

**DIE BEEINFLUSSUNG DER WACHS-
STRUKTUREN VON FICHTENNADELN
DURCH IMMISSIONEN IN
BRIXLEGG UND LINZ**

**DIE BEEINFLUSSUNG DER WACHS-
STRUKTUREN VON FICHTENNADELN
DURCH IMMISSIONEN IN BRIXLEGG
UND LINZ**

**Eine Studie mit dem
Rasterelektronenmikroskop**

Cristina Trimbacher

UBA-BE-055

Wien, Februar 1996

Bundesministerium für Umwelt



Autorin: Dr. Cristina Trimbacher

Projektleitung: Dr. Cristina Trimbacher

unter Mitarbeit von: Bernhard Gröger, Andreas Knieschek, DI Peter Weiss

Wir danken den Mitarbeitern der Landesforstdirektion für Tirol sowie der Landesforstinspektion für Oberösterreich für die Organisation und Durchführung der Probenahmen von Fichtennadeln.

Impressum:

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

© Umweltbundesamt, Wien, Februar 1996

Alle Rechte vorbehalten
ISBN 3-85457-293-X

INHALTSVERZEICHNIS

1. Einleitung	S. 1
2. Methodik	S. 2
2.1. Probenahme und Probenvorbereitung	S. 2
2.2. Beurteilungsmethode	S. 2
2.2.1. Wachsmorphologie	S. 2
2.2.2. Qualitätsklassen	S. 3
2.2.3. Erhebungsdesign	S. 4
3. Standortsbeurteilung	S. 9
3.1. Brixlegg	S. 9
3.1.1. Matzenköpfl	S. 10
3.1.2. Kramsach	S. 13
3.2. Linz	S. 16
3.2.1. Pfenningberg	S. 17
3.2.2. Kürnberger Wald	S. 20
3.2.3. Koglerau	S. 22
4. Zusammenfassung	S. 24
4.1. Allgemeines	S. 24
4.2. Brixlegg	S. 24
4.3. Linz	S. 27
5. Literatur	S. 30
6. Abbildungsteil	S. 32



KURZFASSUNG

Fichtennadelwachse zweier Standorte (Matzenköpfl - Prallhang, Kramsach) aus dem Industrieraum Brixlegg der Jahre 1987, 1994 und 1995 wurden mit dem Rasterelektronenmikroskop untersucht. Für den 1. Nadeljahrgang 1987 konnte an beiden Standorten eine erhebliche Beeinträchtigung der Wachsstrukturen sowie eine massive Staubbelegung der Nadeln mit zum Teil schwermetallhaltigen Partikeln nachgewiesen werden. Diese starke Beeinflussung der Nadeln kann mit dem bis zu diesem Zeitpunkt noch massiven Immissionseinfluß der lokalen Kupferhütte Brixlegg in Verbindung gebracht werden. Im Vergleich dazu konnte für den 1. Nadeljahrgang 1994 eine deutlich verbesserte Wachsqualität ermittelt werden. Dies gilt auch für Nadeln aus 1995, wenngleich die Wachsqualität am Matzenköpfl als wiederum leicht beeinträchtigt einzustufen ist. Ein lokal und zeitlich begrenzter Einfluß von Luftschadstoffen kann daher vermutet werden. Die Belegung der Nadeloberfläche mit Staubpartikeln in den letzten beiden Jahren war ebenso wesentlich geringer als 1987. Die bedeutend bessere Wachsqualität der Fichtennadeln der letzten beiden Jahre, die mittlerweile der unbeeinflusster Hintergrundstandorte entspricht und die relativ geringe Staubbelegung lassen auf einen Rückgang der Immissionsbelastung in diesem Gebiet gegenüber 1987 schließen. Eine Verbesserung der Umweltsituation im Raum Brixlegg konnte nicht zuletzt durch entsprechende, werkseitige emissionsreduzierende Maßnahmen seit dem Jahre 1989 erzielt werden.

Als zweites Untersuchungsgebiet wurde der städtische und industrielle Großraum Linz ausgewählt. Fichtennadeln des Standortes Pfenningberg bei Steyregg (Prallhang östlich von Linz) zeigten 1989 stark beeinträchtigte Wachsstrukturen und eine erhebliche Staubbelastung. 1994 und 1995 konnte nur eine geringfügige Verbesserung der Wachsqualität verzeichnet werden. Die Wachsstrukturen sind nach wie vor durch Immissionen beeinträchtigt. Nadeln aus dem Kürnberger Wald westlich von Linz sind ebenso den Immissionen aus Linz, wenn auch in geringerem Maß ausgesetzt. Es war dies der einzige Standort im Untersuchungsgebiet, an dem einige Fichtennadeln Gipskristalle an ihren Oberflächen aufwiesen. In der Literatur werden Gipskristalle häufig mit einer erhöhten Belastung durch Schwefeldioxid in Verbindung gebracht. Insgesamt weist der Kürnberger Wald eine schlechtere

Wachsqualität auf, als es für Hintergrundstandorte typisch ist. Auch andere Untersuchungen ergaben nachweislich, daß der Kürnberger Wald durch Emissionen aus dem industriellen und urbanen Ballungsraum Linz beeinflusst ist. Die Nadelwachse aus der nord-westlich von Linz gelegenen Koglerau wiesen weitgehend unbeeinträchtigte Wachsstrukturen, wie sie auch für Hintergrundstandorte typisch sind, auf. Durch die Lage des Standortes außerhalb des Einflußbereichs von Linz war dieses Ergebnis zu erwarten.

Allgemein läßt sich feststellen, daß sich die deutlichen Emissionsreduktionen in Linz während der letzten Jahre noch nicht in einer wesentlichen Verbesserung der Wachsqualität von 1994 und 1995 gegenüber 1989 widerspiegeln, wie dies etwa in Brixlegg durch Emissionsreduktionen des allerdings einzigen wesentlichen Emittenten in der Region dokumentiert werden konnte.

1. EINLEITUNG

Wachse bilden die äußerste Schichte von Fichtennadeln und sind primäre Angriffspunkte für Luftschadstoffe. Vor allem anthropogene Umwelteinflüsse können die Mikrostruktur dieser Nadelwachse beeinträchtigen und dadurch zu einem frühzeitigen Nadelverlust führen. Mit Hilfe des Rasterelektronenmikroskops (REM) können diese Wachsstrukturen sichtbar gemacht und Veränderungen (z. B.: Wachsverschmelzungen, Wachserosion) dokumentiert werden.

Im Rahmen einer Studie des Umweltbundesamtes wurde eine neue Methode zur Klassifizierung von Nadelwachsverschmelzungen bei Fichten mit dem Rasterelektronenmikroskop (REM) 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.

Mit Hilfe dieses neuen Beurteilungsschlüssels wurden in der vorliegenden Arbeit Nadelproben der Industriestandorte Brixlegg und Linz untersucht. Nadelmaterial aus früheren Jahren (1. Nadeljahrgang 1987, 1989 und 1994) wurde bewertet und mit dem 1. Nadeljahrgang 1995 verglichen. Dadurch wird eine aktuelle Beurteilung der Nadelwachsqualität im Vergleich zum damaligen Zustand möglich und daraus abgeleitet, eine Darstellung in Form einer Zeitreihe.

2. METHODIK

2.1. Probenahme und Probenvorbereitung

Die Probenahme von Fichtennadeln an den Untersuchungsstandorten erfolgte gemäß den Bestimmungen der 2. Verordnung gegen forstschädliche Luftverunreinigungen durch die jeweils zuständigen Landesforstdienste. Die für die vorliegende Untersuchung ausgewählten Standorte sind Teile des Österreichischen Bioindikatornetzes (BIN). 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 so rasch wie möglich dem Umweltbundesamt übermittelt.

Im Labor wurden die Fichtennadeln 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 Stomatawachs im REM wurde stets eine Beschleunigungsspannung von 15 keV und eine Standardvergrößerung von 2000fach gewählt.

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). Erste Strukturveränderungen der Epicuticularwachse äußern sich in kleinflächigen, apikal beginnenden Fusionen einzelner bzw. einiger weniger Wachstubuli (Abb. 2). In weiterer Folge können netzartige Wachsverschmelzungen beobachtet werden (Abb. 3), 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).

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).

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 Spaltöffnungsreich zu kleinflächigen Aggregationen, sog. "Wachstufen" fusionieren, die mehr als **10 %** bis maximal **25 %** der Gesamtstomatafläche ausmachen.

Qualitätsklasse 3: Neben den Wachstufen treten nun 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 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) oder deren Bewertung durch das Auftreten eines dichten Staubüberzuges (Abb. 5) 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.

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. 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.

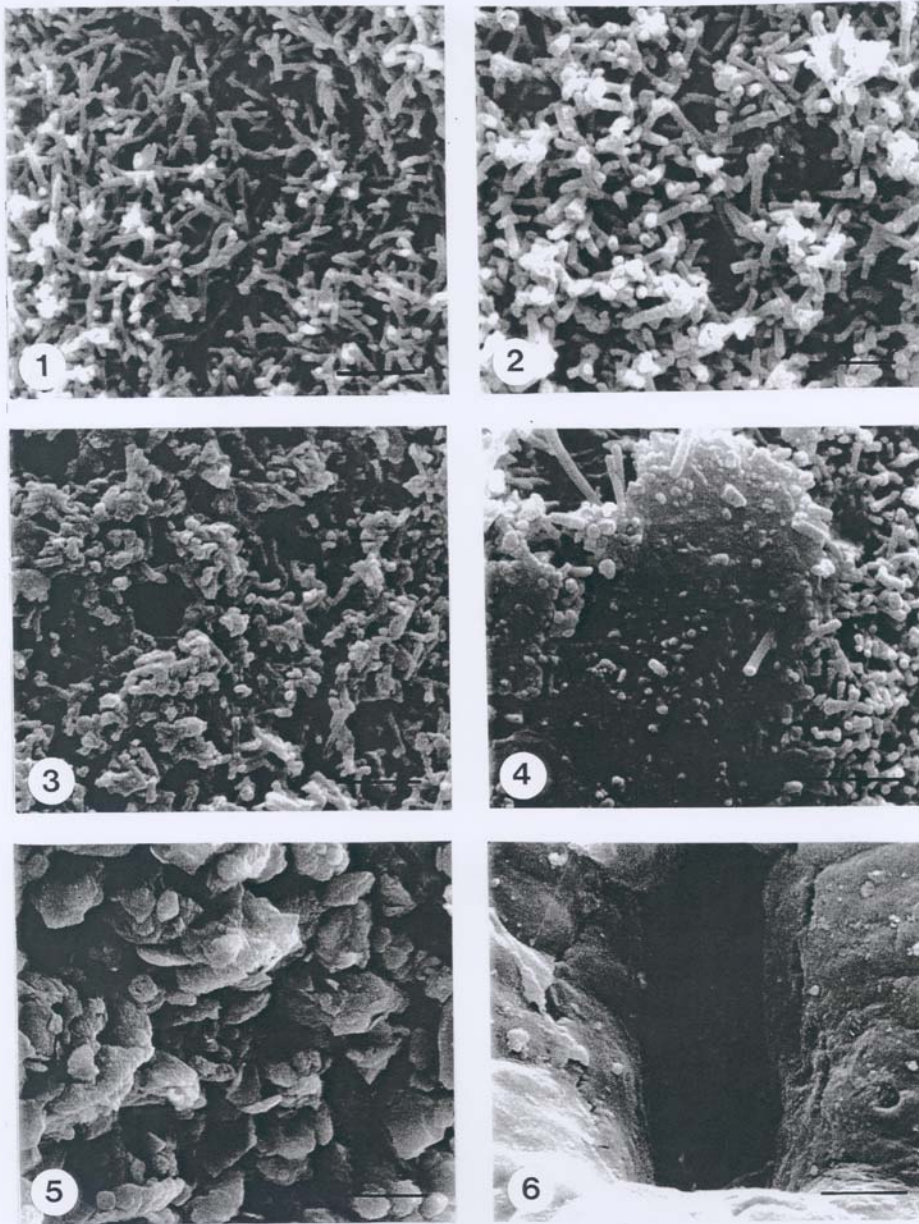
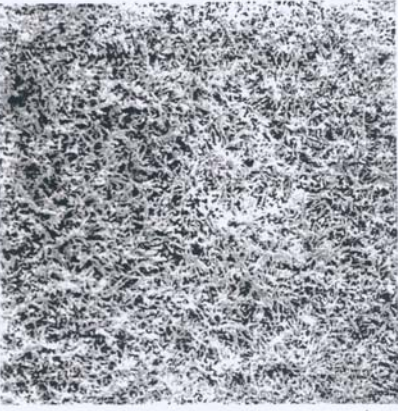
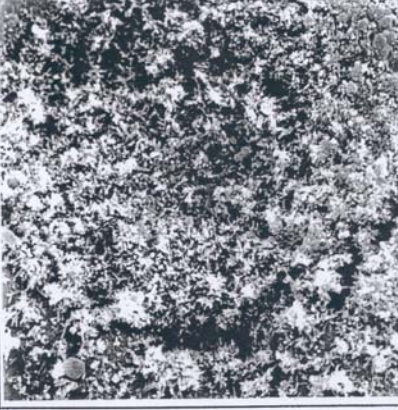



Abb. 1 - 6: REM-Aufnahmen unterschiedlicher Ausbildungsformen der Stomatawachse bei der Fichte. Intakte Wachsröhrchen (Abb. 1), kleinflächige Wachsfusionen (Abb. 2), netzartige Wachstrukturen (Abb. 3), Wachsplatte (Abb. 4), Staubbelag (Abb. 5), vollständig kahle Spaltöffnung (Abb. 6). Abb. 1 - 4: Vergrößerungsmaßstab entspricht 2 μ m, Abb. 5, 6: Vergrößerungsmaßstab entspricht 5 μ m.

Qualitäts- klassen	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>	


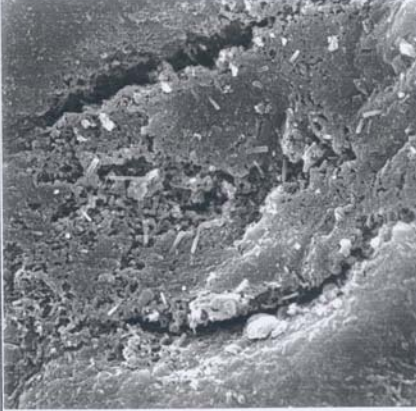
Qualitäts- klassen	Beurteilung des Stomatawachses	Typisches Erscheinungsbild im REM, 2000x
4	Mehr als 50 bis max. 75 % der Stomatafläche weisen plattenartig verschmolzene Wachsstrukturen auf.	
5	Mehr als 75 bis 100 % der Stomatafläche weisen verschmolzene Wachsstrukturen auf, d. h. die Spaltöffnung ist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

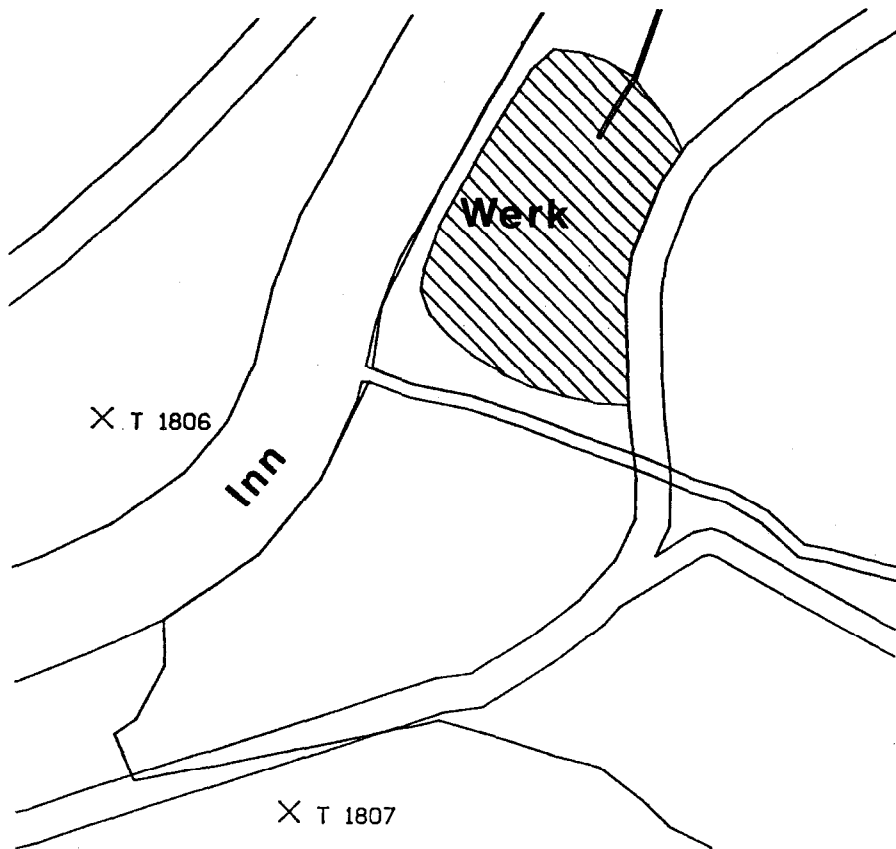
Abb. 7: Schlüssel zur Klassifizierung von epistomatären Nadelwachsverschmelzungen bei der Fichte für den 1. Nadeljahrgang.

3. STANDORTSBEURTEILUNG

3.1. Brixlegg

Seit dem Jahre 1953 wird in der Kupferhütte der Montanwerke Brixlegg Ges. m. b. H. am Standort Brixlegg (Tirol) im Unterinntal eine Elektrolyseanlage zur Kupferraffination betrieben. Nachweislich verursachten die Emissionen der Anlagen starke Waldschäden. Durch entsprechende emissionsreduzierende Maßnahmen seit dem Jahre 1989 (Installation einer Nachverbrennungsanlage am Schachtofen) ist es mittlerweile zu einer Verbesserung der Umweltsituation gekommen.

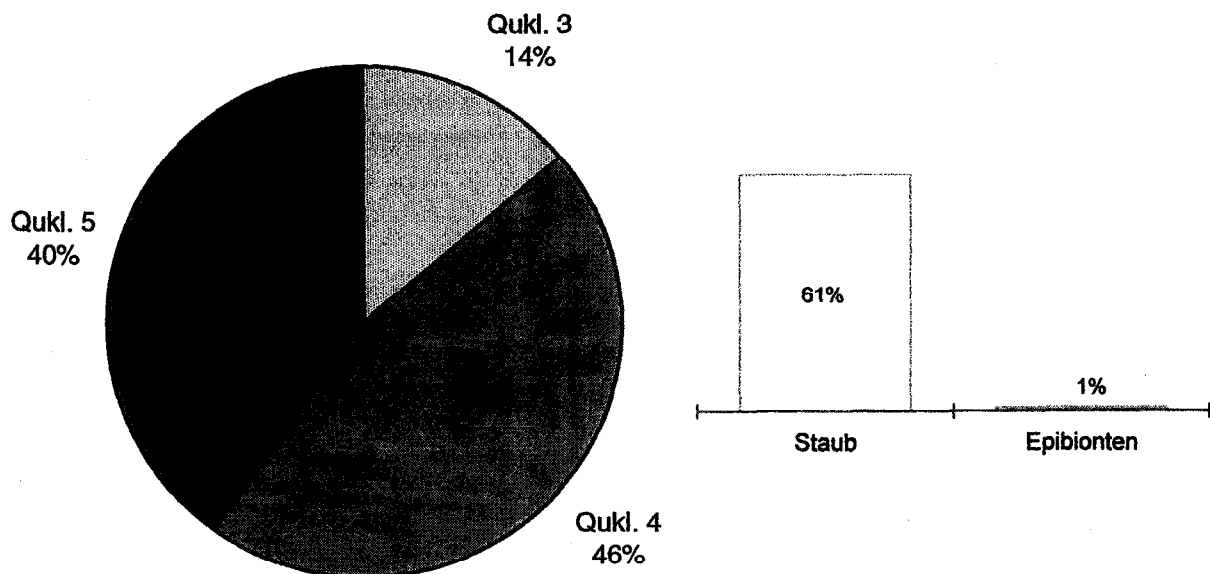
Zur Untersuchung von Fichtennadeln boten sich die Standorte Matzenköpfl (Hauptbelastungsgebiet) und Kramsach an, da von diesen Gebieten auch älteres Nadelmaterial verfügbar war und umfangreichere Daten vorliegen.



Lageskizze der Probenahmestellen von Fichtennadeln im Raum Brixlegg.
 T 1806...BIN-Standort li. Innufer / Kramsach
 T 1807...BIN-Standort Matzenköpfl (Hauptwindrichtung)

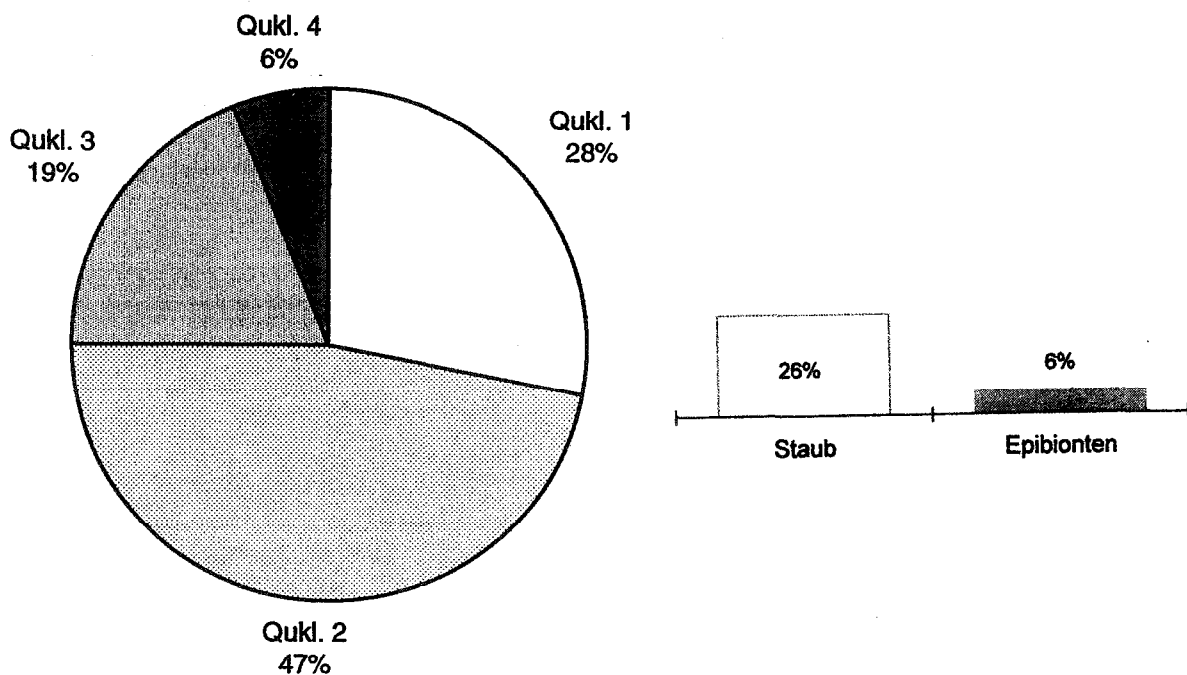
3.1.1. Matzenköpfl

Fichtennadeln des 1. Nadeljahrganges 1987 des Standortes 1807 des Tiroler Bioindikatorsnetzes wiesen eine mittlere Wachsqualität von $MW 4,2 \pm SD 0,63$ auf. Dieser Wert spiegelt den schlechten Erhaltungszustand der Stomatawachse wider (= starke Beeinträchtigung). Abbildung 8 gibt eine typische Spaltöffnung wieder. Keine einzige Spaltöffnung konnte Qualitätsklasse 1 bzw. Qualitätsklasse 2 zugeordnet werden. Nur 14 % entsprachen Qualitätsklasse 3. Jeweils fast die Hälfte der untersuchten Stomatawachse mußte mit Qualitätsklasse 4 und 5 beurteilt werden. Auffällig war, daß insgesamt 61 % der bewerteten Spaltöffnungen erheblich durch Staubpartikel kontaminiert waren. Die EDX-Analyse dieser Partikel ergab neben den natürlicherweise im Staub enthaltenen Elementen Silicium und Calcium auch erhöhte Anteile an Eisen (Abb. 9).



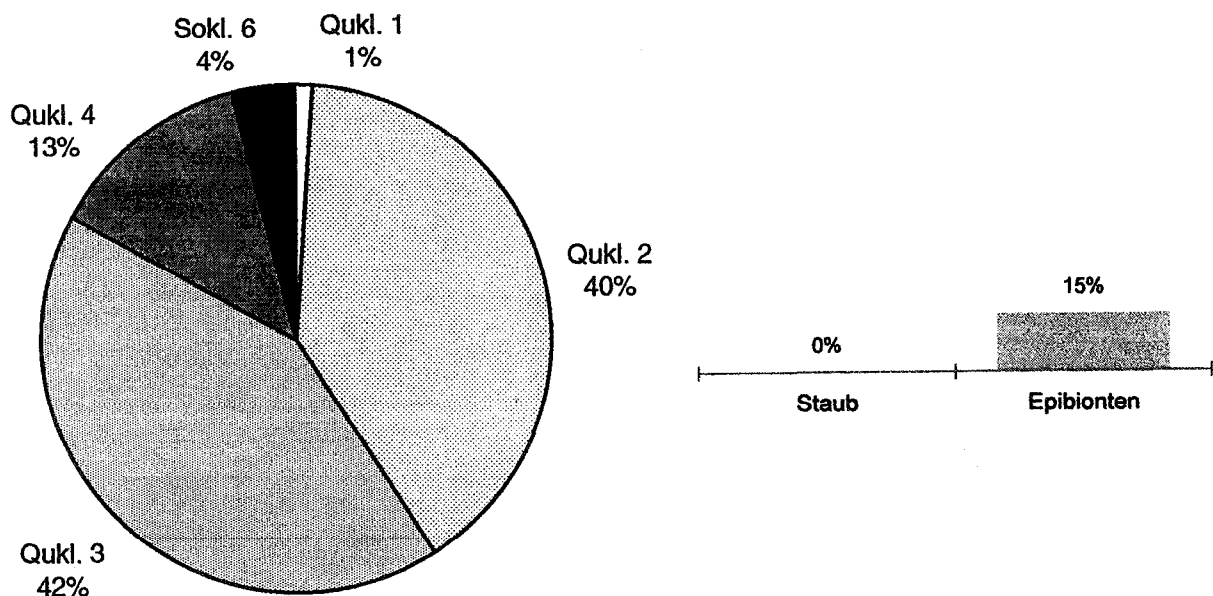
Brixlegg/Matzenköpfl. 1. Njg. 1987: Darstellung der prozentuellen Verteilung der Wachsqualität in den einzelnen Qualitätsklassen (Kreisdiagramm) sowie der Partikelbelegung (Säulendiagramm).

Im Vergleich dazu zeigten die Fichtennadeln des 1. Nadeljahrganges 1994 eine bedeutend bessere Wachsqualität. Der Mittelwert der Qualitätsklassen der untersuchten Stomatawachse betru $MW 2,0 \pm SD 0,73$. Fast die Hälfte der untersuchten Stomatawachse wurde mit Qualitätsklasse 2 bewertet. Wachsdegradationen, entsprechend Qualitätsklasse 5, konnten an keinem der untersuchten Stomatawachse gefunden werden. Die Belegung der Nadeloberfläche durch Staubpartikel war mit 26 % vergleichsweise deutlich geringer als für den 1. Nadeljahrgang 1987. Die Staubteilchen setzten sich aus den Elementen Aluminium, Silicium, Schwefel, Chlor, Kalium und Calcium zusammen. Eisen konnte im Vergleich zu 1987 nur mehr als kleiner Peak im Elementspektrum detektiert werden, wie es üblicherweise unbelastetem Staub entspricht (Abb. 10). Dieser Umstand, nämlich ein guter Erhaltungszustand der epistomatären Wachsstrukturen sowie eine geringere Staubbelastung lassen auf eine rückläufige Belastungssituation schließen (Abb. 11).



Brixlegg/Matzenköpfl. 1. Njg. 1994: Darstellung der prozentuellen Verteilung der Wachsqualität in den einzelnen Qualitätsklassen (Kreisdiagramm) sowie der Partikelbelegung (Säulendiagramm).

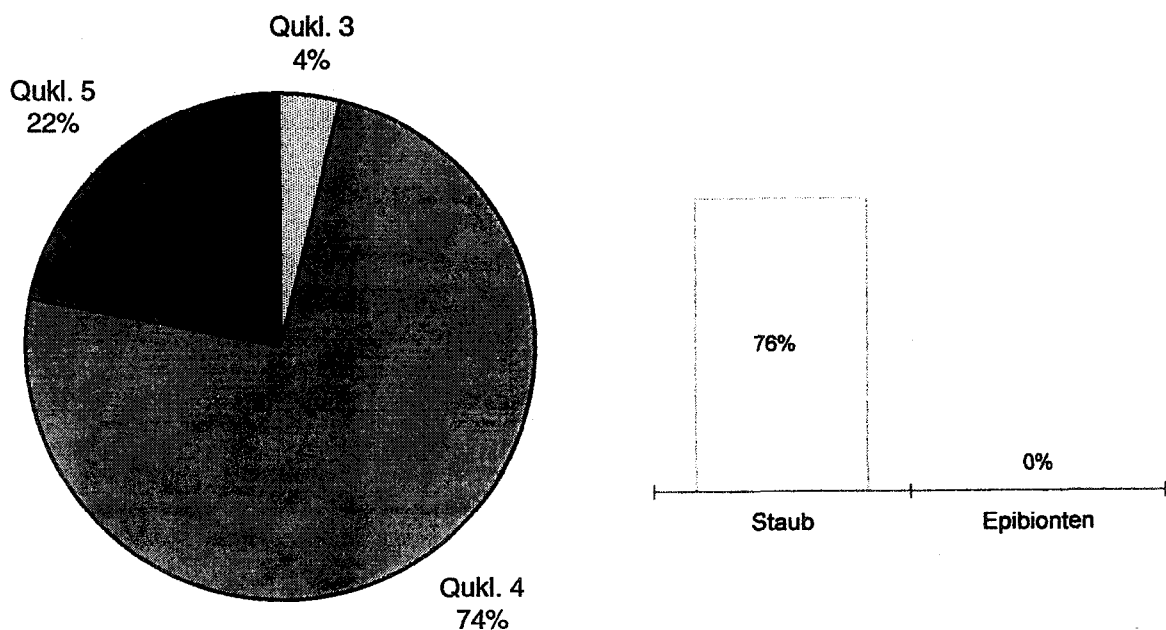
Fichtennadeln des 1. Nadeljahrganges 1995 des Standortes 1807 wiesen eine mittlere Wachsqualität von $MW 2,8 \pm SD 0,97$ auf. Dieser gegenüber dem 1. Nadeljahrgang 1994 erhöhte Wert ergibt sich besonders aus deutlichen Abnahmen der Qualitätsklasse 1 sowie Zunahmen der Qualitätsklassen 3 und 4. So konnte nur eine einzige Spaltöffnung mit der Qualitätsklasse 1 beurteilt werden, jeweils etwa 40 % der untersuchten Stomata fielen unter die Qualitätsklassen 2 und 3. Weitere 13 % wurden Qualitätsklasse 4 zugeteilt, wiederum wurden keine Degradationserscheinungen entsprechend Qualitätsklasse 5 gefunden. Allerdings mußten 4 % der Spaltöffnungen, welche durch starke Epibiontenbelegung gekennzeichnet waren, Sonderklasse 6 zugeordnet werden (Überblicksaufnahme eines derartigen Nadelbereiches siehe Abb. 12). Erfolgt die Berechnung der mittleren Wachsqualität ohne Berücksichtigung der Sonderklasse 6, so ergibt sich ein MW von 2,7, also keine wesentlich bessere Beurteilung. Auf den Stomata gelegene Staubpartikel konnten nicht nachgewiesen werden, jedoch betrug die Epibiontenbelegung 15 %. Insgesamt kann aufgrund der Ergebnisse von 1994 und 1995 für diesen Standort jedoch eine deutliche Abnahme wachsschädigender Einflüsse im Vergleich zu 1987 angenommen werden.



Brixlegg/Matzenköpfl. 1. Njg. 1995: Darstellung der prozentuellen Verteilung der Wachsqualität in den einzelnen Qualitätsklassen (Kreisdiagramm) sowie der Partikelbelegung (Säulendiagramm).

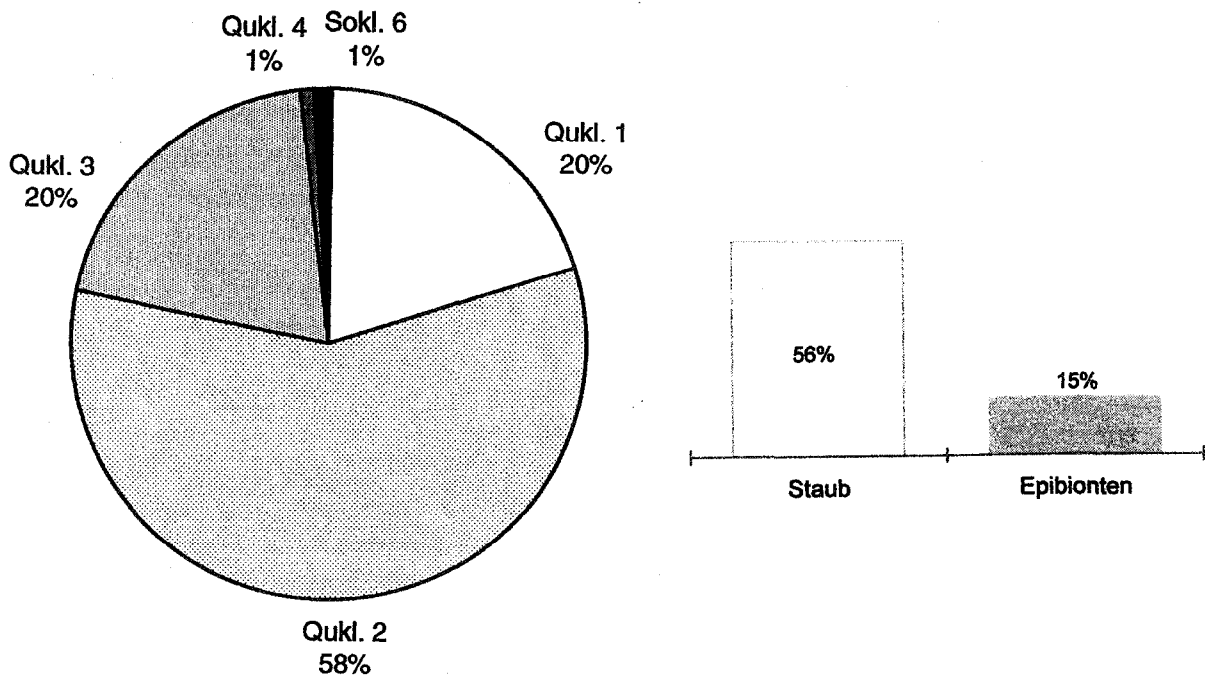
3.1.2. Kramsach

Fichtennadeln des 1. Nadeljahrganges 1987 des Standortes 1806 des Tiroler Bioindikatornetzes wiesen eine mittlere Wachsqualität von $MW 4,2 \pm SD 0,36$ auf. Durch den schlechten Erhaltungszustand der Stomatawachse konnte keine einzige Spaltöffnung Qualitätsklasse 1 bzw. 2 zugeordnet werden. Nur 4 % entsprachen Qualitätsklasse 3. Annähernd $\frac{3}{4}$ der untersuchten Stomatawachse mußten der Qualitätsklasse 4, der Rest von 22 % Qualitätsklasse 5 zugeordnet werden. Wie beim 1. Nadeljahrgang 1987 von Matzenköpfl lag eine sehr hohe Kontamination durch Staubpartikel (76 %) vor. Die EDX-Analysen der anhaftenden Fremdpartikel wiesen neben den üblicherweise vorhandenen Elementen Silicium, Kalium und Calcium aus Bodenpartikeln ebenso erhöhte Peaks an Eisen, und in geringerem Maße Titan, Nickel, Kupfer und Zink aus (Abb. 13). Diese metallischen Komponenten lassen eine Immissionsbeeinflussung durch die Kupferhütte vermuten. Abbildung 14 gibt eine charakteristische, mit Staubteilchen bedeckte Spaltöffnung wieder.



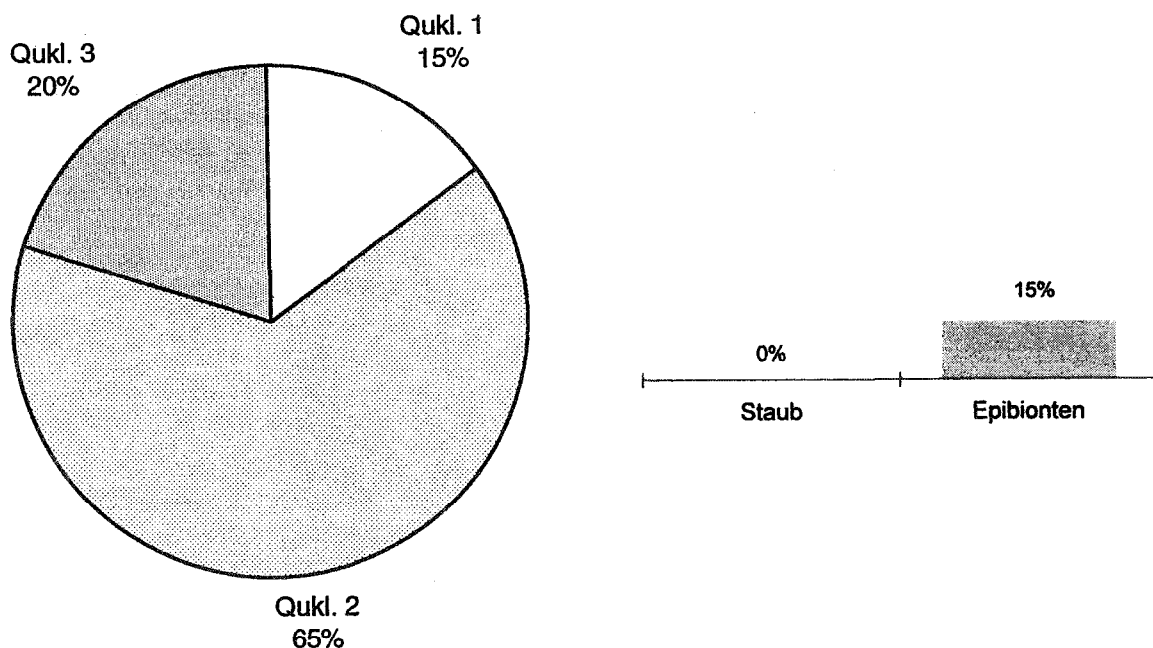
Brixlegg/Kramsach, 1. Njg. 1987: Darstellung der prozentuellen Verteilung der Wachsqualität in den einzelnen Qualitätsklassen (Kreisdiagramm) sowie der Partikelbelegung (Säulendiagramm).

Im Gegensatz dazu ergaben die Untersuchungen an Fichtennadeln des 1. Nadeljahrganges 1994 eine deutlich bessere mittlere Wachsqualität von MW $2,1 \pm SD$ 0,80. Nur jeweils 1 % der untersuchten Stomatawachse mußte Qualitätsklasse 4 bzw. Sonderklasse 6 zugeordnet werden. Auch die Belegung der Spaltöffnungen mit Staub war rückläufig (56 %), während der Epibiontenbelag mit 15 % einen mäßigen Anstieg verzeichnete. Die durch die EDX-Analyse ermittelte elementare Zusammensetzung der Staubteilchen war mit der des 1. Nadeljahrganges 1987 vergleichbar (Aluminium, Silicium, Chlor, Kalium, Calcium, Eisen, Kupfer und Zink, siehe Abb. 15).



Brixlegg/Kramsach, 1. Njg. 1994: Darstellung der prozentuellen Verteilung der Wachsqualität in den einzelnen Qualitätsklassen (Kreisdiagramm) sowie der Partikelbelegung (Säulendiagramm).

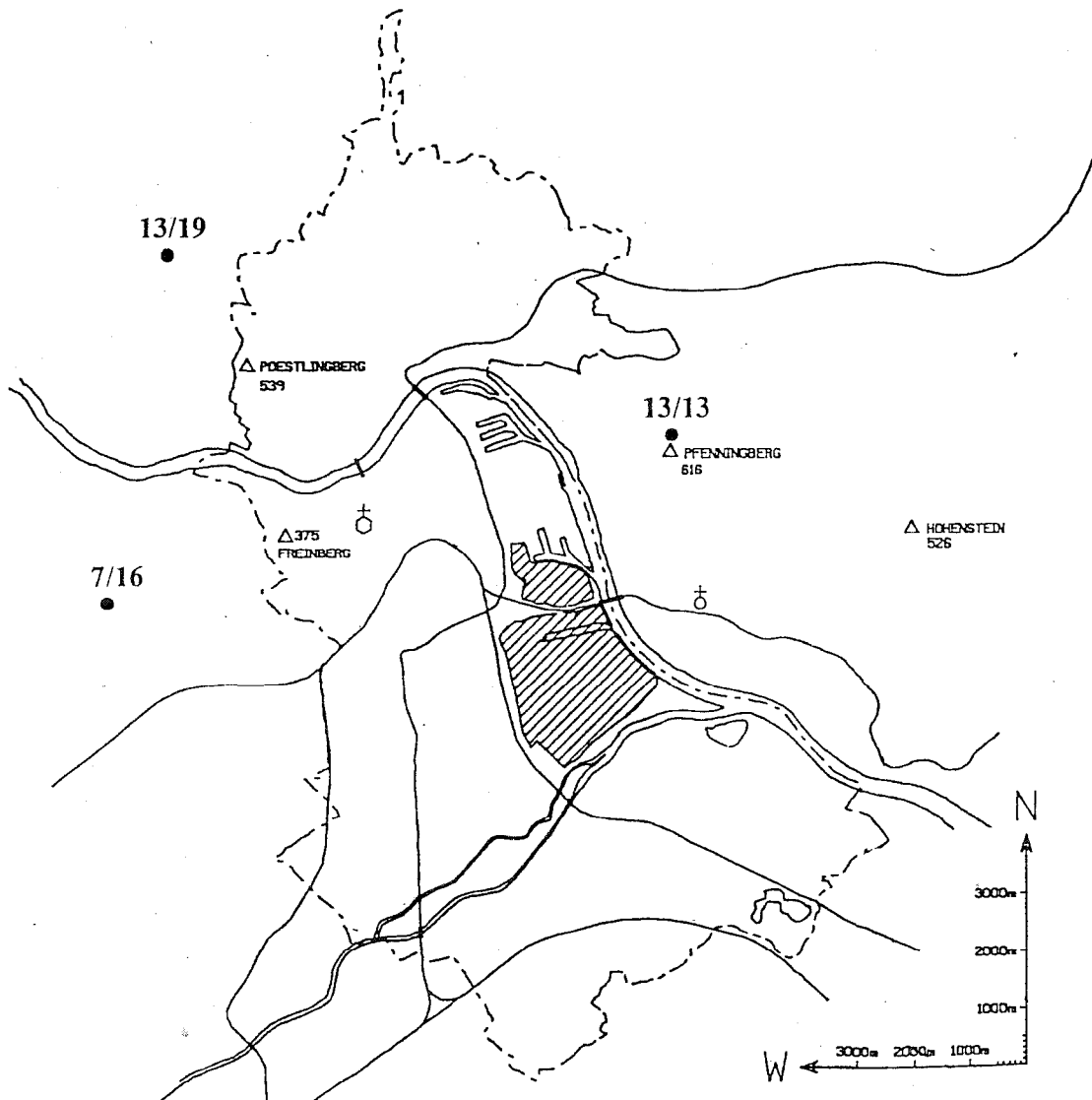
Fichtennadeln des 1. Nadeljahrganges 1995 zeigten eine mittlere Wachsqualität von $MW\ 2,0 \pm SD\ 0,51$. Gegenüber den Nadeln von 1994 konnte somit aufgrund des vollständigen Fehlens der Qualitätsklassen 4 und 5 eine weitere geringfügige Verbesserung festgestellt werden. Wachsschädigende Einflüsse haben also gegenüber 1987 deutlich abgenommen. Eine Belegung der Spaltöffnungen mit Staubpartikeln war nicht nachweisbar, der Epibiontenbelag betrug wie im Jahr 1994 15 %. Das Fehlen von staubförmigen Verunreinigungen in den Vorhöfen der 72 untersuchten Spaltöffnungen bedeutet zwar nicht zwangsläufig, daß sich kein einziges Staubteilchen auf der übrigen Nadeloberfläche oder auf den nicht untersuchten Stomata befindet. Doch ist in so einem Fall die restliche Nadeloberfläche ebenfalls kaum durch Staubpartikel kontaminiert.



Brixlegg/Kramsach, 1. Njg. 1995: Darstellung der prozentuellen Verteilung der Wachsqualität in den einzelnen Qualitätsklassen (Kreisdiagramm) sowie der Partikelbelegung (Säulendiagramm).

3.2. Linz

Der industrielle und urbane Ballungsraum Linz gilt als durch Schadstoffimmissionen stark beeinflusstes Gebiet (WEISS et al. 1992). Neben dem Hausbrand und dem starken Verkehrsaufkommen trugen die Chemie Linz AG und die VÖEST Alpine AG zu einer beträchtlichen Emission von Schadstoffen bei, die besonders in den letzten Jahren durch zahlreiche Maßnahmen der Großbetriebe sowie unter anderem im Bereich des Hausbrandes (Reduktionen durch Fernwärmeversorgung) deutlich verringert werden konnten (Bericht über die Umweltsituation an ausgewählten langjährigen Industriestandorten 1992).



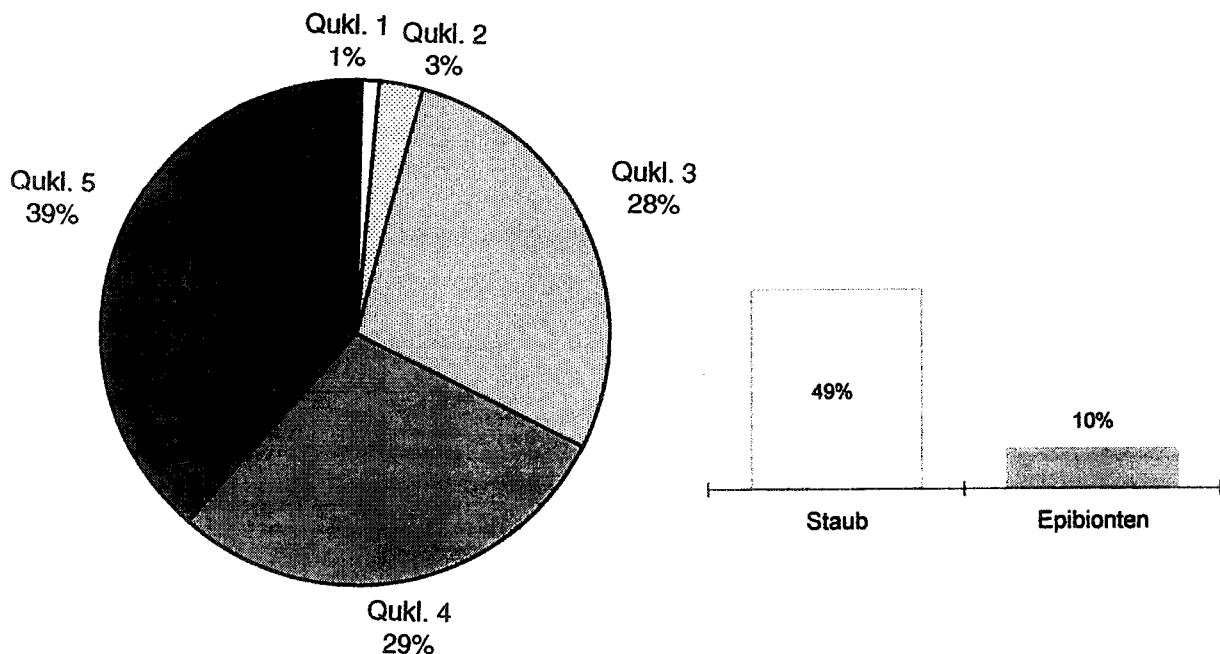
Lageskizze der Probenahmestelle von Fichtennadeln im Raum Linz.

BIN 13/13...Pfenningberg bei Steyregg, BIN 13/19...Koglerau, BIN 7/16...Kürnberger Wald

Für die Untersuchungen im Rasterelektronenmikroskop stand Nadelmaterial vom Pfenningberg (Prallhang östlich des Stadtgebietes und der Industrie; 1. Njg. 89, 94 und 95), vom Kürnberger Wald (westlich der Stadt Linz; 1. Njg. 89 und 95) und von der Koglerau (nordwestlich der Stadt, Hintergrundstandort; 1. Njg. 89 und 95) zur Verfügung.

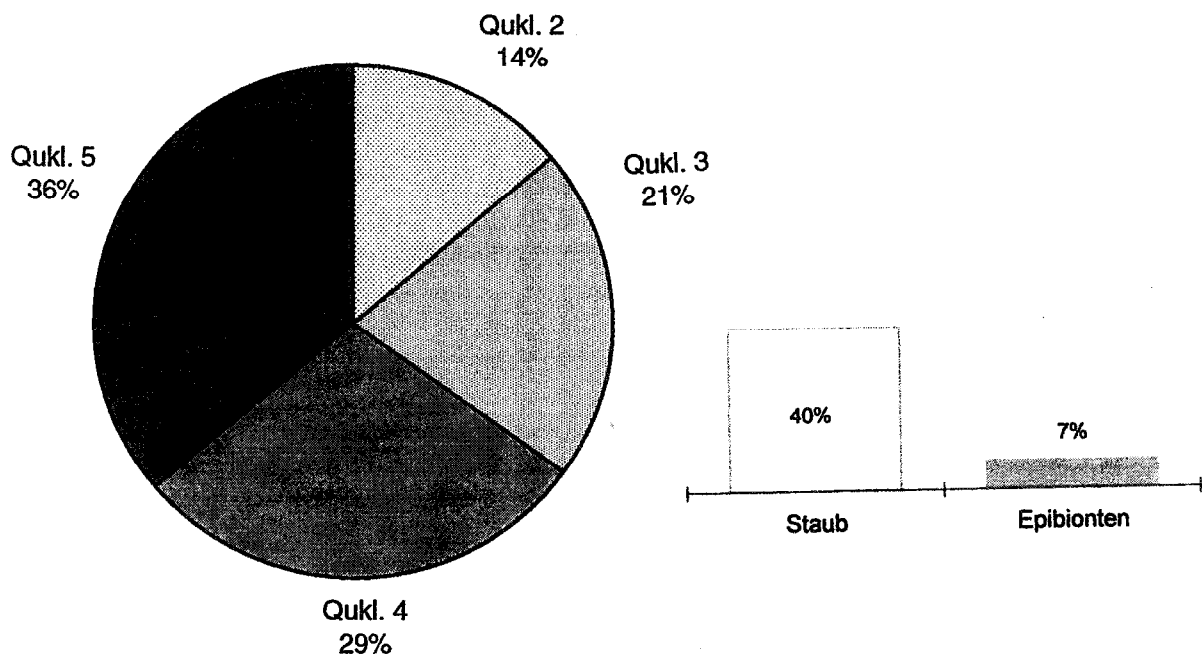
3.2.1. Pfenningberg

Für Nadelmaterial des 1. Nadeljahrganges 1989 wurde eine mittlere Wachsqualität von $MW 4,0 \pm SD 0,89$ ermittelt. Diese starke Beeinträchtigung der epistomatären Nadelwachse ergab sich sowohl aus dem fast gänzlichen Fehlen intakter Stomatawachse (nur 1 % Qukl. 1, 3 % Qukl. 2), als auch aus der prozentuellen Verteilung in den drei übrigen Qualitätsklassen (39 % Qukl. 5). An 49 % der untersuchten Spaltöffnungen konnten Staubpartikel beobachtet werden. Im Elementspektrum konnten die metallischen Komponenten Titan, Eisen und Zink detektiert werden (Abb. 16).



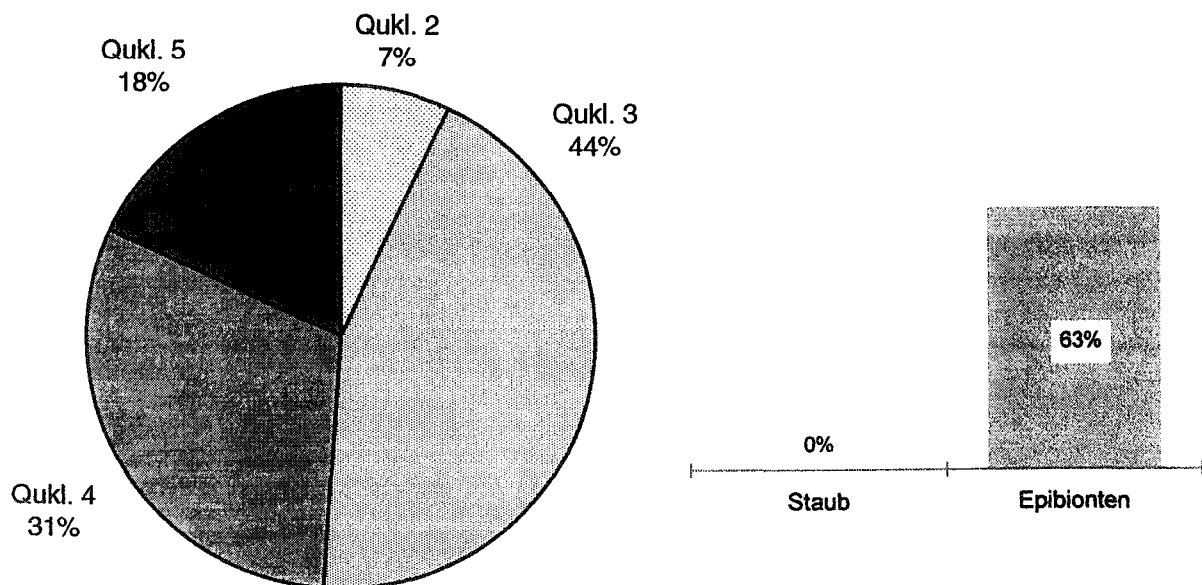
Linz/Pfenningberg, 1. Njg. 1989: Darstellung der prozentuellen Verteilung der Wachsqualität in den einzelnen Qualitätsklassen (Kreisdiagramm) sowie der Partikelbelegung (Säulendiagramm).

Fichtennadeln des 1. Nadeljahrganges 1994 zeigten eine mittlere Wachsqualität von $MW 3,8 \pm SD 1,01$. Keine einzige Spaltöffnung konnte Qualitätsklasse 1 zugeordnet werden. 36 % hingegen mußten aufgrund der erhöhten Degradation der Wachsstrukturen mit Qualitätsklasse 5 bewertet werden. Das bedeutet, daß keine wesentliche Verbesserung gegenüber dem 1. Nadeljahrgang 1989 vorlag, wie dies etwa in Brixlegg zu beobachten war und aufgrund emissionsmindernder Maßnahmen auch für Linz vorstellbar gewesen wäre. An 40 % der untersuchten Spaltöffnungen konnten anhaftende Staubpartikel beobachtet werden. Die EDX-Analyse ergab hier ebenso erhöhte Peaks von Titan, Eisen und Zink als metallische Komponenten, die auf Emissionseinfluß aus der Industrie hindeuten (Abb. 17). Die Belegung der Nadeloberfläche durch Epibionten war mit 7 % gering. Zwar war die Kontamination der Nadeloberfläche mit Staubpartikeln geringer als die für den 1. Nadeljahrgang 1989, doch kann die Wachsqualität als kaum verbessert (1. Njg. 1989: $MW 4,0 \pm SD 0,89$, 1. Njg. 1994: $MW 3,8 \pm SD 1,01$) bezeichnet werden.



Linz/Pfenningberg, 1. Njg. 1994: Darstellung der prozentuellen Verteilung der Wachsqualität in den einzelnen Qualitätsklassen (Kreisdiagramm) sowie der Partikelbelegung (Säulendiagramm).

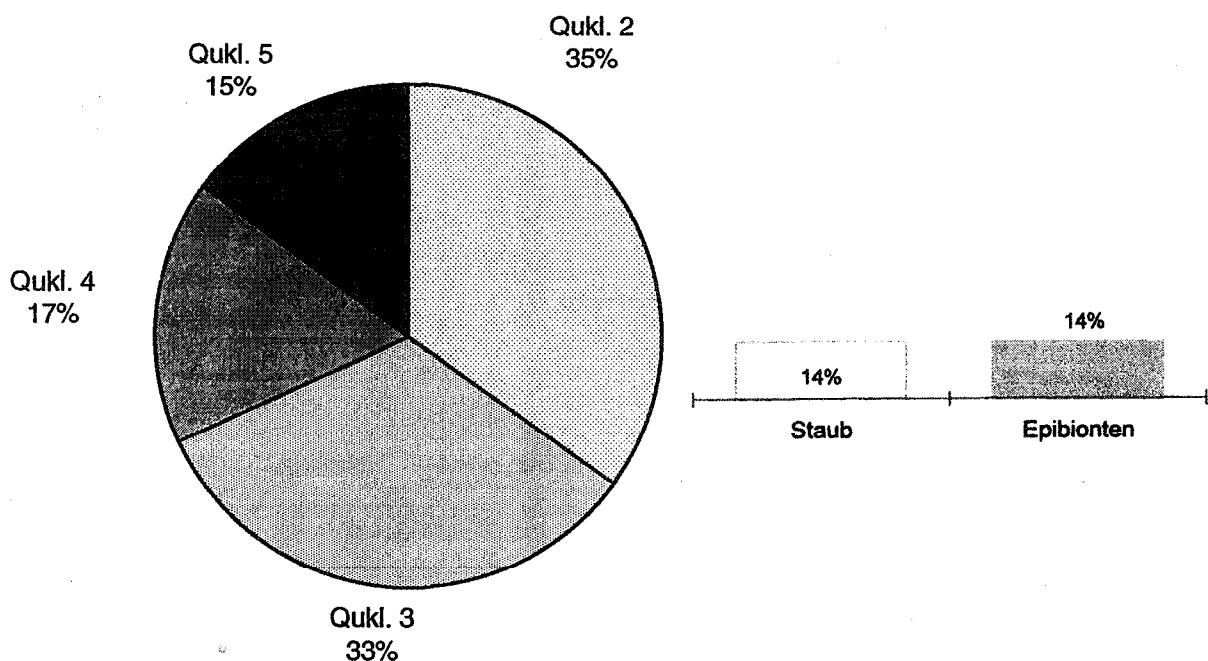
Fichtennadeln des 1. Nadeljahrganges 1995 des Standortes Pfenningberg wiesen eine mittlere Wachsqualität von $MW 3,6 \pm SD 0,87$ auf. Dieses Ergebnis stellt zwar wiederum eine leichte Verbesserung gegenüber dem Jahr 1989 dar, bestätigt jedoch das Ergebnis von 1994, daß am Pfenningberg - im Gegensatz zu Brixlegg - wachsschädigende Einflüsse nach wie vor in hohem Maß gegeben sind. Abermals konnte keine Spaltöffnung der Qualitätsklasse 1 zugeordnet werden. Auch der Prozentsatz der Qualitätsklasse 2 war gering (7 %), jedoch wurde bei den Qualitätsklassen 3 und 4 ein Anteil von 44 % bzw. 31 % festgestellt. Weiters war gegenüber dem 1. Nadeljahrgang 1994 eine leichte Verringerung an Qualitätsklasse 5 entsprechenden Stomata erkennbar. Staubpartikel auf den Spaltöffnungen konnten kaum nachgewiesen werden, allerdings war ein starker Anstieg des Epibiontenbelages auf über 60 % bemerkbar (Abb. 18). Einen großen Anteil daran hatten Pilzhyphen.



Linz/Pfenningberg, 1. Njg. 1995: Darstellung der prozentuellen Verteilung der Wachsqualität in den einzelnen Qualitätsklassen (Kreisdiagramm) sowie der Partikelbelegung (Säulendiagramm).

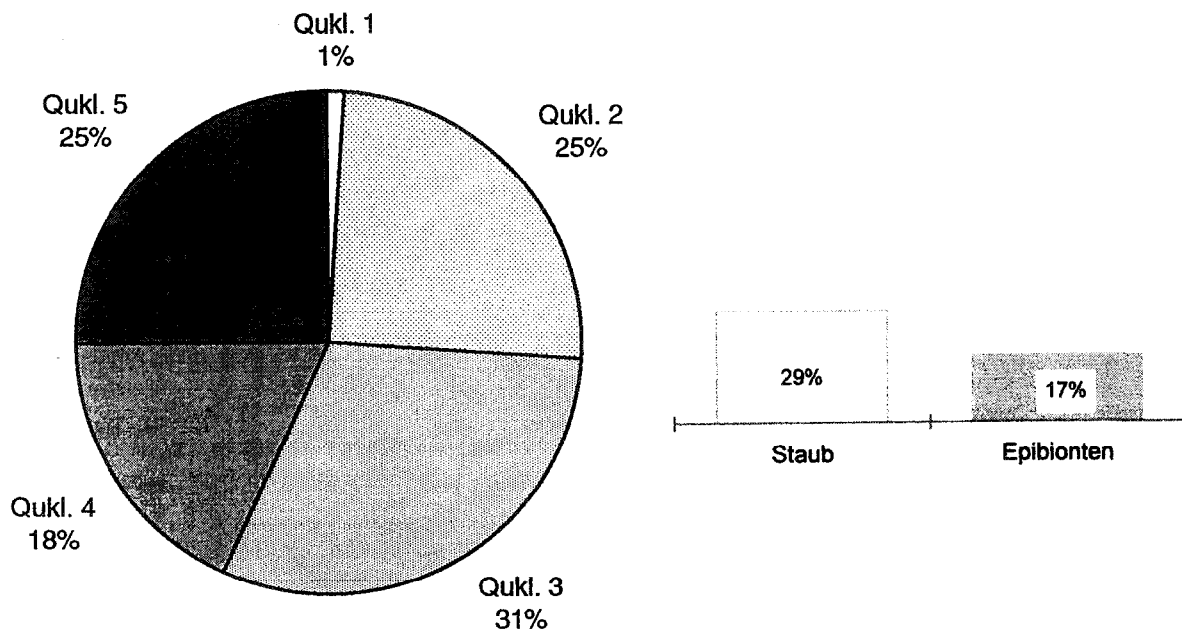
3.2.2. Kürnberger Wald

Fichtennadeln des 1. Nadeljahrganges 1989 des Standortes Kürnberger Wald wiesen eine mittlere Wachsqualität von $MW 3,0 \pm SD 1,07$ auf. Keine einzige der untersuchten Spaltöffnungen konnte der Qualitätsklasse 1 zugeordnet werden, auf Qualitätsklasse 2 und 3 entfielen 35 % bzw. 33 %. Die verbleibenden Anteile von 17 % und 15 % mußten den Qualitätsklassen 4 und 5 zugeteilt werden. Staub- und Epibiontenbelegung waren mit 14 % jeweils gleich hoch. Mittels EDX-Analyse konnten im Staub die Elemente Kalium, Calcium, Titan und Mangan ausgewiesen werden. Eisen war als weitere metallische Komponente stets durch einen hohen Peak vorhanden. Zusätzlich konnten an manchen Stellen der Nadeloberfläche Kristalle nachgewiesen werden (Abb. 19). Die EDX-Analysen dieser Kristalle ergaben, daß es sich dabei eindeutig um Gips handelt (Ca- und S-Peak in Abb. 20). Dieses Phänomen wird in der Literatur primär mit einer erhöhten Schwefeldioxidbelastung in Zusammenhang gebracht. Abbildung 21 stellt eine Übersichtsaufnahme einer mit Staubpartikeln bedeckten Nadeloberfläche dar.



Linz/Kürnberger Wald, 1. Njg. 1989: Darstellung der prozentuellen Verteilung der Wachsqualität in den einzelnen Qualitätsklassen (Kreisdiagramm) sowie der Partikelbelegung (Säulendiagramm).

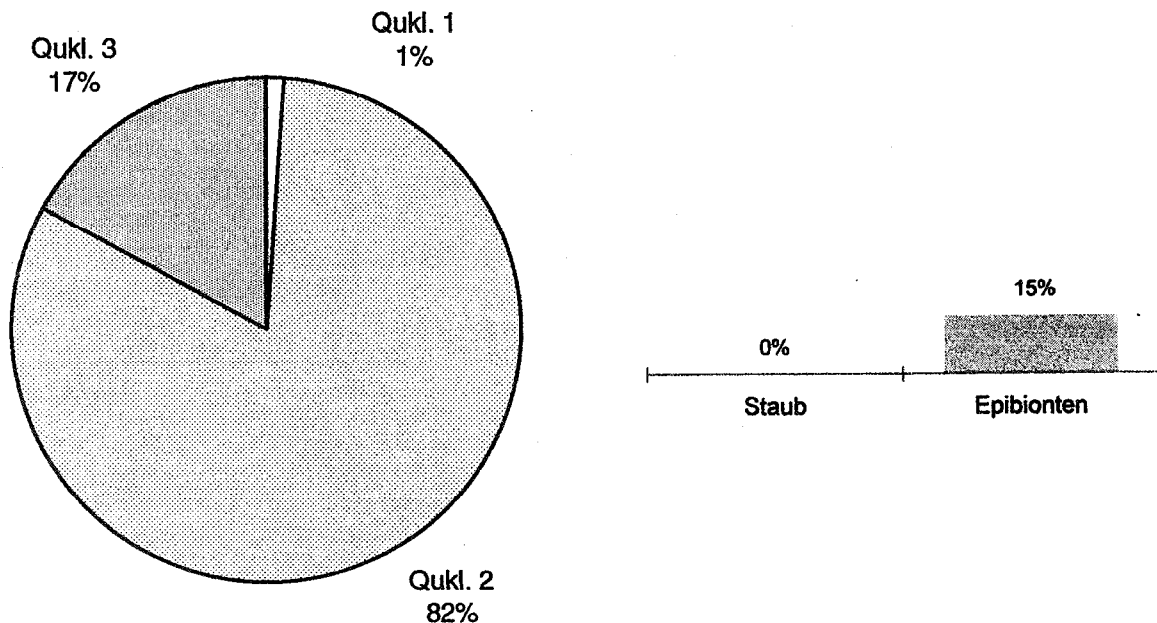
An Fichtennadeln des 1. Nadeljahrganges 1995 wurde eine mittlere Wachsqualität von $MW 3,4 \pm SD 1,11$ festgestellt. Diese gegenüber Nadeln des Jahres 1989 offensichtliche Verschlechterung ist in der Abnahme der Qualitätsklasse 2 und der Zunahme der Qualitätsklasse 5 erklärbar. Gleichzeitig war ein erheblicher Anstieg der Staubpartikelbelegung auf etwa das Doppelte von 1989 zu verzeichnen, wogegen der Epibiontenbelag annähernd gleich blieb. An den Nadeloberflächen wurden einige, in Längsrichtung verlaufende Verwerfungen beobachtet, wie sie an gesunden Fichtennadeln nicht vorkommen. Viele Stomata zeigten sowohl starke Wachsdegradationen als auch eine erhebliche Staubpartikelbelegung (Abb. 22). Der Standort Kürnberger Wald westlich von Linz weist zwar eine bessere Wachsqualität als der Standort Pfenningberg auf, erhebliche Verbesserungen der Wachsqualität wie in Brixlegg konnten jedoch nicht festgestellt werden.



Linz/Kürnberger Wald, 1. Njg. 1995: Darstellung der prozentuellen Verteilung der Wachsqualität in den einzelnen Qualitätsklassen (Kreisdiagramm) sowie der Partikelbelegung (Säulendiagramm).

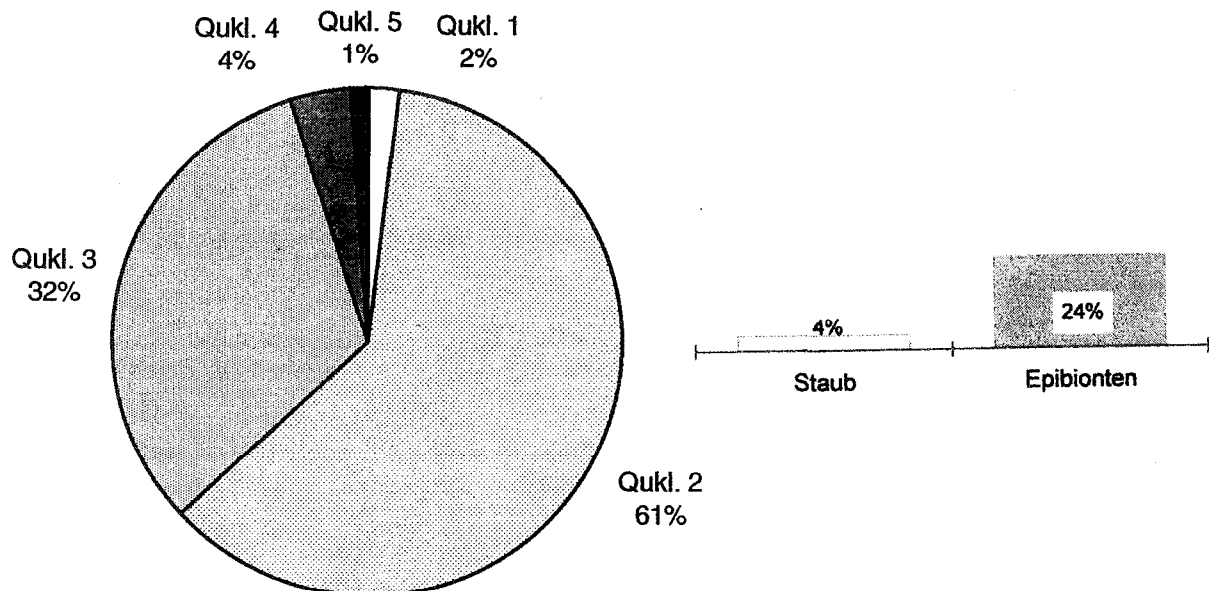
3.2.3. Koglerau

Am Standort Koglerau, der durch seine Lage von den Emissionen aus dem Ballungsraum Linz nicht betroffen ist und somit einen Hintergrundstandort darstellt, wiesen Fichtennadeln des 1. Nadeljahrganges 1989 eine mittlere Wachsqualität von $MW 2,1 \pm SD 0,43$ auf. Eine einzige Spaltöffnung wurde Qualitätsklasse 1 zugeordnet, 82 % bzw. 17 % wurden mit Qualitätsklasse 2 bzw. 3 beurteilt. Wachsdegradationen, wie sie den Qualitätsklassen 4 oder 5 entsprechen, wurden an keiner der untersuchten Spaltöffnungen beobachtet. Es wurden kaum Staubpartikel detektiert, die Epibiontenbelegung war mit 15 % eher gering.



Linz/Koglerau, 1. Njg. 1989: Darstellung der prozentuellen Verteilung der Wachsqualität in den einzelnen Qualitätsklassen (Kreisdiagramm) sowie der Partikelbelegung (Säulendiagramm).

An Fichtennadeln des 1. Nadeljahrganges 1995 wurde eine mittlere Wachsqualität von $MW 2,4 \pm SD 0,62$ erhoben. Die Verteilung innerhalb der Qualitätsklassen ergab 1 % Qukl. 1, 61 % Qukl. 2, 32 % Qukl. 3, 4 % Qukl. 4 und immerhin noch 1 % Qualitätsklasse 5. Die Staubbelegung auf den Nadeln war gering (4 %), die Belegung mit Epibionten verzeichnete gegenüber dem 1. Nadeljahrgang 1989 einen Anstieg auf 24 %. An einigen wenigen der untersuchten Nadeln konnten kleinflächige Verwerfungen der Oberfläche beobachtet werden (Abb. 23). Die Wachstrukturen über den Spaltöffnungen wurden dadurch nicht in Mitleidenschaft gezogen. Die Wachsqualität dieses Standortes entspricht den Erwartungen für einen Hintergrundstandort und ist deutlich besser als jene der beiden durch den Ballungsraum Linz beeinflussten Standorte Kürnberger Wald und Pfenningberg.



Linz/Koglerau, 1. Njg. 1995: Darstellung der prozentuellen Verteilung der Wachsqualität in den einzelnen Qualitätsklassen (Kreisdiagramm) sowie der Partikelbelegung (Säulendiagramm).

4. ZUSAMMENFASSUNG

4.1. Allgemeines

Die bisherigen Untersuchungsergebnisse zeigen übereinstimmend, daß bei Fichtennadeln aus belasteten Gebieten (Industriestandorte, urbane Ballungsräume) allgemein mit einem erhöhten Degradationsgrad der Stomatawachse, d. h. mit einer schlechteren Wachsqualität zu rechnen ist. Darüberhinaus sind Nadeln von immissionsbeeinflußten Standorten durch eine erhebliche Belastung mit zum Teil schwermetallhaltigen Staubpartikeln gekennzeichnet.

Im Vergleich dazu konnte in einer früheren Studie des Umweltbundesamtes (TRIMBACHER et al. 1995) bereits gezeigt werden, daß die Nadelwachse von Fichten an österreichischen Hintergrundstandorten (ohne lokale Schadstoffquellen) eine mittlere Wachsqualität mit einem Median von 2,0 bei einer Skalierung bis 5,0 (stärkste Beeinträchtigung der Stomatawachse) aufwiesen. Von manchen, vor allem grenznahen Hintergrundstandorten sind grenzüberschreitende Immissionseinflüsse durch Schadstoffimporte nach Österreich dokumentiert. Derartige Einflüsse können unter anderem auch für die schlechte Wachsqualität verantwortlich sein (z. B.: Böhmerwald). Geringfügige Schwankungen der Wachsqualität konnten auch in dieser Untersuchung für Hintergrundstandorte festgestellt werden. Die Ursachen für Wachsdegradationen können vielfältig sein. Mit einem Median von 4,5 % war auch die Belegung der untersuchten Spaltöffnungen mit staubförmigen Fremdpartikeln vergleichsweise gering. Die im EDX-Spektrum der anhaftenden Staubteilchen ausgewiesenen Elemente repräsentieren hier zumeist den Boden und setzten sich im wesentlichen aus den Elementen Silicium, Calcium sowie Spuren von Eisen oder Zink zusammen.

4.2. Brixlegg

Die rasterelektronenmikroskopischen Untersuchungen von Nadelwachsen aus dem Raum Brixlegg ergaben für den 1. Nadeljahrgang 1987, sowohl für den Standort

Matzenköpfl (Prallhang) als auch für den Standort Kramsach, eine erhebliche Beeinträchtigung der epistomatären Wachsstrukturen, was sich in einer mittleren Wachsqualität von 4,2 widerspiegelt (siehe Abb. A). Diese starke Degradation der Stomatawachse kann mit dem bis zu diesem Zeitpunkt noch massiven Immissions-einfluß der lokalen Kupferhütte Brixlegg in Verbindung gebracht werden. Weiters konnte an den Nadeloberflächen eine dichte Staubauflage beobachtet werden, die auch erhöhte Peaks metallischer Komponenten wie Eisen, Titan, Nickel, Kupfer und Zink enthielt. Im Vergleich dazu konnte für den 1. Nadeljahrgang 1994 derselben Untersuchungsstandorte eine deutlich verbesserte Wachsqualität ermittelt werden. Auch die Belegung der Nadeloberfläche mit Staubpartikeln war geringer als im Jahre 1987. Die für Fichtennadeln des 1. Nadeljahrganges 1995 ermittelte Wachsqualität im Untersuchungsraum Brixlegg entsprach weitgehend den bereits aus dem Vorjahr stammenden Werten. Die Beurteilung des Standortes Matzenköpfl mit einer mittleren Wachsqualität von 2,8 (siehe Abb. B) fiel schlechter aus als die des 1. Nadeljahrganges 1994. Aus derzeitiger Sicht kann jedoch nicht geklärt werden, ob dieser Wert durch einen zeitlich und lokal begrenzten (Prallhang) Immissionseinfluß oder etwa durch klimatische Faktoren begründet werden kann.

Untersuchungsgebiet Brixlegg				
	Kramsach		Matzenköpfl	
1. Njg.	Staub	Wachsqual.	Staub	Wachsqual.
1987	76 %	4,2	61%	4,2
1994	56 %	2,1	26 %	2,0
1995	0 %	2,0	0 %	2,8

Abb. A: Mittlere Wachsqualität und Staubebelegung der Fichtennadeln aus dem Untersuchungsgebiet Brixlegg.

Die für 1994 und 1995 festgestellte mittlere Wachsqualität von Fichtennadeln der Untersuchungsstandorte in Brixlegg entspricht mittlerweile Werten, wie sie auch für Hintergrundstandorte typisch sind. Die bedeutend bessere Wachsqualität der Fich-

tennadeln der letzten beiden Jahre und die relativ geringe Staubbelegung lassen auf einen Rückgang der Immissionsbelastung in diesem Gebiet gegenüber 1987 schließen. Eine Verbesserung der Umweltsituation im Raum Brixlegg konnte nicht zuletzt durch entsprechende, werkseitige emissionsreduzierende Maßnahmen seit dem Jahre 1989 erzielt werden. Unabhängig davon zeigten Langzeituntersuchungen, die von der Landesforstdirektion Tirol durchgeführt wurden, ebenso eine Reduktion der Schadstoffbelastung in diesem Industriegebiet. So kam es beispielsweise im Jahre 1987 am Standort Innufer / Kramsach zu insgesamt 256 Grenzwertüberschreitungen bei Schwefeldioxid (gemessen als Halbstundenmittelwert) gemäß der 2. Verordnung gegen forstschädliche Luftverunreinigungen. Im Jahre 1994 konnten hingegen nur mehr vier Grenzwertüberschreitungen verzeichnet werden. Staubniederschlagsmessungen seitens des Amtes der Tiroler Landesregierung zeigten ebenso eine rückläufige Entwicklung der Staubniederschlagsbelastung insbesondere bei den Elementen Blei, Kupfer und Zink (Zustand der Tiroler Wälder, Berichte 1988 und 1995).

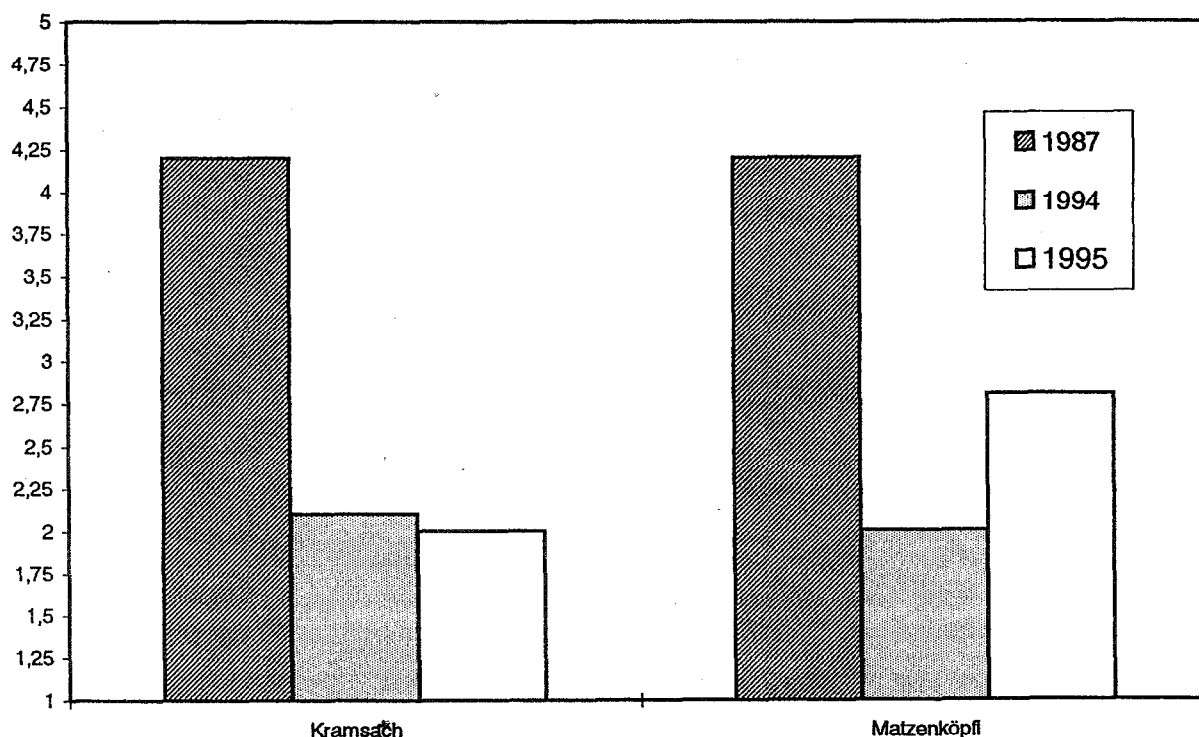


Abb. B: Veränderungen der Wachsqualität von Fichtennadeln im Untersuchungszeitraum am Standort Brixlegg.

4.3. Linz

Für Fichtennadeln des Standortes Pfenningberg bei Steyregg (Prallhang östlich von Linz) ergaben die Beurteilungen der Wachsqualität der Jahre 1989, 1994 und 1995 eine geringfügige, jedoch kontinuierliche Verbesserung von MW 4,0 zu MW 3,6 (Abb. C). Diese verhältnismäßig hohen Mittelwerte lassen trotz beachtlicher Emissionsreduktionen während der letzten Jahre auf eine Beeinflussung durch das industrielle und urbane Ballungsgebiet Linz schließen. Dies wird auch durch die teilweise massive Belegung der Nadeloberflächen mit Staubpartikeln dokumentiert. So fanden sich an Nadeln aus dem Jahr 1989 an 49 % der untersuchten Spaltöffnungen staubförmige Verunreinigungen und im Jahr 1994 an 40 %. Die elementare Zusammensetzung der Staubpartikel dieser beiden Nadeljahrgänge war miteinander vergleichbar. Als metallische Komponenten wurden in den EDX-Spektren stets die Elemente Titan, Eisen und Zink ausgewiesen, wobei die beiden letztgenannten Komponenten im Staub als erhöht zu bezeichnen waren. An Fichtennadeln des letzten Jahres konnten erstaunlicherweise keine auffälligen Kontaminationen durch Fremdpartikel, die nicht biologischen Ursprungs waren (z. B.: Pilzhyphen, pflanzliche Sporen, Algenlager), beobachtet werden.

Untersuchungsgebiet Linz						
	Pfenningberg		Koglerau		Kürnberger Wald	
1. Njg.	Staub	Wachsqual.	Staub	Wachsqual.	Staub	Wachsqual.
1989	49 %	4,0	0 %	2,1	14 %	3,0
1994	40 %	3,8	*	*	*	*
1995	0 %	3,6	4 %	2,4	29 %	3,4

Abb. C: Mittlere Wachsqualität und Staubbelegung der Fichtennadeln im Untersuchungsraum Linz.

*...Kein Nadelmaterial verfügbar.

Die Wachsstrukturen von Fichtennadeln aus dem Kürnberger Wald westlich von Linz entsprachen im Jahre 1989 einer mittleren Wachsqualität von MW 3,0 und im Jahr

1995 einer Wachsqualität von MW 3,4. Nadelmaterial aus 1994 stand wegen massiven Befalls dieses Standortes durch die Fichtenblattwespe für die rasterelektronenmikroskopischen Untersuchungen nicht zur Verfügung. Auch eine Zunahme der Staubbelegung von 14 % auf 29 % wurde nachgewiesen. Darüberhinaus war der Kürnberger Wald der einzige Standort im Untersuchungsgebiet Linz, an dem einige Fichtennadeln Gipskristalle an ihren Oberflächen aufwiesen. In der Literatur werden Gipskristalle häufig mit einer erhöhten Belastung durch Schwefeldioxid in Verbindung gebracht. Dabei nimmt man an, daß durch eine atmosphärische Säuredeposition eine beschleunigte Auswaschung von Calcium aus den Nadeln erfolgt, wodurch sich Gipskristalle an der Nadeloberfläche bilden (BOSCH et al. 1983, FIEDLER et al. 1990). Insgesamt weist auch dieser Standort eine schlechtere Wachsqualität auf, als es für Hintergrundstandorte typisch ist. Auch andere Untersuchungen ergaben nachweislich, daß der Kürnberger Wald durch Emissionen aus dem industriellen und urbanen Ballungsraum Linz beeinflusst ist.

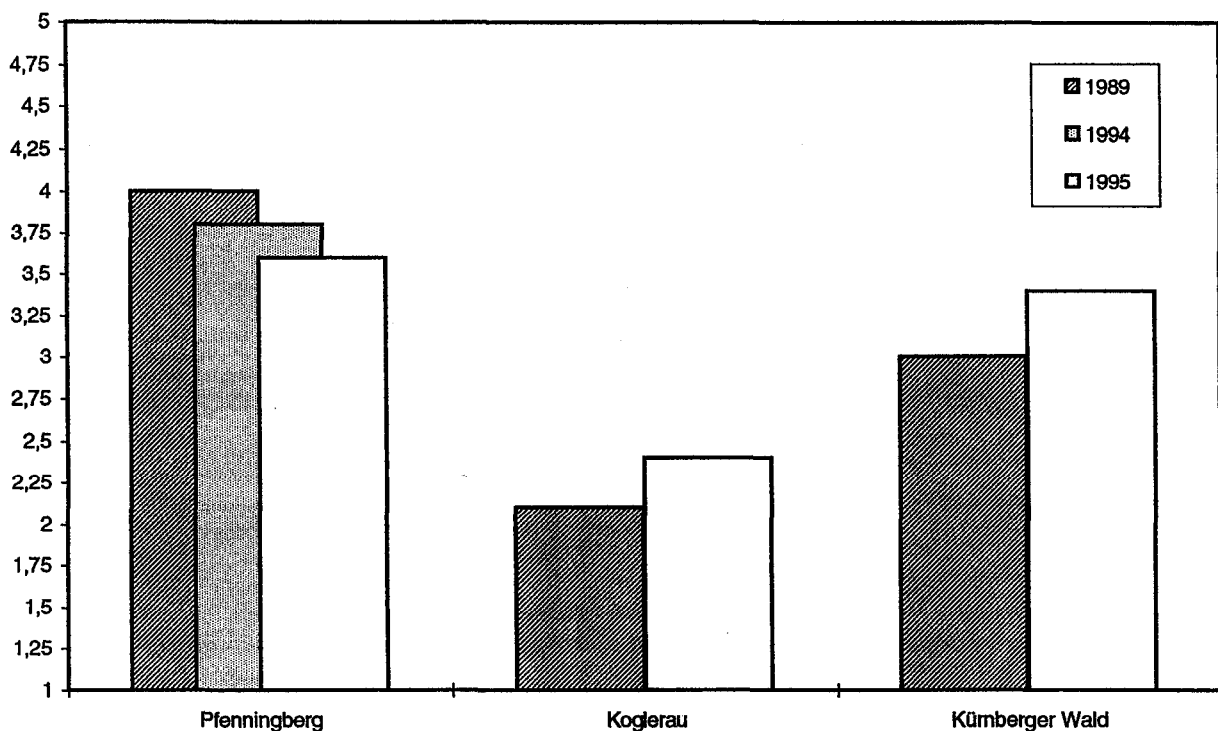


Abb. D: Veränderungen der Wachsqualität von Fichtennadeln im Untersuchungszeitraum am Standort Linz.

Die Nadelwaxe aus der nord-westlich von Linz gelegenen Koglerau wiesen weitgehend unbeeinträchtigte Wachsstrukturen auf. Weiters konnten an den untersuch-

ten Nadeln kaum Staubpartikel nachgewiesen werden. Diese Werte (MW 2,1 für 1. Njg. 1989 und MW 2,4 für 1. Njg. 1995) entsprechen denjenigen, die für Hintergrundstandorte ohne lokale Schadstoffquellen ermittelt wurden. Durch die Lage des Standortes außerhalb des Einflußbereichs von Linz war dieses Ergebnis zu erwarten.

Die vorliegenden Untersuchungsergebnisse zeigen, daß an den Standorten Pfenningberg und Kürnberger Wald Einflüsse, die die Wachsstrukturen beeinträchtigen, in deutlich höherem Maß gegeben sind, als an vergleichsweise unbelasteten Hintergrundstandorten. Da Linz ein urbanes und industrielles Ballunszentrum mit entsprechender Emissionsfracht darstellt und Schadstoffimmissionen - wie durch zahlreiche Untersuchungen belegt - nachweislich die Wachsqualität beeinträchtigen, ist anzunehmen, daß die Emissionen dieses Ballungsraumes für die schlechtere Wachsqualität verantwortlich sind. Die deutlichen Emissionsreduktionen in Linz während der letzten Jahre spiegeln sich noch nicht in einer wesentlichen Verbesserung der Wachsqualität von 1994 und 1995 gegenüber 1989 wider, wie dies etwa in Brixlegg durch Emissionsreduktionen des allerdings einzigen wesentlichen Emittenten in der Region dokumentiert werden konnte.

5. LITERATUR

AMT DER TIROLER LANDESREGIERUNG, LANDESFORSTDIREKTION, 1988:
Zustand der Tiroler Wälder. Untersuchungen über die Immissionsbelastung und den Waldzustand in Tirol. Bericht für das Jahr 1987.

AMT DER TIROLER LANDESREGIERUNG, LANDESFORSTDIREKTION, 1995:
Zustand der Tiroler Wälder. Untersuchungen über die Immissionsbelastung und den Waldzustand in Tirol. Bericht für das Jahr 1994.

Bericht über die Umweltsituation an ausgewählten langjährigen Industriestandorten 1992, Umweltbundesamt Wien.

BOSCH, C., PFANNKUCH, E., BAUM, U, REHFUESS, K. E., 1983:
Über die Erkrankung der Fichte (*Picea abies* Karst.) in den Hochlagen des Bayerischen Waldes. Forstw. Cbl. 102, 167-181.

FIEDLER, H. J., BARONIUS, G., EHRIG, F., 1990:
Rasterelektronenmikroskopische und chemische Untersuchungen grüner und chlorotischer Nadeln eines immissionsgeschädigten Kiefernbestandes. Flora 184, 91-101.

KRAFT, G., 1884:
Beiträge zur Lehre von den Durchforstungen, Schlagstellungen und Lichthieben. Hannover.

SPINDELBALKER, CH. et al. 1990:
Montanwerke Brixlegg - Wirkungen auf die Umwelt. Monographie Bd. 25, Umweltbundesamt Wien.

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.

WEISS, P., RISS, A., TRIMBACHER, C., 1992:

Schadstoffe im Raum Linz. Monographie Bd. 20, Umweltbundesamt Wien.

6. Abbildungsteil



Abb. 8: Brixlegg/Matzenköpfl (1. Njg. 1987), REM-Aufnahme einer stark beeinträchtigten Spaltöffnung, Vergrößerung: 1600 x.

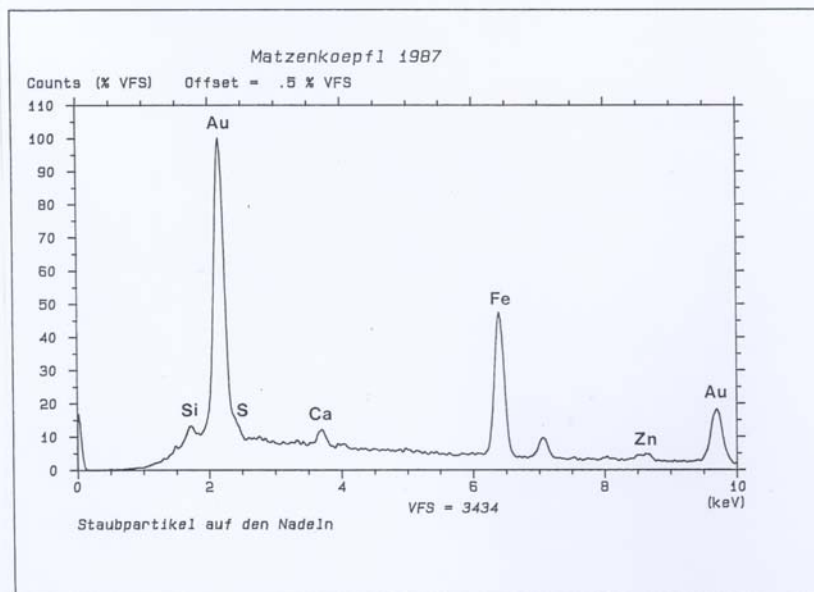


Abb. 9: Brixlegg/Matzenköpfl (1. Njg. 1987), EDX-Spektrum von Staubpartikeln auf der Nadeloberfläche.

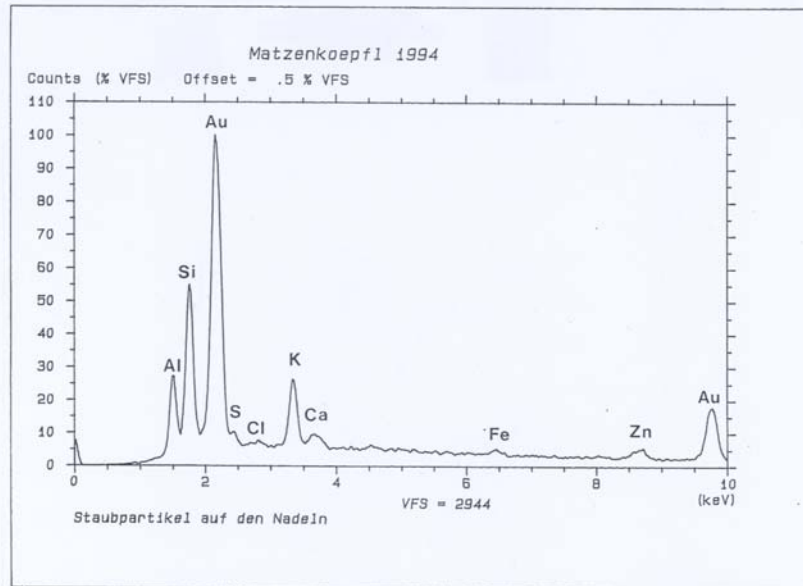


Abb. 10: Brixlegg/Matzenköpfl (1. Njg. 1994), EDX-Spektrum der anhaftenden Staubpartikel.

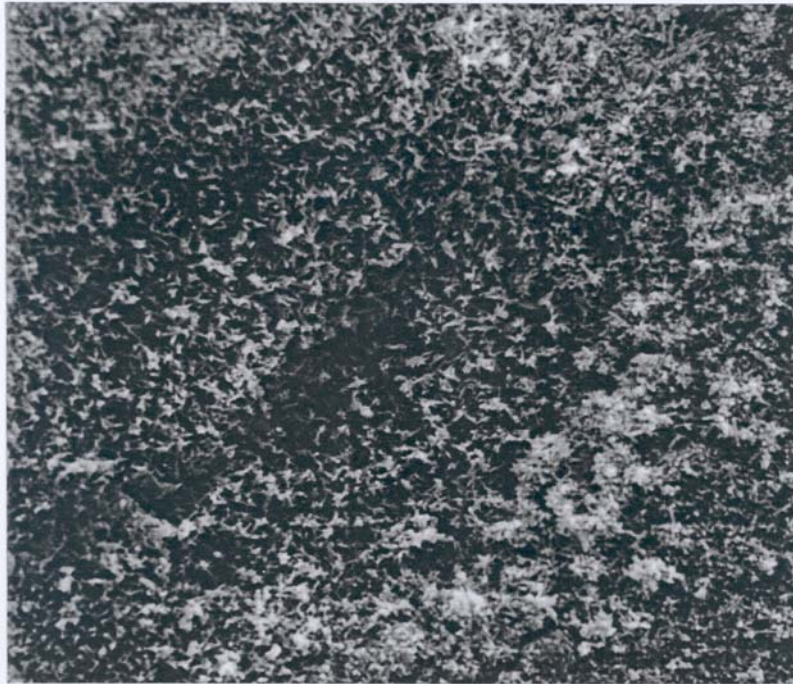


Abb. 11: Brixlegg/Matzenköpfl (1. Njg. 1994), REM-Aufnahme einer Spaltöffnung mit weitgehend unbeeinträchtigten Wachsstrukturen, Vergrößerung: 3000 x.

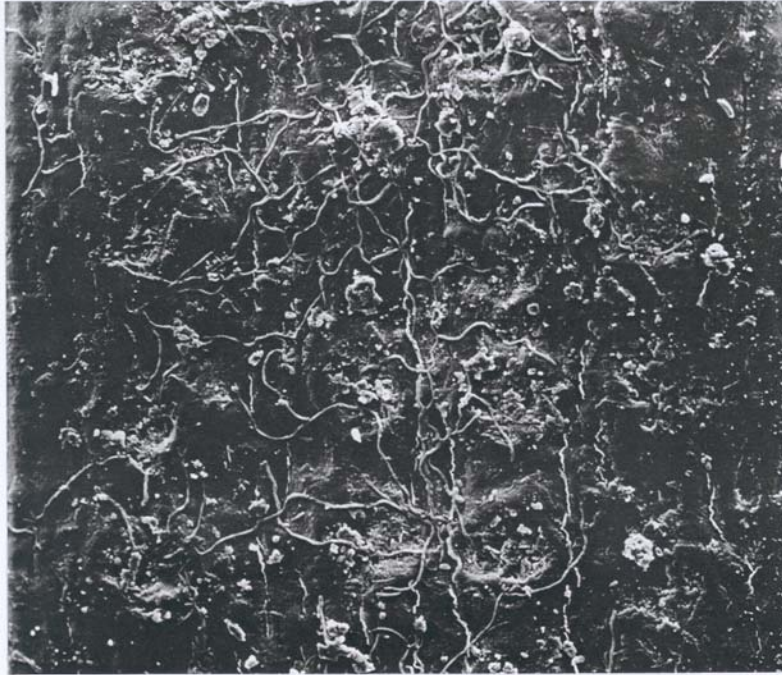


Abb. 12: Brixlegg/Matzenköpfl (1. Njg. 1995), REM-Aufnahme einer Nadeloberfläche mit Pilzhyphen, Vergrößerung: 300 x.

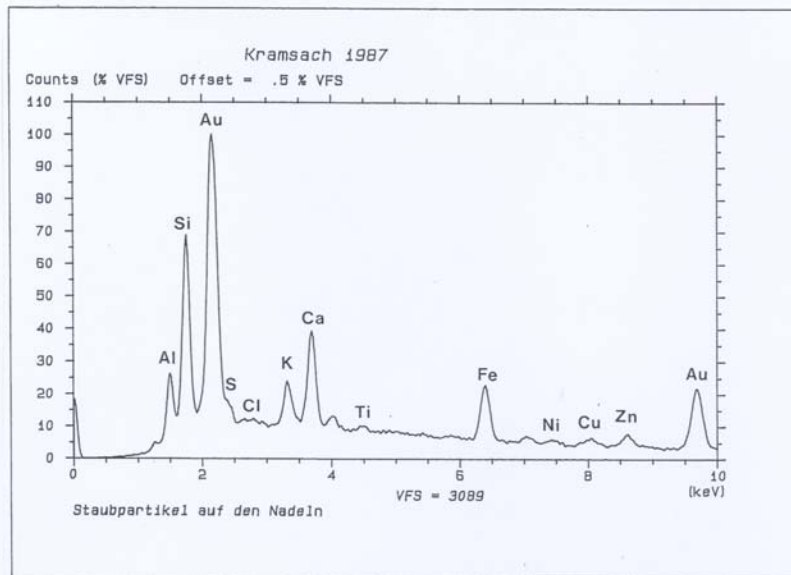


Abb. 13: Brixlegg/Kramsach (1. Njg. 1987), EDX-Spektrum von Staubpartikeln.

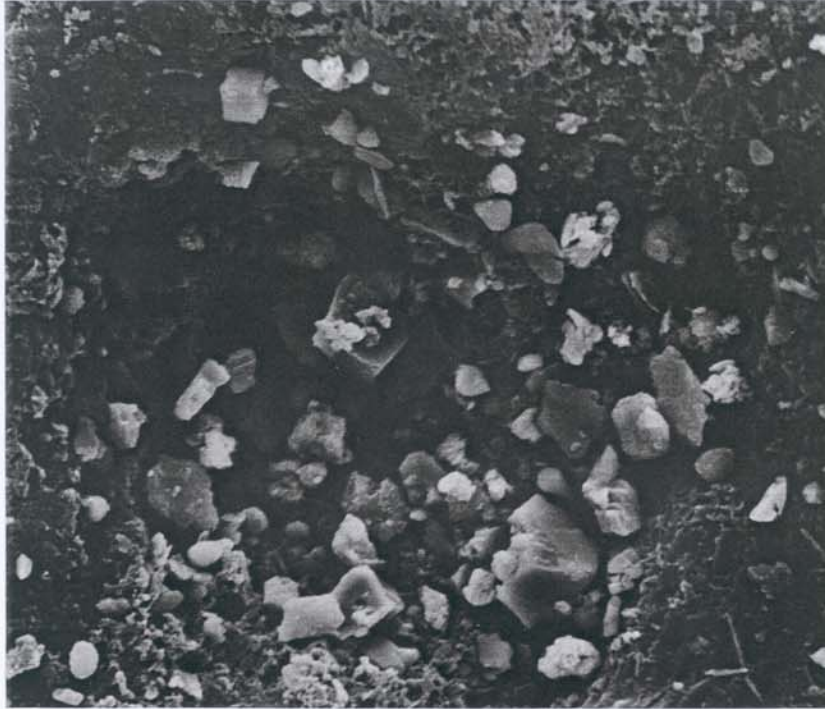


Abb. 14: Brixlegg/Kramsach (1. Njg. 1987), REM-Aufnahme einer Spaltöffnung mit hoher Staubpartikelbelegung, Vergrößerung: 3000 x.

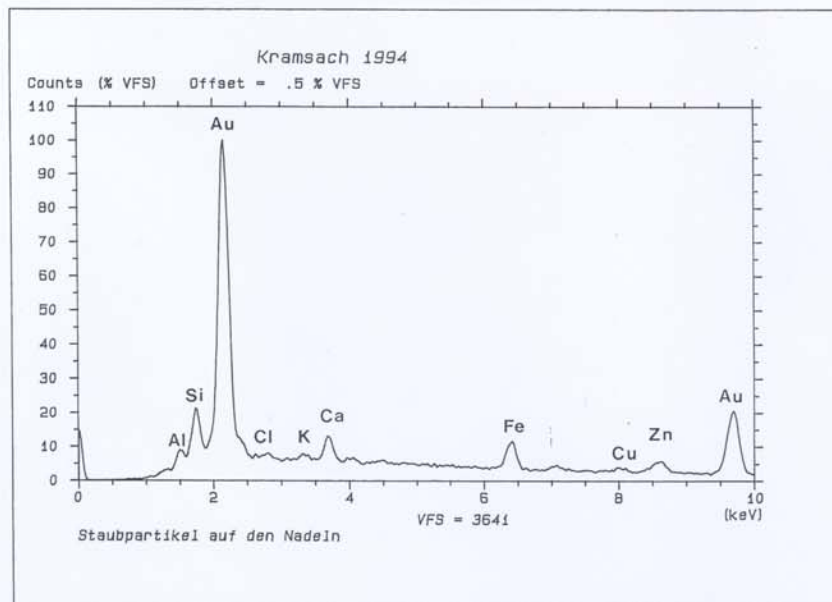


Abb. 15: Brixlegg/Kramsach (1. Njg. 1994), EDX-Spektrum von Staubpartikeln.

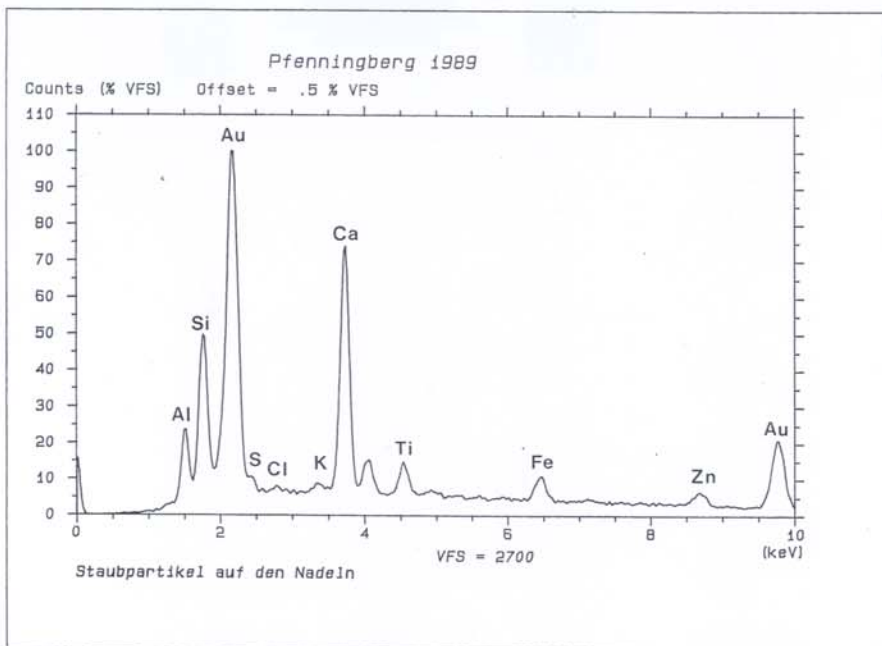


Abb. 16: Linz/Pfenningberg (1. Njg. 1989), EDX-Spektrum von Staubpartikeln.

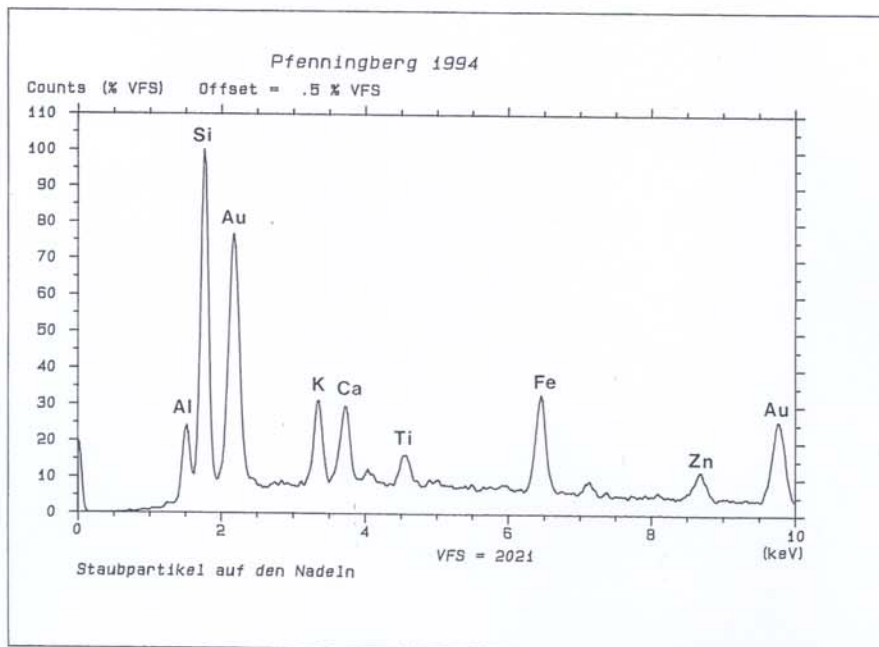


Abb. 17: Linz/Pfenningberg (1. Njg. 1994), EDX-Spektrum von Staubpartikeln.

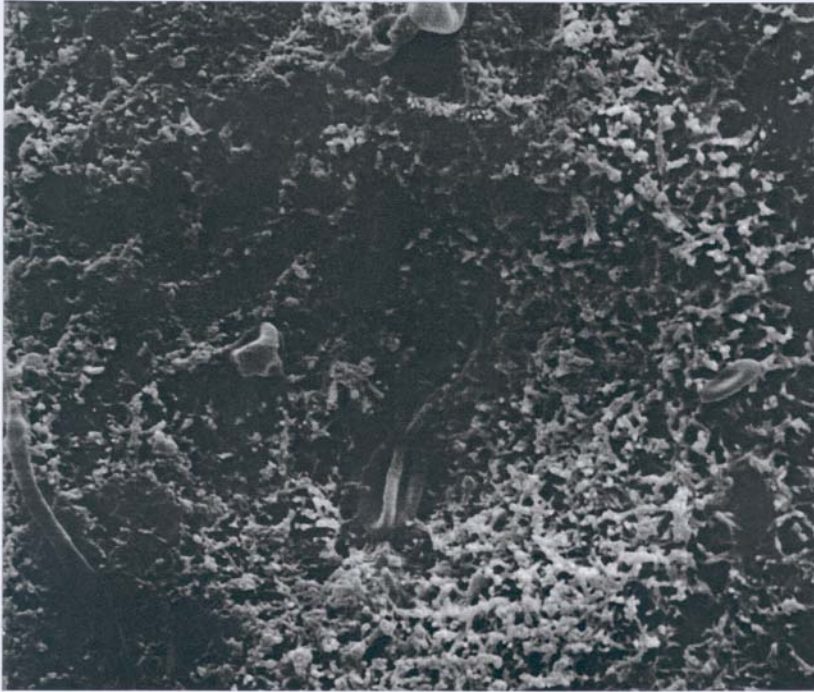


Abb. 18: Linz/Pfenningberg (1. Njg. 1995), REM-Aufnahme einer Spaltöffnung mit bereits beeinträchtigten Wachsstrukturen und beginnendem Pilzbefall, Vergrößerung: 3000 x.



Abb. 19: Linz/Kürnberger Wald (1. Njg. 1989), REM-Aufnahme von einem Nadelbereich mit Gipskristallen, Vergrößerung: 2300 x.

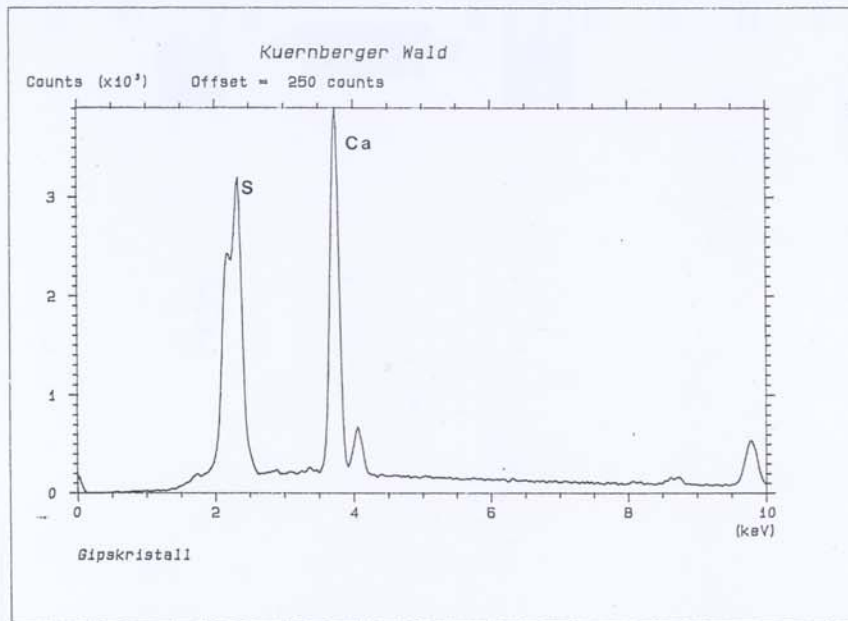


Abb. 20: Linz/Kürnberger Wald (1. Njg. 1989), EDX-Spektrum eines Gipskristalls.

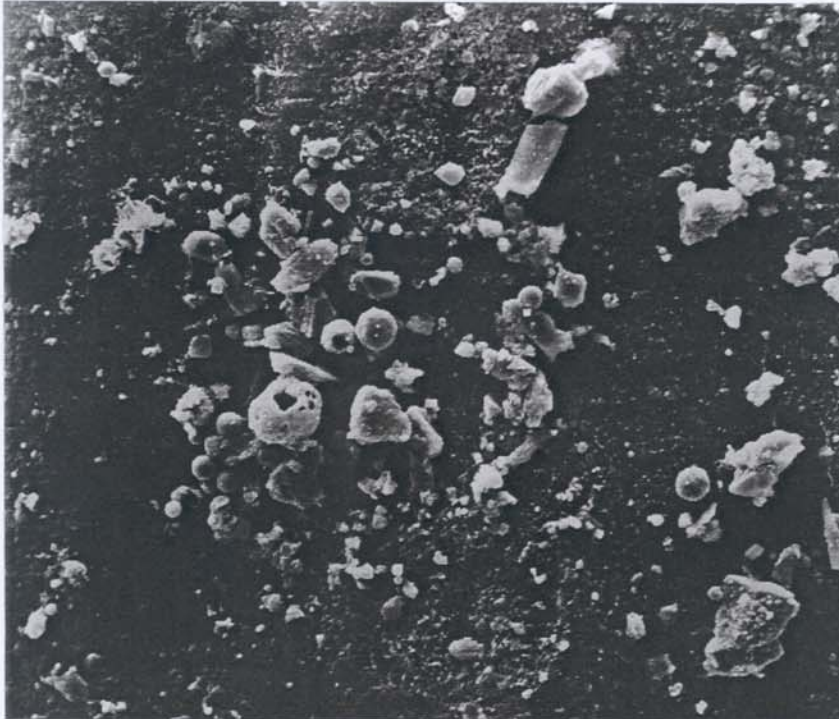


Abb. 21: Linz/Kürnberger Wald (1. Njg. 1989), REM-Aufnahme eines Nadelbereiches mit massivem Staubbelaag, Vergrößerung: 700 x.

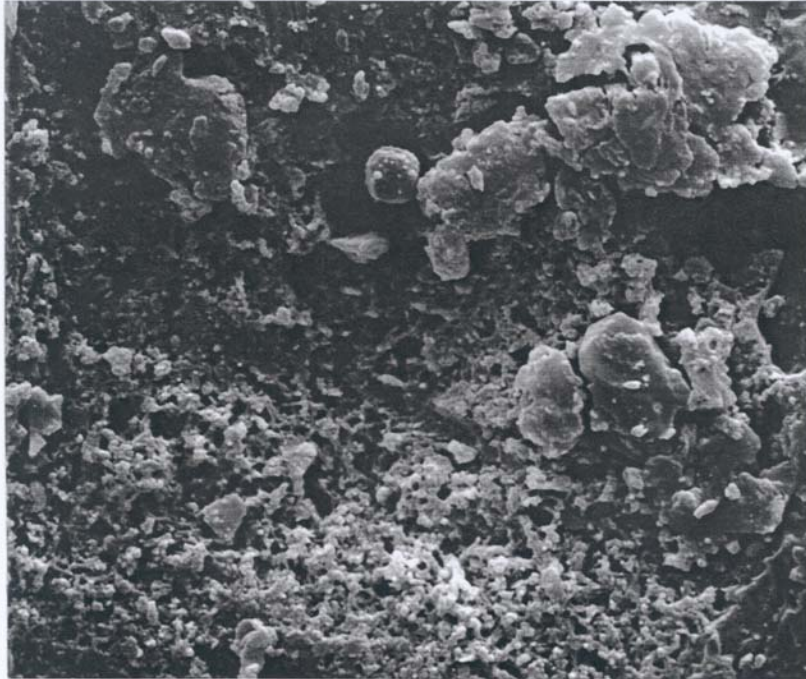


Abb. 22: Linz/Kürnberger Wald (1. Njg. 1995), REM-Aufnahme einer Spaltöffnung mit starker Wachsdegradation und Staubbelaag, Vergrößerung: 3000 x.



Abb. 23: Linz/Koglerau (1. Njg. 1995), REM-Aufnahme eines Nadelbereiches mit Verwerfungen der Oberfläche, Vergrößerung: 300 x.