probepunkt U-0311 wies nur geringe Chlorwerte in den Fichtennadeln auf.

PP Nr.	Cu mg/kg	Zn mg/kg	Mn mg/kg	Fe mg/kg	Al mg/kg
U-0301	3,7	56	64	33	11
U-0302	3,9	57	1211	37	73
U-0303	4,6	34	32	45	14
U-0304	4,4	34	265	70	27
U-0305	4,1	40	925	42	38
U-0306	3,8	30	669	41	38
U-0307	3,3	59	505	35	79
U-0308	4,7	59	514	37	46
U-0309	4,1	41	265	53	28
U-0310	3,8	19	42	49	14
U-0311	4,3	43	320	81	24
U-0312	4,7	31	74	37	< 11

*Tabelle 4: Cl-, S- und Nährelementgehalte von Fichtennadeln im Untersuchungsgebiet Innsbruck.  
GW für S im 1. Nadeljahrgang: 0,11%.*



Abb. 1: INNSBRUCK/U-0310; REM-Aufnahme eines Nadelbereiches mit leicht beeinträchtigten Wachsstrukturen. Vergrößerung: 300fach.

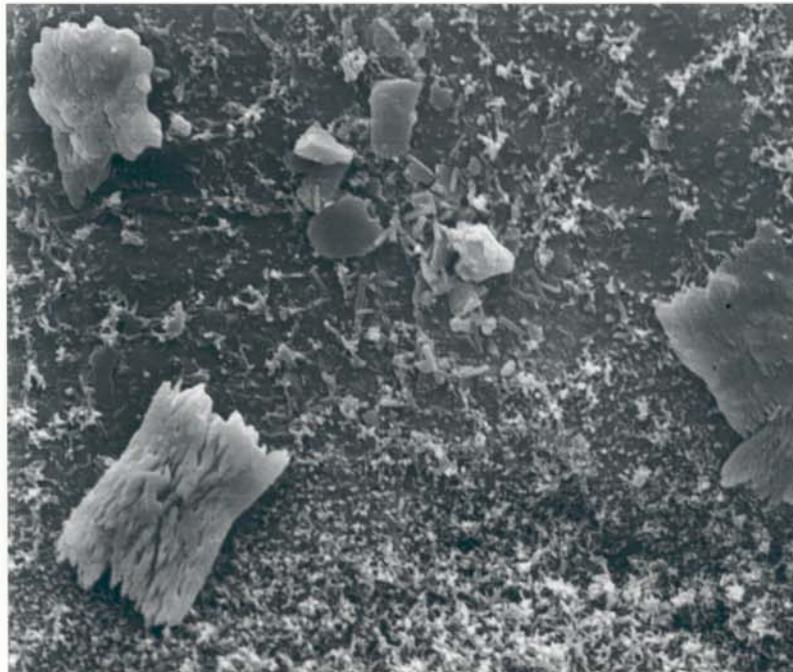


Abb. 2: INNSBRUCK/U-0311, REM-Aufnahme einer Fichtennadel mit anhaftenden Giskristallen. Vergrößerung: 3000fach.

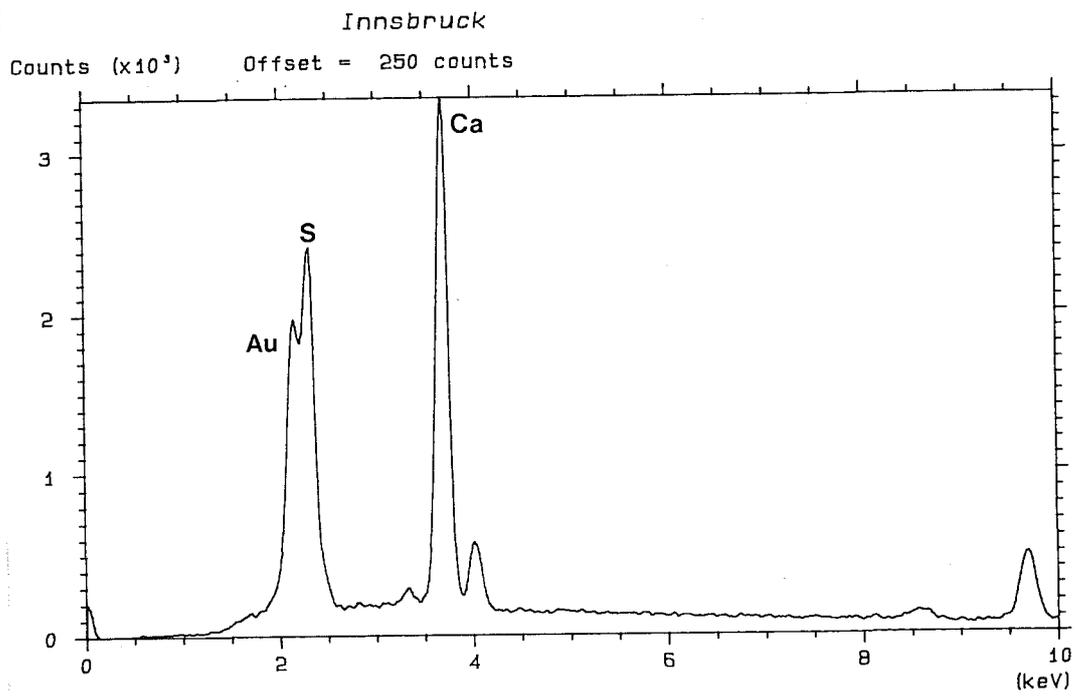


Abb. 3: INNSBRUCK/U-0311, EDX-Spektrum der Gipskristalle in Abbildung 2.

## **4 AUTOBAHNPROFIL RADFELD**

### **4.1 UMWELTRELEVANTE ANGABEN ZUM STANDORT**

An der A 12 Inntalautobahn bei Rattenberg (Profil Radfeld) wurden Nadelproben eines Querprofils beidseits der Autobahn hinsichtlich möglicher durch Emissionen des KFZ-Verkehrs verursachter Veränderungen der Wachsmikromorphologie sowie Belegung der Nadeloberflächen mit Feinstaub untersucht.

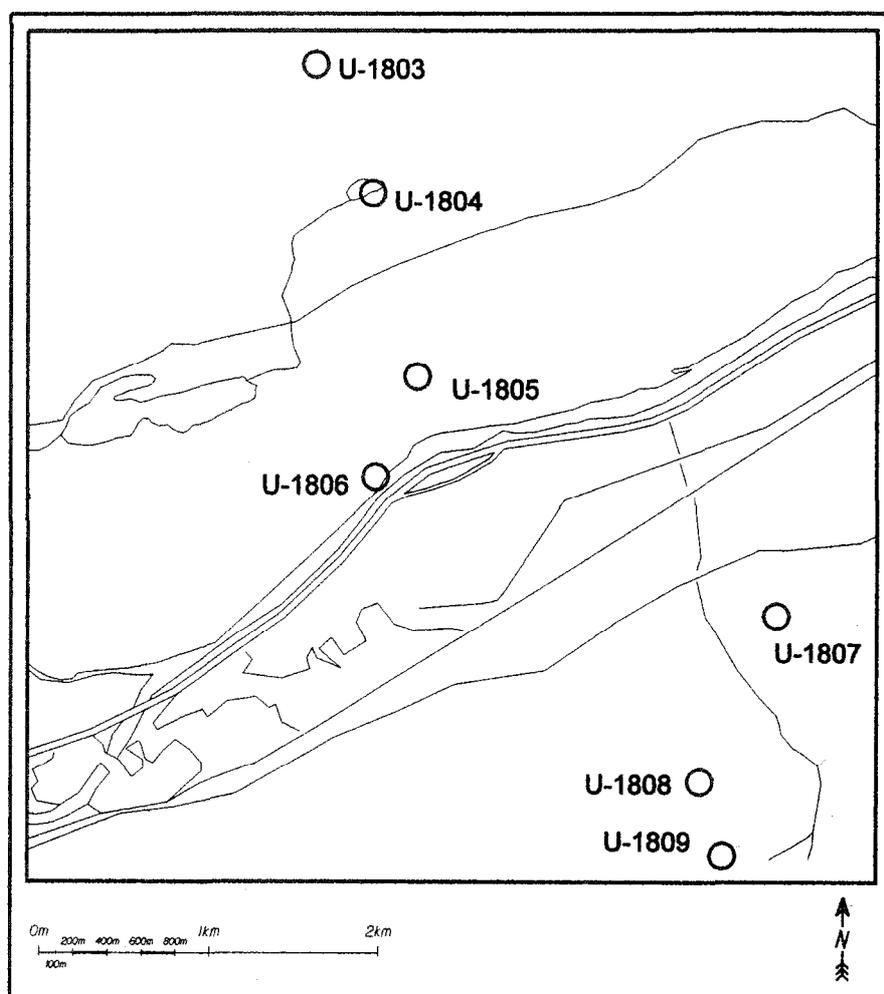
Die Hauptkomponenten der Verkehrsbelastung stellen die Stickoxide dar. Sie stammen in Tirol überwiegend (87 %) aus dem Straßenverkehr, wobei etwa die Hälfte durch das Lkw-Aufkommen und die andere Hälfte aus dem Pkw-Verkehr stammen (AMT DER TIROLER LANDESREGIERUNG, LANDESFORSTDIREKTION, 1991). Die im Rahmen dieser Studie vom Amt der Tiroler Landesregierung durchgeführten Erhebungen zur Feststellung der großräumigen Stickstoffoxidbelastung mittels Passivsammlern zeigten, daß bei den Querprofilen im Inntal die höchsten Immissionskonzentrationswerte erwartungsgemäß bei den Stationen am Talgrund gemessen wurden. Die maximalen Immissionskonzentrationen wurden dabei an den der Autobahn am nächsten gelegenen Stationen gemessen.

Aufgrund unvollständiger Verbrennung ist die Bildung von Kohlenwasserstoffen, und hier vor allem von Benzol, Toluol und Xylolen eine weitere Emissionsquelle aus dem KFZ-Verkehr. Rasterelektronenmikroskopische Studien zeigen, daß die Emissionen von aromatischen Kohlenwasserstoffen an Autostraßen eine korrosive Wirkung auf die Nadelwachse haben und zu einem vorzeitigen strukturellen Verschluß der Spaltöffnungen führen. Die daraus resultierenden physiologischen Folgen sollen einen entscheidenden Anteil am „Waldsterben“ haben (z. B.: SAUTER & PAMBOR, 1989).

Zu den verkehrsspezifischen Metallen zählen Cadmium, Blei und Zink. Cadmium befindet sich in geringen Konzentrationen im Dieseltreibstoff. Die Hauptquelle der Cadmiumemissionen stellen jedoch Fahrbahn-, Bremsbelag- und Reifenabrieb dar. Zink gelangt verkehrsbedingt durch seine Verwendung in Korrosionsschutzmitteln sowie als Additiv in Motorölen

(Zinkdithiophosphit) und auch durch Reifenabrieb (Zinkoxid) in die Umwelt. Dadurch kann es entlang von Verkehrswegen lokal zu überhöhten Konzentrationen kommen. Die Bleiemissionen konnten in den letzten Jahren durch die Einführung von bleifreien Kraftstoffen deutlich reduziert werden.

Weiters ist die partikuläre Belastung durch Straßenstaub und Dieselruß besonders im Nahbereich von stark frequentierten Verkehrswegen nicht zu unterschätzen. Hauptquelle für Feinstaub stellt der Abrieb der Fahrbahn, der Brems- und Kupplungsbeläge sowie der Reifen dar, der auch als Verursacher von Betonstaub, Ruß, Zink, Kupfer, Nickel, Chrom und Asbest verantwortlich ist.



Lagekizze der Probepunkte des Profils Radfeld bei Rattenberg (Inntalautobahn).

Weitere Schadstoffkomponenten sind Kohlendioxid, Kohlenmonoxid und Schwefeldioxid. In Tirol stammt das Schwefeldioxid nur zu einem geringen Teil aus dem Straßenverkehr (Schwefelgehalt des Dieseltreibstoffes). Transmissions- und Immissionsmessungen im Inntal zeigten, daß die SO<sub>2</sub>-Konzentrationen im gesamten Inntal allgemein gering waren und auch in den Ballungsgebieten wie Innsbruck und Hall nur unwesentlich anstiegen (SPRITZL & KELLNER, 1991).

## 4.2 ERGEBNISSE DER NADELUNTERSUCHUNGEN

Die mittlere Wachsqualität der Fichtennadeln aller sieben Probepunkte des Autobahnprofils lag zwischen 1,9 und 2,3. Diese Werte entsprechen intakten bis leicht beeinträchtigten Wachsstrukturen, wie sie auch für Hintergrundstandorte ermittelt wurden. Der Einfluß des Autobahnverkehrs zeigt hingegen deutlich in der Belegung der Nadeloberflächen der drei nächstgelegenen Standorte U-1805/1, U-1806/1 und U-1807/1 mit Feinstaub, Epibionten und Gipskristallen. Die Abbildungen 4 und 5 zeigen Nadelbereiche des Probepunktes U-1806/1 mit zum Teil massiver Belegung mit Feinstaubpartikeln. Aus diesem Grund konnten 3% der Spaltöffnungen nicht bewertet werden und fielen in Sonderklasse 6. Mittels EDX-Analyse konnten im Staub die Elemente Al, Si, S, Cl, K, Ca, Fe und Zn nachgewiesen

Probepunkt	Wachsqualität	Staub %	Epibionten %
U - 1803/1	2,2 ± 0,49	0	6
U - 1804/1	2,1 ± 0,50	0	3
U - 1805/1	2,1 ± 0,38	0	17
U - 1806/1	2,0 ± 0,87	1	15
U - 1807/1	1,9 ± 0,32	4	31
U - 1808/1	2,3 ± 0,50	0	4
U - 1809/1	2,2 ± 0,67	0	6

Tabelle 5: Wachsqualität (Mittelwert und Standardabweichung), Staubbelegung und Belegung der Nadeln mit Epibionten am Profil Radfeld (Inntalautobahn).

werden (Abb. 6). Die Belegung der Nadeln mit Pilzhypen und anderem organischen Material lag bei 15 %. In Abbildung 7 ist eine Spaltöffnung einer Fichtennadel des Probepunktes U-1807/1 dargestellt, auf der sich zahlreiche kleine Gipskristalle befinden.

Interessanterweise wiesen die drei autobahnächsten Probepunkte U-1805/1 bis U-1807/1 am häufigsten, d. h. zwischen 15 und 31 % biologisches Material auf den Nadeloberflächen auf.

Die Nadeln entlang des Transekts wurden noch zusätzlich auf die verkehrsspezifischen Schwermetalle Cadmium und Blei analysiert. Die Cd-Werte lagen im Bereich von 0,05 mg/kg bis 0,32 mg/kg (siehe Tabelle 7). Untersuchungen an Fichtennadeln 25 österreichischer Hintergrundstandorte ohne lokale Schadstoffquellen, die vom Umweltbundesamt durchgeführt wurden, ergaben für Cadmium einen Median von 0,04 mg/kg und einen Wertebereich von < 0,01 bis 0,18 mg/kg (WEISS, 1997). ZVACEK (1988) fand in Fichtennadelproben sieben österreichischer unbelasteter Waldstandorte Cd-Gehalte zwischen 0,01 und 0,54 mg/kg TS. Dem gegenüber wurden an industriell belasteten Standorten Cd-Werte von 1,42 bis 1,78 mg/kg TS in Fichtennadeln verzeichnet (GLATTES ET AL. 1985).

PP Nr.	Cl mg/kg	S-Gesamt %	N-Kjeldahl %	Ca mg/kg	K mg/kg	Mg mg/kg	P mg/kg
U-1803/1	*	0,13	1,3	7117	6106	1351	1245
U-1804/1	*	0,15	1,3	5742	7333	1581	2387
U-1805/1	0,11	0,13	1,4	4258	5262	1408	950
U-1806/1	0,12	0,15	1,3	6223	8723	1094	1856
U-1807/1	0,11	0,14	1,2	4442	6116	1459	1245
U-1808/1	*	0,13	1,3	6549	8521	1115	1672
U-1809/1	*	0,13	1,4	7095	8307	1233	1350

Tabelle 6: Chlor-, Schwefel- und Nährelementgehalte von Fichtennadeln am Profil Radfeld (Inntalautobahn). Gw für Cl im 1.Njg.: 0,1%, GW für S im 1.Njg.: 0,11%.

Die Pb-Werte der untersuchten Nadelproben des Profiles Radfeld lagen zwischen 0,85 mg/kg und 4,03 mg/kg, wobei die beiden höchsten Werte an den beiden der Autobahn am nächsten gelegenen Probepunkten gemessen wurden. Um einen Hinweis auf eine mögliche Immissionswirkung von Schadstoffen auf Nadel- und Blattproben zu erhalten, wurde auf Basis einer vierjährigen Untersuchung in Nordrhein-Westfalen eine fünfteilige Klassifizierung verwendet (KNABE, 1984). Derzufolge sollen Pb-Werte kleiner 4,0 mg/kg (Klasse 1) keinen Hinweis auf eine Immissionswirkung liefern. Werte im Bereich von größer 4,0 bis 7,9 mg/kg (Klasse 2) weisen auf einen möglichen Einfluß hin. Die vom Umweltbundesamt durchgeführten Nadelanalysen von Fichten 25 österreichischer Hintergrundstandorte ergaben für Blei einen Median von 0,4 mg/kg sowie einen Wertebereich von 0,1 bis 1,6 mg/kg.

PP Nr.	Cd mg/kg	Pb mg/kg
U-1803/1	0,09	1,11
U-1804/1	0,08	1,72
U-1805/1	0,13	3,88
U-1806/1	0,05	4,03
U-1807/1	0,32	0,97
U-1808/1	0,19	1,13
U-1809/1	0,10	0,85

*Tabelle 7: Cadmium- und Bleigehalte von Fichtennadeln am Profil Radfeld (Inntalautobahn).*

<b>PP</b>	<b>Cu</b>	<b>Zn</b>	<b>Mn</b>	<b>Fe</b>	<b>Al</b>
Nr.	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg
U-1803/1	4,6	68	426	32	13
U-1804/1	5,4	52	215	42	22
U-1805/1	7,1	47	164	43	< 11
U-1806/1	9,8	39	11	77	21
U-1807/1	16,0	75	75	58	12
U-1808/1	4,5	66	268	39	19
U-1809/1	4,1	76	611	36	26

*Tabelle 8: Metallgehalte von Fichtennadeln am Profil Radfeld (Inntalautobahn).*

*Abb. 4: A 12, PROFIL RADFELD/U-1806/1, REM-Aufnahme einer Nadeloberfläche mit zahlreichen anhaftenden Staubpartikeln. Vergrößerung: 350fach.*

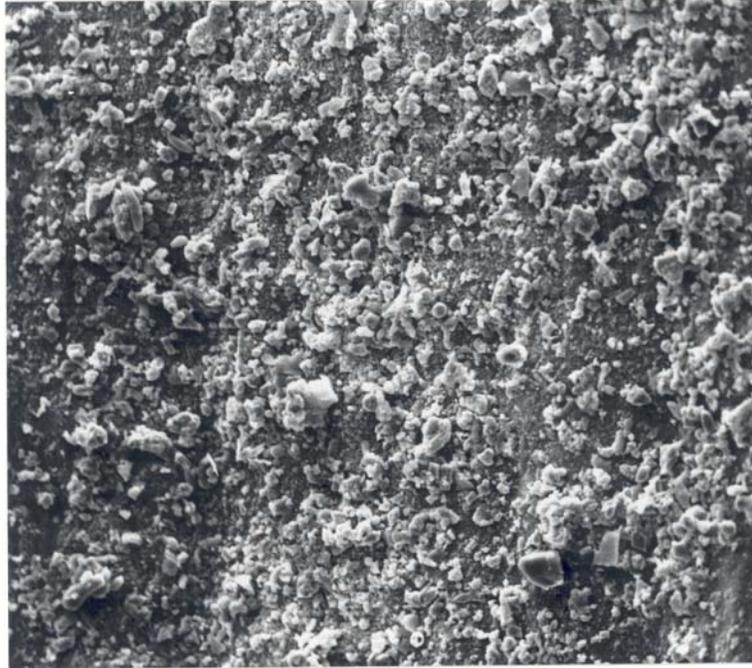


Abb. 5: A 12, PROFIL RADFELD/U-1806/1, REM-Aufnahme eines Nadelbereichs mit massiver Staubbelegung. Vergrößerung: 350fach.

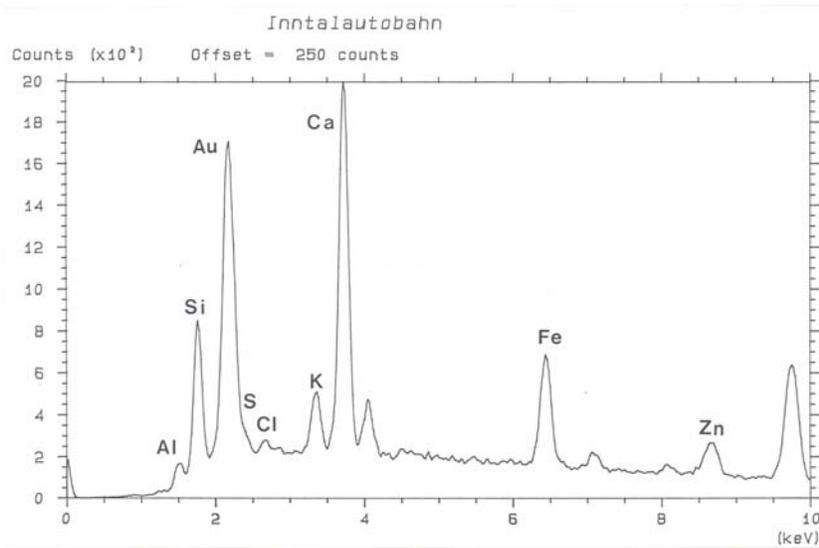


Abb. 6: A 12, PROFIL RADFELD/U-1806/1; EDX-Spektrum der Staubpartikel zu Abbildung 5.



Abb. 7: A 12, PROFIL RADFELD/U-1807/1, REM-Aufnahme einer Spaltöffnung mit zahlreichen kleinen Gipskristallen. Vergrößerung: 3000fach.

## 5 QUELLENNACHWEIS

AMT DER TIROLER LANDESREGIERUNG-LANDESFORSTDIREKTION, 1991:

Auswirkungen des Straßenverkehrs auf die Umwelt. Teilbericht Luft/Vegetation/Boden. Bericht an den Tiroler Landtag, Oktober 1991. Amt der Tiroler Landesregierung-Landesforstdirektion, Innsbruck.

BERMADINGER, E., GRILL, D., GOLOB, P., 1987:

Einfluß von Magnesitstäuben auf Fichtennadelwachse. *Phyton (Austria)* 27/1, 15-29.

CROSSLEY, A., FOWLER, D., 1986:

The weathering of Scots pine epicuticular wax in polluted and clean air. *New Phytol.* 103, 207-218.

FIEDLER, H. J., BARONIUS, G., EHRIG, F., 1990:

Rasterelektronenmikroskopische und chemische Untersuchungen grüner und chlorotischer Nadeln eines immissionsgeschädigten Kiefernbestandes. *Flora* 184, 91-101.

GLATTES, T., SMIDT, S., DRESCHER, A., MAYER, C., MUTSCH, F., 1985:

Höhenprofil Zillertal. Untersuchungen einiger Parameter zur Ursachenfindung von Waldschäden. FBVA-Berichte Nr. 9. Schriftenreihe der Forstlichen Bundesversuchsanstalt, Wien.

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.

HUTTUNEN, S., TURUNEN, M., REINIKAINEN, J., 1990/91:

Scattered CaSO<sub>4</sub>-crystallites on needle surfaces after simulated acin rain as an indicator of nutrient leaching. *Water, Air & Soil Pollut.* 54, 169-173.

KARHU, M., HUTTUNEN, S., 1986:

Erosion effects of air pollution on needle surfaces. *Water, Air & Soil Pollut.* 31, 417-423.

KNABE, W., 1984:

Merkblatt zur Entnahme von Blatt- und Nadelproben für chemische Analysen. *AFZ* 33/34, 847-848.

KRAFT, G., 1884:

Beiträge zur Lehre von den Durchforstungen, Schlagstellungen und Lichthieben. Hannover.

LÜTZ, C., HEINZMANN, U., GÜLZ, P.-G., 1990:

Surface structures and epicuticular wax composition of spruce needles after long-term treatment with ozone and acid mist. *Environ. Pollut.* 64, 313-322.

NEBE, W., SCHIERHORN, E., ILGEN, G., 1988:

Rasterelektronenmikroskopische und chemische Untersuchungen von immissionsgeschädigten Fichtennadeln (*Picea abies* (L.) KARST.). *Flora* 181, 409-414.

ÖNORM M 6279, 1991:

Bestimmung von 33 Elementen mittels ICP-AES.

SAUTER, J. J., PAMBOR, L., 1989:

The dramatic corrosive effect of road side exposure and aromatic hydrocarbons on the epistomatal wax crystalloids in spruce and fir - and its significance for the „Waldsterben“. *Eur. J. For. Path.* 19, 370-378.

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.

SPRITZL, G., KELLNER, K., 1991:

Transmissions- und Immissionsmessungen im Inntal Winter 1990/91. Österr. Bundesinst. f. Gesundheitsw. Studie im Auftrag der Tiroler Landesregierung.

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. Eine neue Klassifizierungsmethode zur standardisierten Beurteilung der Nadelwachse von Fichten mit dem Rasterelektronenmikroskop. Monographie Bd. 57, Umweltbundesamt Wien.

TRIMBACHER, C., 1996:

Die Beeinflussung der Wachsstrukturen von Fichtennadeln durch Immissionen am Beispiel von Brixlegg und Linz. UBA-BE-055. Umweltbundesamt Wien.

TURUNEN, M., HUTTUNEN, S., BACK, J., 1994:

Observations on the effects of acid rain treatment on needle surfaces of Scots pine and Norway spruce seedlings. In: PERCY, K. E. (Hrsg.): Air Pollutants and the Leaf Cuticle. NATO ASI Series, Vol. G 36. Berlin, Heidelberg, Springer Verlag, 316-319.

ZVACEK, L., 1988:

Mikronährstoffe und toxische Metalle an Waldstandorten. Diss. Universität Wien.