

**FICHTENNADELUNTERSUCHUNGEN  
IN DER STEIERMARK**

**Rasterelektronenmikroskopische und  
chemisch – analytische Ergebnisse**

**Zwischenbericht**



**FICHTENNADELUNTERSUCHUNGEN IN DER  
STEIERMARK**

**Rasterelektronenmikroskopische und  
chemisch-analytische Ergebnisse**

**ZWISCHENBERICHT**

**UBA-BE-082**

Wien, Jänner 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 Forstfachabteilung des Amtes der Steiermärkischen Landesregierung für die Probenahme und für die freundliche Unterstützung.*

*Die immissionsklimatologische Kurzcharakteristik von Graz (Kap. 5.1 und 5.2) wurde uns dankenswerterweise von Hrn. Mag. Schopper, Fachabteilung Ia des Amtes der Steiermärkischen Landesregierung zur Verfügung gestellt.*

**Impressum:**

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

© Umweltbundesamt, Wien, Jänner 1997

Alle Rechte vorbehalten  
ISBN 3-85457-353-7

## KURZFASSUNG

Nadelwachse sind sehr sensible Oberflächenstrukturen, die vor allem auf anthropogene Umwelteinflüsse durch Veränderungen ihrer Mikrostruktur reagieren können. Sie werden daher bereits seit längerem zur Bioindikation herangezogen.

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

### Leoben/Donawitz

Im Untersuchungsgebiet Leoben/Donawitz wurden Fichtennadeln von sechs Probenpunkten untersucht. Die Schwefelgehalte in allen Nadeln lagen zum Teil erheblich über dem gesetzlich festgelegten Grenzwert. Die Wachsqualität lag im Bereich von 2,1 bis 2,5, was einer leichten Beeinträchtigung der Wachsstrukturen entspricht. Besonders die Nadeln des westlich der Hütte Voest-Alpine Donawitz gelegenen Standortes waren noch zusätzlich mit eisenhaltigem Feinstaub und zahlreichen Gipskristallen bedeckt. Auch an den beiden nördlich an den Prallhängen befindlichen Probenpunkten konnten Staubpartikel und Gipskristalle auf den Nadeloberflächen nachgewiesen werden.

### Breitenau

In der Umgebung des Magnesitwerks Breitenau der Fa. Veitsch-Radex AG wurden Fichtennadeln von fünf Probenpunkten untersucht. Grenzwertüberschreitungen bei Schwefel in den Nadeln konnten an allen Punkten verzeichnet werden. Der dem Werk am nächsten gelegene Standort wies mit einem Wert von 2,9 die am stärksten degradierten Wachsstrukturen des Untersuchungsgebietes auf. Dies entspricht einer leichten Beeinträchtigung der Nadelwachse. Darüberhinaus waren die Nadeloberflächen dieses Punktes erheblich mit magnesiumhaltigen Fremdpartikeln und Gipskristallen bedeckt.

### Graz

Im Raum Graz wurden Fichtennadeln von vier Probenpunkten untersucht, wobei sich zwei Punkte im Stadtgebiet und zwei weitere außerhalb der Stadt befanden. Die Schwefelwerte in den Nadeln lagen auch hier wiederum, wenn auch geringfügig, über dem gesetzlich festgesetzten Grenzwert. Leicht beeinträchtigte Nadelwachse (2,5) sowie staubförmige Fremdpartikel und vereinzelte Gipsnadeln wurden nur an dem in der Nähe des Nordportales des Plabutschunnels befindlichen Probenpunktes verzeichnet. Die Wachsqualität der übrigen untersuchten Bäume lag im Bereich von 1,8 (unbeeinträchtigt) bis 2,4 (leicht beeinträchtigt).



# INHALTSVERZEICHNIS

	<b>KURZZUSAMMENFASSUNG .....</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 .....	7
<b>3</b>	<b>LEOBEN/DONAWITZ .....</b>	<b>11</b>
3.1	Lage und Klima .....	11
3.2	Umweltrelevante Angaben zum Standort.....	11
3.3	Ergebnisse der Nadeluntersuchungen .....	14
<b>4</b>	<b>BREITENAU .....</b>	<b>22</b>
4.1	Umweltrelevante Angaben zum Standort.....	22
4.2	Ergebnisse der Nadeluntersuchungen .....	23
<b>5</b>	<b>STADTPROFIL GRAZ .....</b>	<b>29</b>
5.1	Lage und Klima .....	29
5.2	Umweltrelevante Angaben zum Untersuchungsgebiet.....	30
5.3	Ergebnisse der Nadeluntersuchungen .....	32
<b>6</b>	<b>QUELLENNACHWEIS.....</b>	<b>36</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 Wachstrukturen sichtbar gemacht und Veränderungen (z. B.: Wachschmelzungen, 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 Wachstrukturen 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 Nadelwachschmelzungen 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 Wachschmelzung in Prozent der Gesamtstomatafläche) in fünf Qualitätsklassen. Die Standardisierung der Methode ermöglicht vergleichbare Ansprachen der Wachqualität von Fichtennadeln.

## 1.2 Ziele der Arbeit

Mit dieser Methode wurden in der vorliegenden Studie Fichtennadeln des 1. Nadeljahrganges 1995 dreier Standorte in der Steiermark untersucht um zu testen, inwieweit der Parameter der mittleren Wachsqualität zur Dokumentation der aktuellen Umweltbelastung in der Umgebung von Emittenten geeignet ist. Neben dem städtischen Ballungsgebiet *Graz* wurden die beiden Industriestandorte *Leoben/Donawitz* und *Breitenau* 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 Probenahme und Probenvorbereitung**

Die Probenahme von Fichtennadeln des 1. Nadeljahrganges 1995 an den Untersuchungsstandorten erfolgte gemäß den Bestimmungen der 2. Verordnung gegen forstschädliche Luftverunreinigungen durch Mitarbeiter der Forstfachabteilung des Amtes der Steiermärkischen Landesregierung. Die für die vorliegende Untersuchung ausgewählten Standorte sind Teile des Österreichischen Bioindikatornetzes (BIN) oder Verdichtungspunkte desselben bzw. Punkte des Waldschadensbeobachtungssystems (WBS). 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 Wachstubuli 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 Standortsmittels 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 Nadelmitte 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 Standortsmittel (= 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**

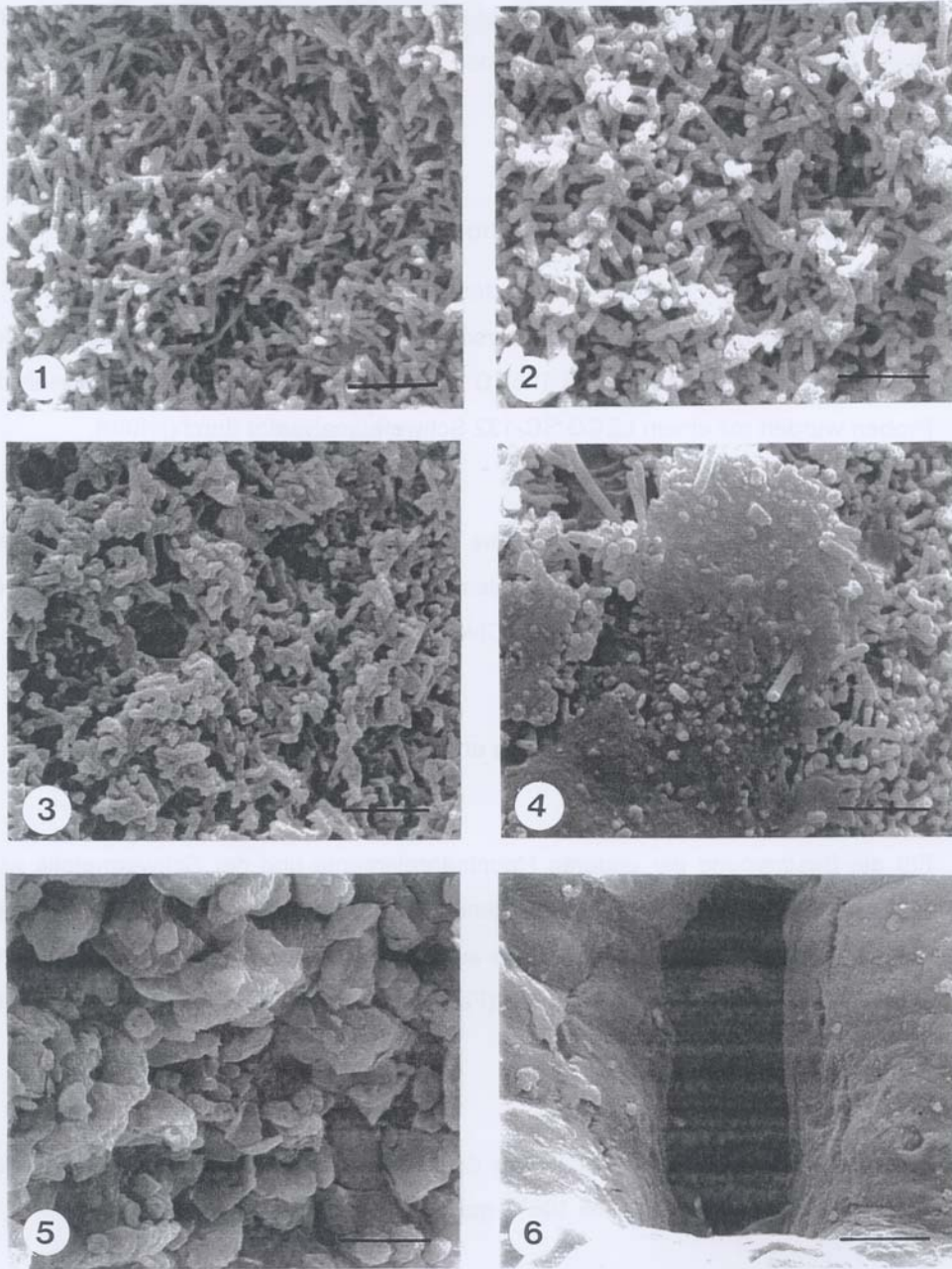
Zur Bestimmung der Schwefelgehalte der Nadeln wurden die Nadelproben bei 80° C im Umlufttrockenschrank getrocknet, von den Holzteilen befreit, anschließend vermahlen und vor der Analyse bei 105° C nachgetrocknet. Die Schwefelanalysen der Proben wurden mit einem LECO SC-132 Schwefelanalysator durchgeführt.

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.

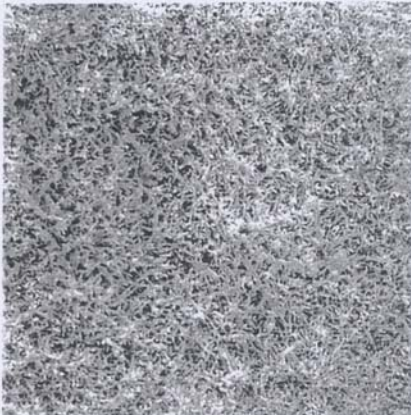
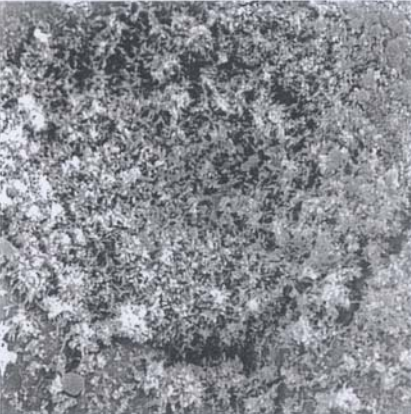

Für die Bestimmung der anderen Hauptnährelemente und der Schwermetalle wurden die Nadelproben bei 30° C getrocknet, vermahlen und anschließend mit einem Schwefelsäure-Salpetersäure-Gemisch aufgeschlossen. Die Analysen erfolgten mittels ICP-AES Gerät Optima 3000 XL (Fa. Perkin-Elmer) in Anlehnung an ÖNORM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

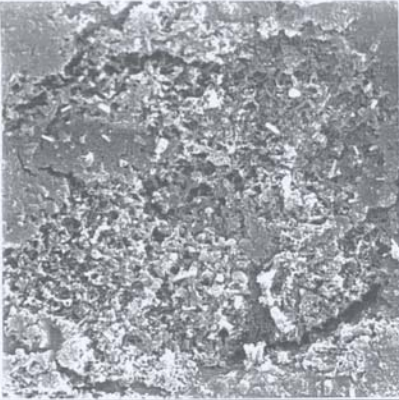
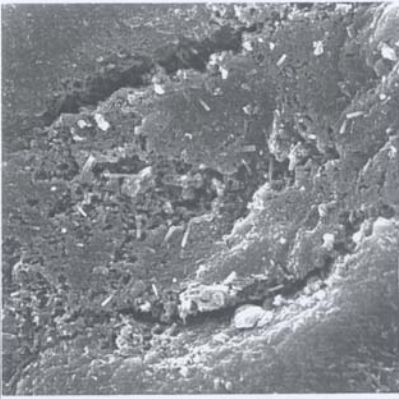
Alle Analysen wurden im Zentrallabor des Umweltbundesamtes durchgeführt. Alle Werte beziehen sich auf die bei 105°C getrocknete Nadelprobe.



*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 Wachstrukturen 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 LEOBEN/DONAWITZ**

#### **3.1 Lage und Klima**

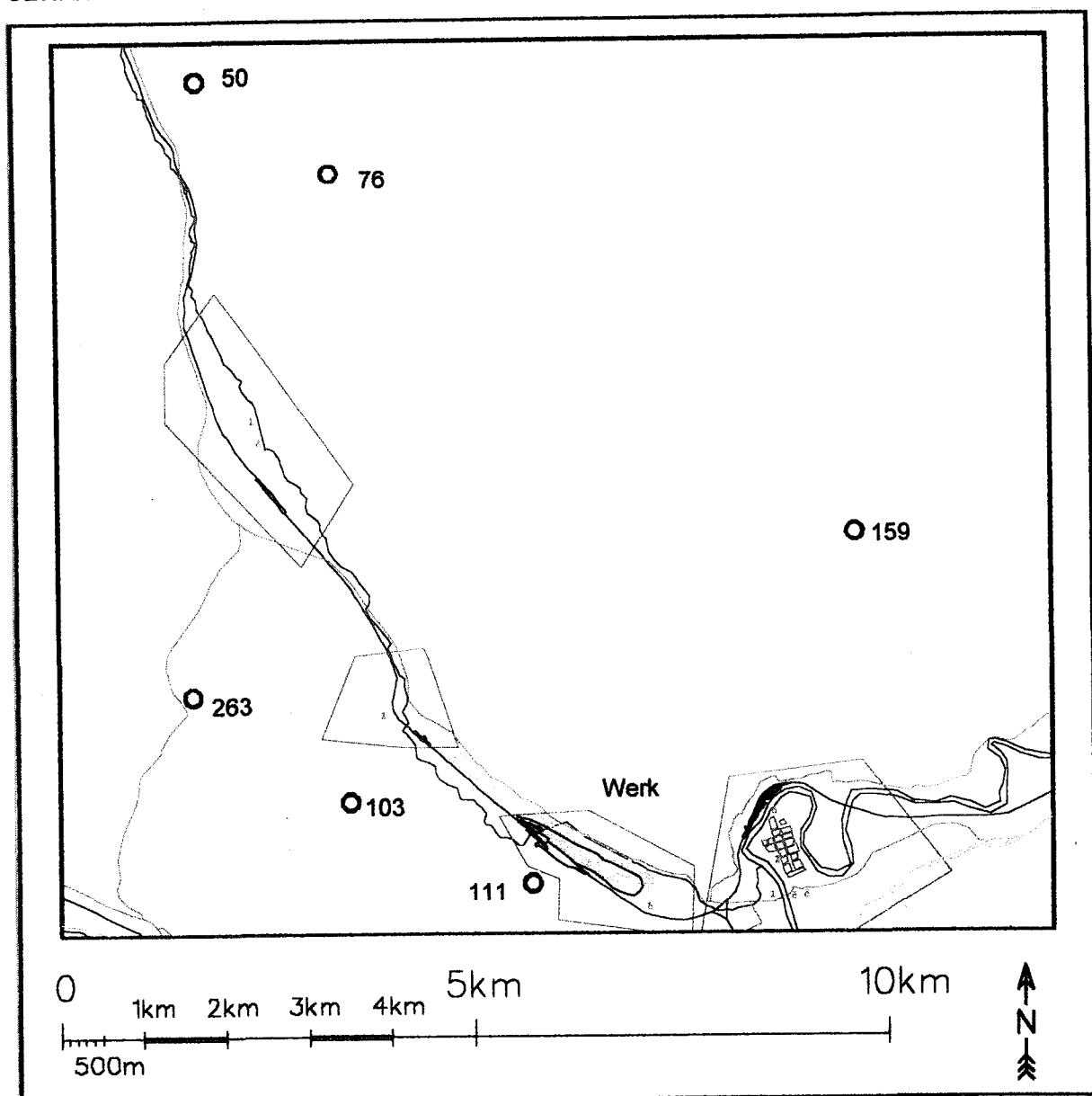
Leoben/Donawitz liegt an der Einmündung des Vordernbergbaches in die Mur. Auf einer schmal ausgebildeten Talterrasse des Vordernbergbaches befinden sich die Werksanlagen der Hütte Voest-Alpine Donawitz. Nach Westen hin wird der Raum von der Schillerhöhe (924 m) abgeschirmt. Das Nordwest-Südost orientierte Vordernbergtal ist durch häufiges Auftreten von tagesperiodischen Windsystemen charakterisiert. In der Nacht und in den Morgenstunden bilden sich Talauswinde aus Nordwest. Im weiteren Tagesverlauf entstehen Taleinwinde aus südöstlichen Richtungen. Generell ist das Gebiet durch austauscharme Wetterlagen mit geringen Windgeschwindigkeiten gekennzeichnet. Besonders in den Herbst- und Wintermonaten kommt es im Raum Donawitz bedingt durch die inneralpine Tallage und die abschirmende Wirkung des Alpenhauptkammes gegenüber West- und Nordwestströmungen zu oft beständigen Inversionswetterlagen. Weiters werden in diesem Raum im Jahresdurchschnitt etwa 150 bis 160 Tage mit Nebel oder Hochnebel beobachtet. Aus immissionsklimatologischer Sicht läßt sich daher der Standort der Hütte Donawitz als ungünstig bewerten.

#### **3.2 Umweltrelevante Angaben zum Standort**

In der traditionsreichen Hütte Voest-Alpine Donawitz stehen folgende Produktionsanlagen in Betrieb: Hochofenbetrieb (Sinteranlage, Hochofen), Stahlwerk, (Schmelzbetrieb, Gießereibetrieb), Walzwerke (Grobwalzwerk, Feinwalzwerk).

Die Luftgüte im Raum Donawitz wird vor allem durch die Emissionen der Sinteranlage beeinträchtigt. Die wesentlichsten Luftschadstoffe sind SO<sub>2</sub>, Staub, NO<sub>x</sub> und Kohlenwasserstoffe. Weiters sind auch Belastungen durch Ammoniak, Schwefelwasserstoff, Fluoride und Chloride, Schwermetalle sowie Dioxine und Furane zu erwarten. Vor allem im Forstbereich sind Schäden aufgetreten. Bezüglich der Wald-

schadenssituation ist der Raum Donawitz der am längsten und intensivsten untersuchte Raum Österreichs. Die Nadeln des Waldgebietes um Leoben/Donawitz werden im Rahmen des Forstlichen Bioindikatornetzes vom Amt der Steiermärkischen Landesregierung auf Schwefel und Fluor untersucht. Die Ergebnisse zeigen, daß der Raum Leoben/Donawitz seit Jahren das am stärksten mit Schwefel belastete Gebiet darstellt. Weiters wurden durch die Nadelanalysen erhebliche Fluorbelastungen festgestellt. Die Immissionsgrenzwerte der 2. ForstVO für Fluor wurden in diesem Gebiet bis um das 20-fache überschritten (BERICHT ÜBER DIE UMWELTSITUATION AN AUSGEWÄHLTEN LANGJÄHRIGEN INDUSTRIESTANDORTEN. 1992).



Lageskizze der Probepunkte im Untersuchungsgebiet Leoben/Donawitz

Neuere, stichprobenartige Untersuchungen der Dioxinimmissionssituation im Raum Leoben/Donawitz des Umweltbundesamtes ergaben erhöhte PCDD/F-Konzentrationen im Raum Donawitz gegenüber dem Raum Leoben (THANNER & MOCHE, 1996). Somit liegt die Dioxinbelastung der Luft in diesem Gebiet deutlich über jenen Werten, wie sie bei früheren Messungen für städtische Ballungsräume ermittelt wurden.

<b>Probepunkt</b>	<b>Seehöhe</b>	<b>Baumalter</b>	<b>Exposition</b>
50	1000 m	82 Jahre	Süd
76	1180 m	82 Jahre	Ost
103	800 m	113 Jahre	Nord
111	700 m	78 Jahre	Nord/Ost
159	1100 m	90 Jahre	Süd
263	700 m	73 Jahre	Eben

*Tabelle 1: Standortparameter der Probepunkte im Untersuchungsgebiet Leoben-Donawitz; erhoben von der Landesforstinspektion Steiermark*

### 3.3 Ergebnisse der Nadeluntersuchungen

Auf den Fichtennadeln des südwestlich nahe der Sinteranlage gelegenen Probepunktes 111 konnten im Rasterelektronenmikroskop keine Staubpartikel und nur sehr wenige Epibionten (Pilzhypen, Sporen, Algen, ..) detektiert werden. Die mittlere Wachsqualität dieses Punktes lag bei  $2,2 \pm 0,52$ . Die geringfügigen Wachsdegradationen und das Fehlen von staubförmigen Kontaminationen auf den Nadeln lassen den Schluß zu, daß an diesem Probepunkt keine direkte Beeinflussung der Nadeloberfläche durch werkseitige Emissionen vorliegt. Demgegenüber ergaben aber die Nadelanalysen mit 0,19 % Schwefel im 1. Nadeljahrgang die höchsten Werte des Untersuchungsgebietes.

Probepunkt	Wachsqualität	Staub %	Epibionten %
50	$2,2 \pm 0,56$	6	8
76	$2,4 \pm 0,56$	1	1
159	$2,1 \pm 0,76$	4	4
103	$2,1 \pm 0,46$	8	10
111	$2,2 \pm 0,52$	0	3
263	$2,5 \pm 0,23$	0	0

Tabelle 2: Wachsqualität (Mittelwert und Standardabweichung), Staubbelegung und Belegung der Nadeln mit Epibionten im Untersuchungsgebiet Leoben/Donawitz

Der westlich der Voest-Alpine befindliche Probepunkt 103 wies ebenfalls weitgehend unbeeinträchtigte Wachsstrukturen auf ( $2,1 \pm 0,46$ ), doch waren hier die Nadeloberflächen größtenteils mit eisenhaltigem Feinstaub und zahlreichen Gipskristallen bedeckt (Abb. 8 bis 13). Die Nadelanalysen ergaben für diesen Standort hohe Eisenwerte (Tabelle 3) sowie hohe Schwefelgehalte (Tabelle 3). Ein Immissionseinfluß der Stahlhütte kann daher angenommen werden.

In Freilanduntersuchungen an immissionsbelasteten Fichten aus der ehemaligen DDR konnte gezeigt 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.

Der Probepunkt 263 nordwestlich des Werks wies die stärksten Wachsdegradationen auf. Staubförmige Fremdpartikel bzw. Epibionten konnten nicht nachgewiesen werden. Abbildung 13 stellt eine typische Spaltöffnung dieses Punktes dar.

An den Nadeln der beiden nördlich an den Prallhängen gelegenen Probepunkte 50 und 76 konnten sowohl Staub als auch wiederum Gipskristalle nachgewiesen werden. Besonders an Nadeloberflächen des Punktes 76 konnten sehr häufig Gipsnadeln beobachtet werden (Abb. 14 bis 16). Die Nadeln dieses Standortes waren ebenso durch eine leicht beeinträchtigte Wachsqualität gekennzeichnet.

PP Nr.	S-Gesamt %	N-Kjeldahl %	Ca mg/kg	K mg/kg	Mg mg/kg	P mg/kg
50	0,13	1,3	8634	6574	768	1387
76	0,12	1,0	6895	9430	1742	2006
159	0,15	1,3	5198	6131	1308	2379
103	0,16	1,3	5098	6844	1041	1703
111	0,19	1,3	5524	9167	855	1549
263	0,18	1,3	7290	7140	1376	1677

*Tabelle 3: Schwefel- und Nahrelementgehalte von Fichtennadeln im Untersuchungsgebiet Leoben/Donawitz. GW fur S im 1. Njg.: 0,11 %.*

PP Nr.	Cu mg/kg	Zn mg/kg	Mn mg/kg	Fe mg/kg	Al mg/kg
50	3,2	43	363	76	12
76	2,4	65	950	92	82
159	2,8	60	1608	109	55
103	3,7	72	922	667	84
111	3,1	75	556	619	49
263	3,1	82	1086	170	57

*Tabelle 4: Metallgehalte von Fichtennadeln im Untersuchungsgebiet Leoben/Donawitz*





Abb. 8: LEOBEN-DONAWITZ / 103, REM-Aufnahme einer Nadeloberfläche mit anhaftenden Staubpartikeln im Überblick. Vergrößerung: 350fach.

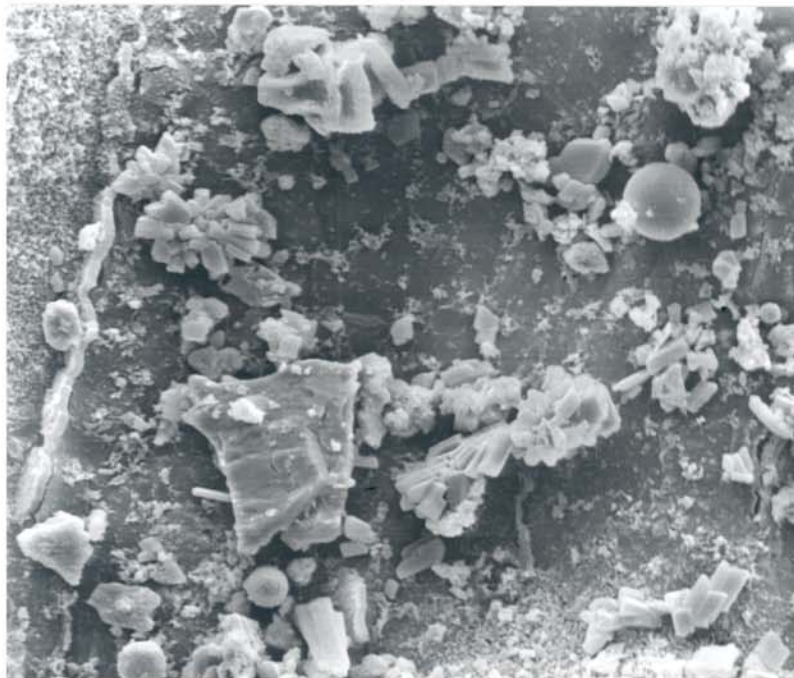


Abb. 9: LEOBEN-DONAWITZ / 103, REM-Aufnahme eines Nadelbereichs mit massiver Partikelbelegung. Vergrößerung: 1500fach.

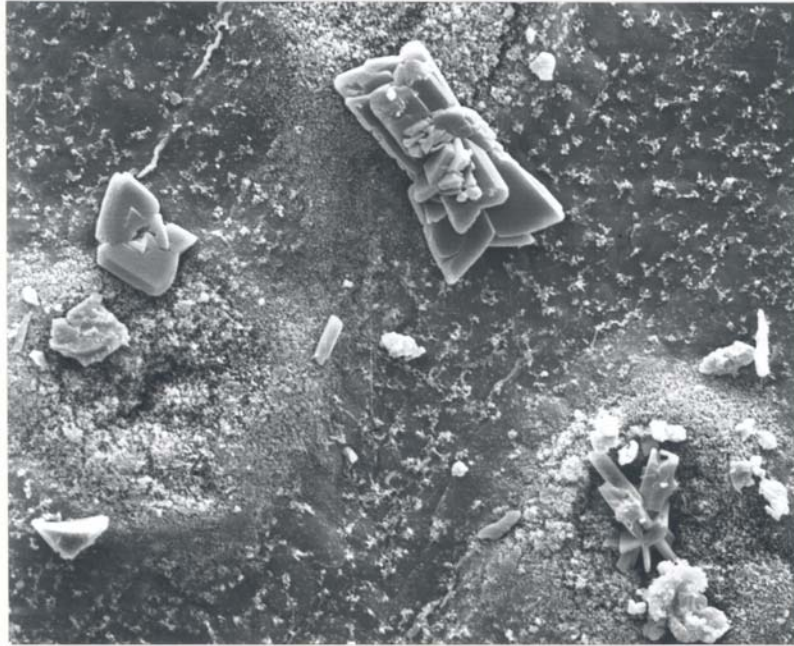


Abb. 10: LEOBEN-DONAWITZ / 103, REM-Aufnahme einer Fichtennadel mit Gipskristallen.  
Vergrößerung: 750fach.

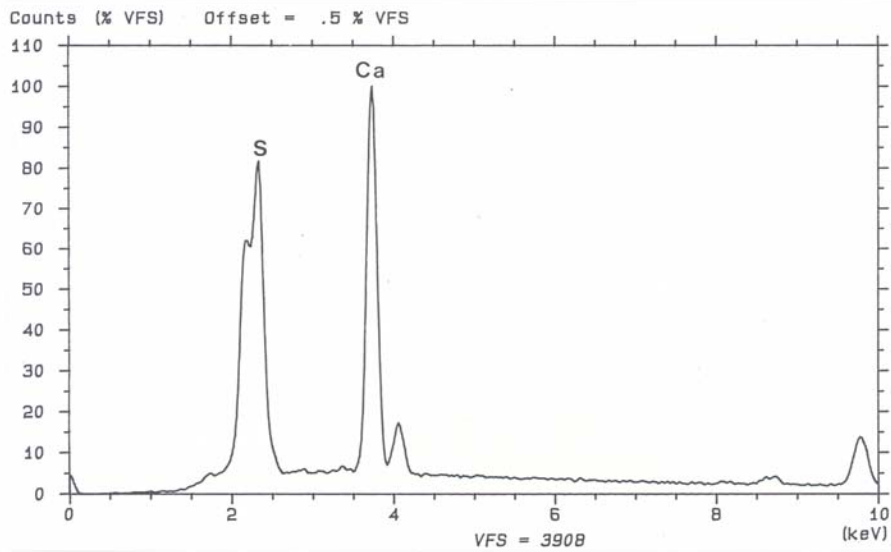


Abb. 11: LEOBEN-DONAWITZ / 103, EDX-Spektrum von Gips.



Abb. 12: LEOBEN-DONAWITZ / 103, REM-Aufnahme eines eisenhaltigen Partikels auf der Nadel. Vergrößerung: 3000fach.

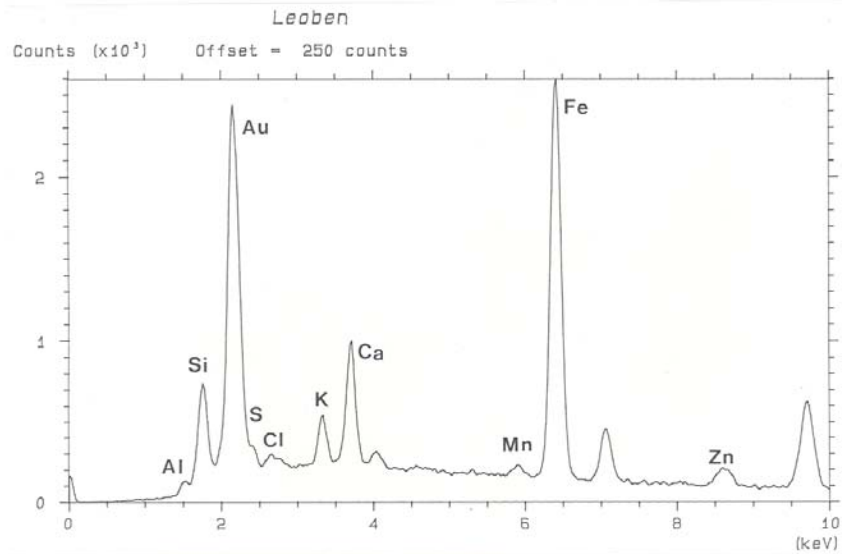


Abb. 13: LEOBEN-DONAWITZ - EDX-Spektrum zu Abb. 12

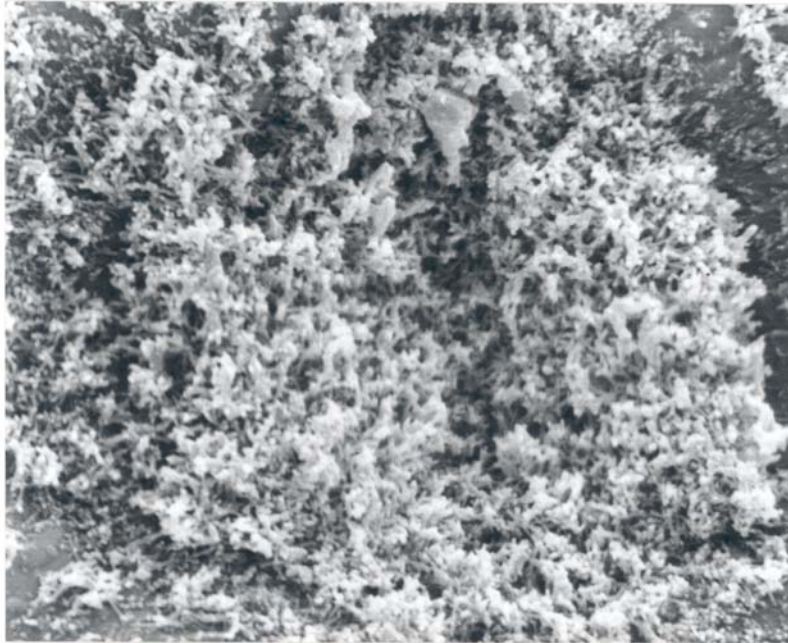


Abb. 14: LEOBEN-DONAWITZ / 263, REM-Aufnahme einer Spaltöffnung mit beginnenden Wachsverschmelzungen. Vergrößerung: 3000fach.



Abb. 15: LEOBEN-DONAWITZ / 76, REM-Aufnahme einer Nadeloberfläche mit zum Teil verschmolzenem Stomatawachs (Pfeile). Vergrößerung: 350fach.



Abb. 16: LEOBEN-DONAWITZ / 76, REM-Aufnahme eines Nadelbereiches mit zahlreichen anhaftenden Gipskristallen. Vergrößerung: 1150fach.

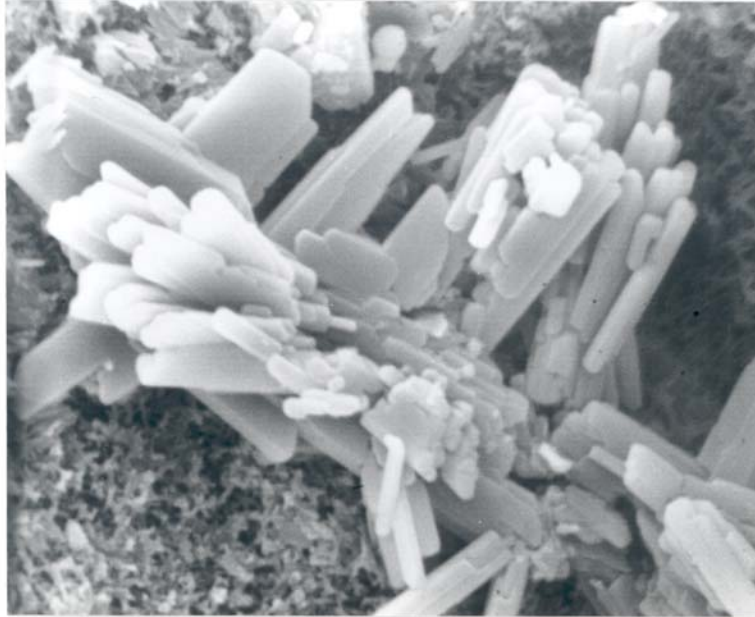
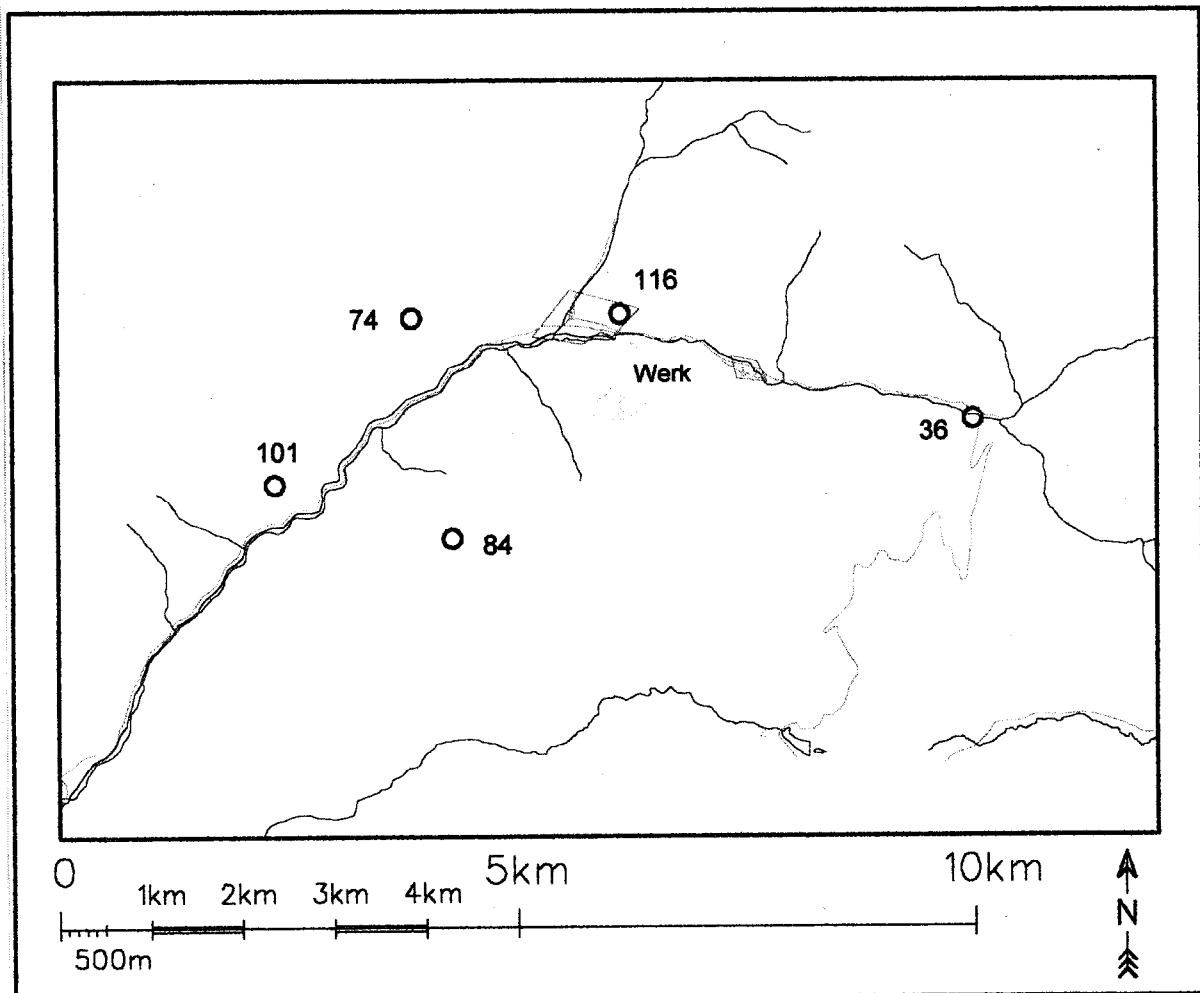


Abb. 17: LEOBEN-DONAWITZ / 76, REM-Aufnahme eines Gipskristalles im Detail. Vergrößerung: 4500fach.

## 4 BREITENAU

### 4.1 Umweltrelevante Angaben zum Standort

Im Werk Breitenau der Firma Veitsch-Radex AG werden auf Basis von bergmännisch gewonnenem Naturmagnesit feuerfeste Produkte hergestellt. Außerdem ist Breitenau ein wichtiger Rohstofflieferant für die Steinfabriken der Schwesterwerke in Trieben und Veitsch. Es werden jährlich ca. 400.000 t Rohmagnesit gefördert und daraus ca. 200.000 t Sintermagnesit gebrannt.



Lageskizze der Probepunkte im Untersuchungsgebiet Breitenau/Steiermark.

Produktionsbedingten Einfluß auf die Umwelt haben im wesentlichen die festen und gasförmigen Emissionen wie MgO-Staub, SO<sub>2</sub> und NO<sub>x</sub>. Um diese Einflüsse möglichst gering zu halten, werden im Werk Breitenau Gewebefilter und Elektrofilter zur Entstaubung der Anlagen betrieben. Weiters wurde im Jahre 1991/92 eine Entschwefelungsanlage für einen Drehrohrofen errichtet (persönliche Mitteilung von Dir. DI. Klenner der Fa. Veitsch Radex AG).

Probepunkt	Seehöhe	Baumalter	Exposition
36	700 m	62 Jahre	Nord/West
74	910 m	102 Jahre	Süd
84	920 m	82 Jahre	Nord
101	700 m	82 Jahre	Ost
116	700 m	87 Jahre	Süd

*Tabelle 5: Standortparameter der Probepunkte im Untersuchungsgebiet Breitenau; erhoben von der Landesforstdirektion Steiermark*

#### 4.2 Ergebnisse der Nadeluntersuchungen

Mit einem Wert von  $2,9 \pm 0,64$  wies der im Emissionszentrum gelegene Probepunkt 116 die stärksten Wachsdegradationen des Untersuchungsgebietes auf. 25 % der untersuchten Stomata waren mit Staubpartikeln, 39 % mit Epibionten bedeckt. Wie bereits bei Brückl, läßt sich auch hier eine Abhängigkeit der Epibiontenbelegung von der Entfernung zur Emissionsquelle erkennen. Mittels EDX-Analyse konnte im Staub Magnesium nachgewiesen werden. Magnesiumhaltige Partikel sind in den Abbildungen 18 bis 20 dargestellt. Zusätzlich konnten an den Nadeloberflächen dieses Punktes Gipskristalle detektiert werden (Abb. 21). Die Nadelanalysen ergaben die höchsten Magnesium- und Eisengehalte des Untersuchungsgebietes. Die Ergebnisse lassen daher den Schluß zu, daß die Fichten dieses werksnahen Probepunktes einem Immissionseinfluß ausgesetzt sind.

An Nadeln des westlich des Werkes befindlichen Probepunktes 74 konnten ebenfalls Gipskristalle beobachtet werden (Abb. 22 und 23). Staubpartikel wurden nicht nachgewiesen, die Belegung mit Epibionten lag bei 15 %.

Probepunkt	Wachsqualität	Staub %	Epibionten %
36	2,2 ± 0,60	0	11
74	2,3 ± 0,93	0	15
84	2,1 ± 0,68	1	6
101	2,1 ± 0,70	0	3
116	2,9 ± 0,64	25	39

Tabelle 6: Wachsqualität (Mittelwert und Standardabweichung), Staubebelegung und Belegung der Nadeln mit Epibionten im Untersuchungsgebiet Breitenau

Alle Schwefelwerte der Nadeln lagen über dem gesetzlich festgelegten Grenzwert von 0,11 %. Die höchsten Schwefelgehalte wiesen die Fichtennadeln des Probepunktes 36 östlich des Werkes auf.

PP Nr.	S-Gesamt %	N-Kjeldahl %	Ca mg/kg	K mg/kg	Mg mg/kg	P mg/kg
36	0,16	1,5	4780	7353	2787	2337
74	0,14	1,3	4834	7320	1951	1736
84	0,12	1,3	7910	5629	1087	1578
101	0,12	1,3	5160	6354	1471	1397
116	0,14	1,2	4111	4465	4540	1959

Tabelle 7: Schwefel- und Nährelementgehalte von Fichtennadeln im Untersuchungsgebiet Breitenau. GW für S im 1. Njg.: 0,11%.



PP Nr.	Cu mg/kg	Zn mg/kg	Mn mg/kg	Fe mg/kg	Al mg/kg
36	4,3	35	214	53	< 11
74	3,2	45	461	44	16
84	3,5	28	149	42	13
101	3,0	42	512	34	25
116	3,1	41	107	116	27

Tabelle 8: Metallgehalte von Fichtennadeln im Untersuchungsgebiet Breitenau.

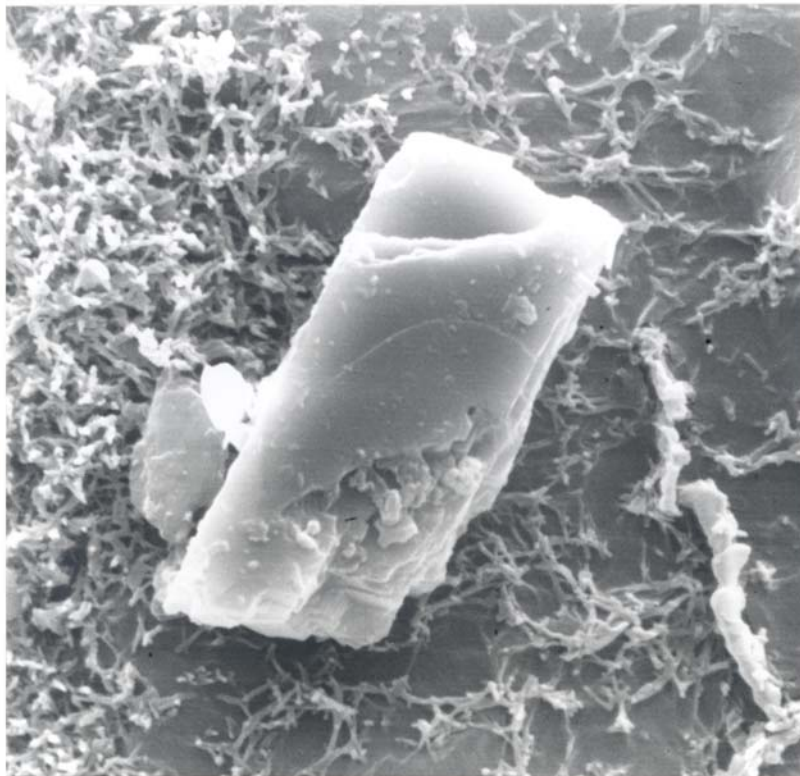


Abb. 18: BREITENAU / 116, REM-Aufnahme eines Mg-haltigen Staubpartikels.  
Vergrößerung: 4500fach.

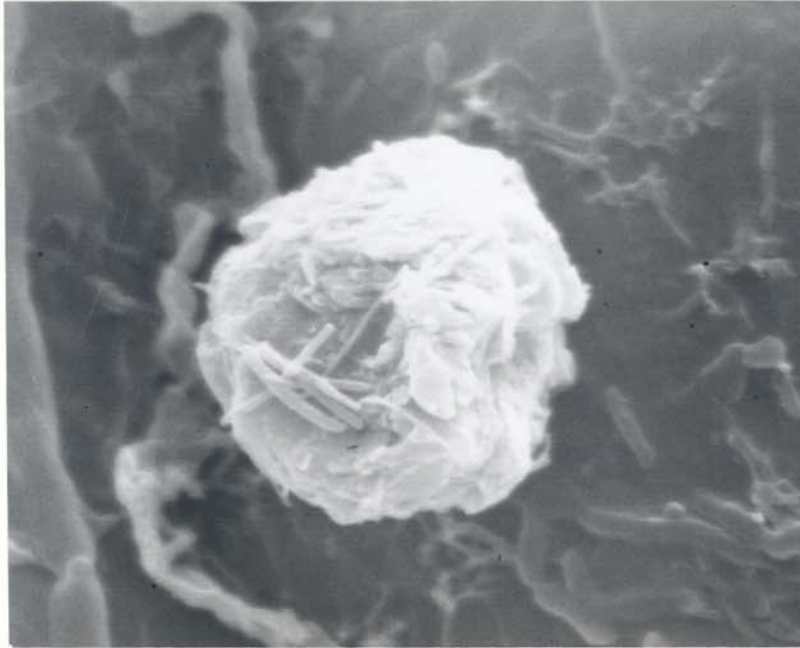


Abb. 19: BREITENAU / 116, REM-Aufnahme eines Staubpartikels. Vergrößerung: 7500fach.

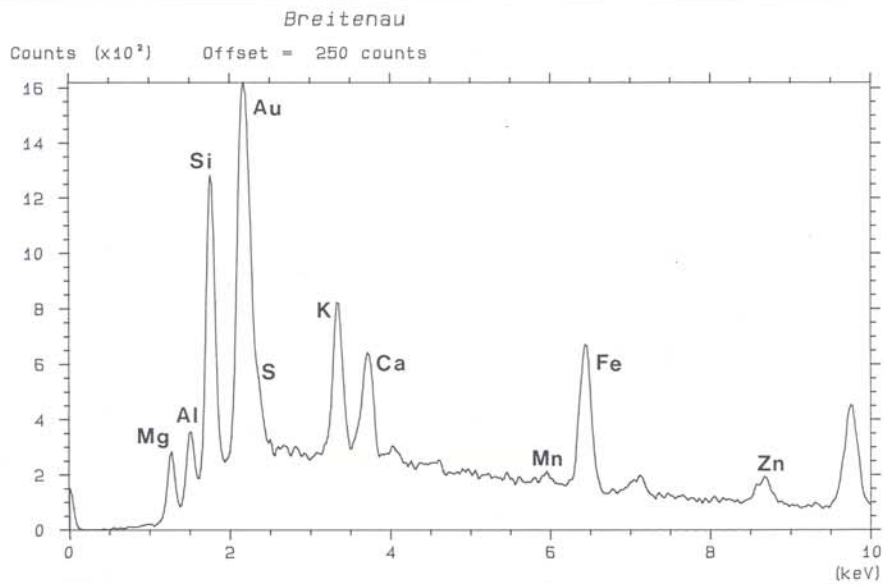


Abb. 20: BREITENAU / 116, EDX-Spektrum zu Abb. 19



Abb. 21: BREITENAU / 116, REM-Aufnahme eines Nadelbereiches mit zahlreichen Gipskristallen.  
Vergrößerung: 350fach.

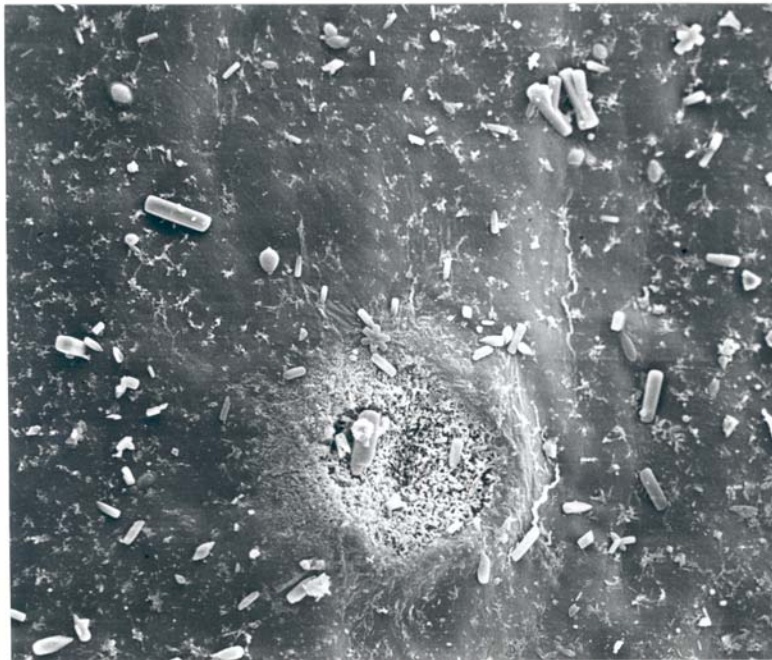
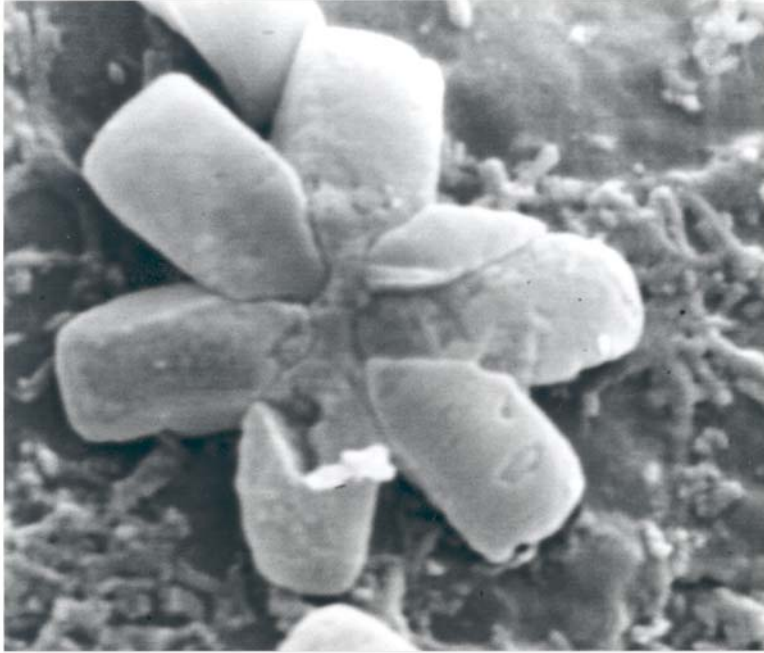


Abb. 22: BREITENAU / 74, REM-Aufnahme einer Nadeloberfläche mit Gipskristallen.  
Vergrößerung: 750fach.



*Abb. 23: BREITENAU / 74, REM-Aufnahme eines einzelnen Kristalles.  
Vergrößerung: 15000fach*

## 5 STADTPROFIL GRAZ

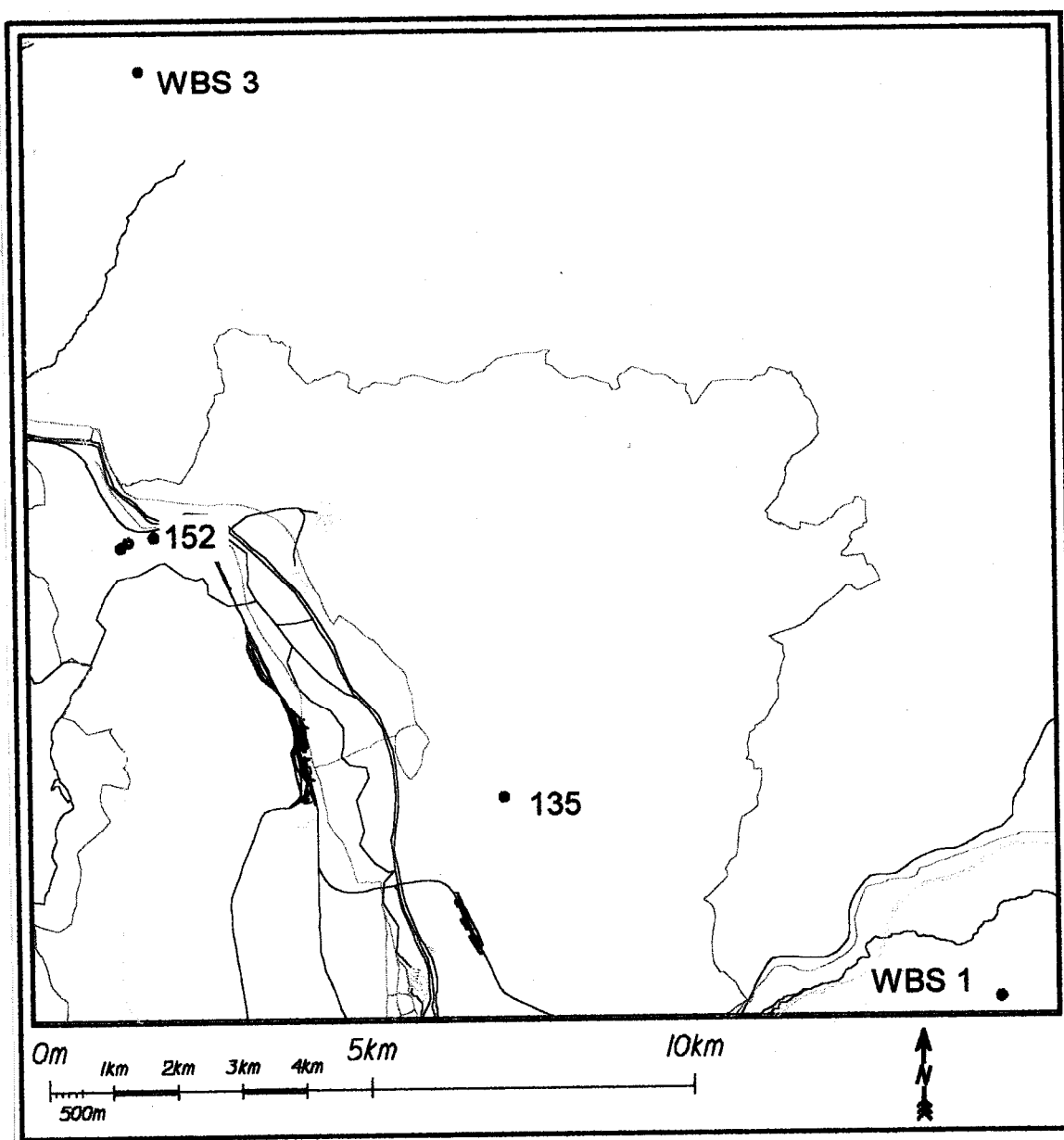
### 5.1 Lage und Klima

Das Grazer Becken ist immissionsklimatologisch von seiner Lage am Ausgang des Murdurchbruchtales am Fuß des steirischen Randgebirges geprägt. Aus der abgeschirmten Lage südlich der Alpen resultiert eine vergleichsweise geringe Beeinflussung durch die im Großteil Österreichs wetterwirksamen Strömungslagen aus dem West- bis Nordsektor. Damit verbunden ist eine generelle Windarmut und, der Beckenlage entsprechend, eine große Inversions- und Talnebelbereitschaft gegeben. Die lufthygienischen Rahmenbedingungen müssen also als ungünstig angesehen werden.

Bei einem hohen Anteil an Strahlungswetterlagen (60 bis 70 % der Tage im Herbst) gewinnt vor allem in der lufthygienisch kritischeren kalten Jahreszeit das stark ausgeprägte Lokalwindsystem an Bedeutung. Der Norden der Stadt liegt dabei nachts und vormittags im Einflußbereich des Murtalabwindes, der gemeinsam mit dem Kaltluftabfluß aus den nordöstlichen und östlichen Seitentälern den wichtigsten Frischluftzubringer der Stadt darstellt. Dementsprechend können der Norden und Osten der Stadt als im innerstädtischen Vergleich besser ventilierte und lufthygienisch begünstigte Lagen bezeichnet werden. Südlich der Linie Hauptbahnhof-Schloßberg-Landeskrankenhaus greift der Murtalabwind nur mehr selten bis zum Talboden durch, hier und im Süden von Graz gewinnen dadurch die relativ geringmächtigen und schwachen Flurwinde an Bedeutung. Diese entstehen aufgrund des Temperaturgradienten zwischen der städtischen Wärmeinsel und dem deutlich kälteren Grazer Feld und verfrachten die Luft in Bodennähe aus dem Süden der Stadt in Richtung Stadtzentrum. Der Westen von Graz ist aufgrund des Fehlens von Seitentälern generell schlechter durchlüftet.

## 5.2 Umweltrelevante Angaben zum Untersuchungsgebiet

Emissionsseitig stellt in Graz zur Zeit sicher der Verkehr und die damit verbundenen Schadstoffe (vor allem Stickstoffoxide und Schwebstaub) das Hauptproblem dar. Besonders bei morgendlichen Bodeninversionen im Winterhalbjahr kommt es hier durch die Morgenverkehrsspitze häufig zu erhöhten Schadstoffkonzentrationen. Der Schwerpunkt der Verkehrsdichte liegt dabei im Süden, Westen und im Zentrum der Stadt.



Lageskizze der Probepunkte im Untersuchungsgebiet Graz

Die Hausbrandemissionen sind durch die verstärkte Forcierung von Fernwärme und Erdgas stark zurückgegangen und nach wie vor rückläufig. Graz ist diesbezüglich mittlerweile sehr gut erschlossen.

Auch bei den gewerblichen Emissionen zeigt sich eine innerstädtische Differenzierung mit dem Schwerpunkt der Industrie - die allerdings nicht die Größenordnungen wie in Linz oder Wien erreicht - im Westen, Südwesten und Süden der Stadt.

Zusammenfassend kann in Graz also zwischen einem lufthygienisch begünstigten Nord- und Ostteil sowie einem stärker belasteten Süden, Westen und Zentrum unterschieden werden. Dies wird auch durch die Ergebnisse der langjährigen Luftgütemessungen durch das Amt der Steiermärkischen Landesregierung bestätigt.

Von den insgesamt vier untersuchten Probepunkten im Raum Graz liegen zwei im unmittelbaren Stadtgebiet: Der Probepunkt 152 liegt auf 450 m Seehöhe in Nord- bis Nordostexposition an einem Prallhang nördlich der Ruine Gösting im gut ventilierten Engtalabschnitt des Murtales am Nordeingang von Graz. In einer Entfernung von etwa 500 m befindet sich ein Abgasschacht des Plabutschtunnels. Im Talbodenbereich verlaufen die Murtalschnell- und -bundesstraße, talaufwärts liegt das Gratkorn Becken, in dem sich ein Großemittent (Papierfabrik) befindet. Emissionen dieses Werkes dürften jedoch nur selten in nennenswerten Konzentrationen zu dem vorliegenden Standort gelangen. Der zweite innerstädtische Probepunkt 135 liegt in 370 m Seehöhe im Osten der Stadt in verbautem Gebiet. Nadeln dreier Bäume eines im Norden deutlich außerhalb des Stadtgebietes in 680 m Seehöhe am Westabhang der hohen Rannach gelegenen WBS-Punktes 3 sowie zwei Fichten eines weiteren WBS-Punktes südöstlich von Graz (WBS 1) standen für die Nadelanalysen zur Verfügung. Punkt WBS 1 liegt ebenfalls außerhalb des Stadtgebietes in 420 m Seehöhe im Oststeirischen Hügelland. Für beide Probepunkte gilt, daß sie sich nicht mehr im direkten Einflußbereich der Stadt befinden, es können aber unter bestimmten meteorologischen Voraussetzungen durchaus Immissionen aus städtischen Quellen auftreten.

### 5.3 Ergebnisse der Nadeluntersuchungen

Für die Nadelwachse des Probepunktes 152 (Plabutsch Nordportal) wurde eine mittlere Wachsqualität von  $2,5 \pm 0,86$  ermittelt. Dieser Wert entspricht einer leichten Beeinträchtigung der Stomatawachse. 72% der mit dem Rasterelektronenmikroskop untersuchten Spaltöffnungen entsprachen Qualitätsklasse 2. Eine charakteristische Spaltöffnung mit leicht beeinträchtigten Wachsstrukturen ist in Abbildung 24 dargestellt. Dieser Probepunkt war auch der einzige des Untersuchungsgebietes, der eine geringe Belegung der Nadeloberflächen mit staubförmigen Fremdpartikeln aufwies (3 %). Unter anderem konnten im Staub vereinzelt kleine Kristalle beobachtet werden. Mittels EDX-Analyse wurden diese als Gips identifiziert (Abbildung 25). Biologisches Material (Pilzhyphen, Sporen, Algenlager,...) wurden an 19 % der untersuchten Stomata gefunden. Eine geringe Grenzwertüberschreitung bei Chlor (0,11 %) sowie bei Schwefel (0,14 %) konnte ebenfalls verzeichnet werden (Tabelle 10). Eine Beeinflussung der Fichtennadeln vor allem durch verkehrsbedingte Schadstoffe kann daher für diesen Probepunkt angenommen werden.

Probepunkt	Wachsqualität	Staub %	Epibionten %
WBS 1/1	$2,4 \pm 0,40$	0	19
WBS 2/1	$1,8 \pm 0,30$	0	32
32	$1,9 \pm 0,36$	0	1
33	$2,0 \pm 0,56$	0	3
34	$1,9 \pm 0,40$	0	7
152	$2,5 \pm 0,86$	3	19
135	$2,3 \pm 0,38$	0	15

Tabelle 9: Wachsqualität (Mittelwert und Standardabweichung), Staubbelegung und Belegung der Nadeln mit Epibionten Untersuchungsgebiet Graz.



Alle anderen Mittelwerte, die die Wachsqualität von Fichtennadeln an den einzelnen Probepunkten widerspiegeln, lagen unter dem für den Standort 152 ermittelten Wert (Tabelle 9). Die Mittelwerte befanden sich im Bereich von 1,8 bis 2,4. Die höchste Belegung der Nadeloberflächen mit Epibionten wiesen die Nadeln der beiden am Hintergrundstandort WBS 1, südöstlich der Stadt befindlichen Fichten auf.

An allen Probepunkten des Untersuchungsgebietes Graz wurden Grenzwert-überschreitungen bei Schwefel in den Nadeln verzeichnet (Tabelle 10). Der höchste Schwefelwert (0,16 %) wurde am Probepunkt 34 (WBS-Punkt 3 nördlich von Graz) gemessen. Es könnte sich dabei um eine Beeinflussung durch städtische Quellen handeln oder aber auch aus dem Gratkorner Becken (Großemittent Papierfabrik) stammen.

PP Nr.	Cl %	S-Gesamt %	N-Kjeldahl %	Ca mg/kg	K mg/kg	Mg mg/kg	P mg/kg
WBS 1/1	*	0,14	1,4	4946	4839	1424	1884
WBS 2/1	*	0,12	1,5	5154	9659	1171	1736
32	*	0,12	1,2	6581	5887	1058	1282
33	*	0,12	1,3	7397	9705	980	1454
34	*	0,16	1,5	5591	9645	1172	1925
152	0,11	0,14	1,5	8652	4756	2951	1561
135	0,07	0,12	1,4	6891	7956	938	2192

Tabelle 10: Cl-, S- und Nährelementgehalte von Fichtennadeln im Untersuchungsgebiet Graz  
\* nicht analysiert

PP Nr.	Cu mg/kg	Zn mg/kg	Mn mg/kg	Fe mg/kg	Al mg/kg
WBS 1/1	4,4	19	1103	40	22
WBS 2/1	3,6	27	1033	37	24
32	3,2	47	385	58	34
33	3,7	40	221	52	22
34	4,4	33	215	67	24
152	4,6	64	42	84	25
135	4,7	24	11	94	34

Tabelle 11: Metallgehalte von Fichtennadeln im Untersuchungsgebiet Graz

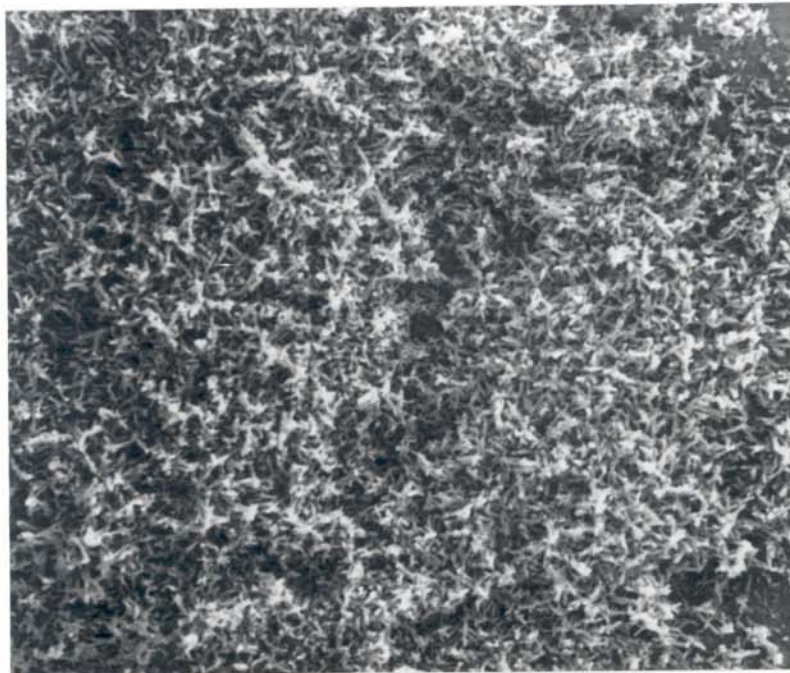


Abb. 24: GRAZ / Probepunkt 152; REM-Aufnahme einer charakteristischen Spaltöffnung mit leicht beeinträchtigtger Wachsmikrostruktur. Vergrößerung: 3000fach.



Abb. 25: GRAZ / Probepunkt 152; REM-Aufnahme einer Spaltöffnung mit Staubpartikeln und kleinen Gipskristallen. Vergrößerung: 3000fach.

## 6 QUELLENNACHWEIS

BERICHT ÜBER DIE UMWELTSITUATION AN AUSGEWÄHLTEN LANGJÄHRIGEN INDUSTRIESTANDORTEN. 1992, Umweltbundesamt Wien.

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

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

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

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

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

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

HAFNER, L., 1986:

Zur Feinstruktur der geschädigten Kiefernadel. *AFZ* 45, S. 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, S. 79-86.

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

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

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

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

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, S. 313-322.

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

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

ÖNORM M 6279, 1991:

Bestimmung von 33 Elementen mittels ICP-AES.

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, S. 444-448.

THANNER, G., MOCHE, W., 1996:

Dioxinimmissionen in Leoben/Donawitz. UBA-BE-066, Umweltbundesamt Wien.

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, S. 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.

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, S. 316-319.