© Verein zum Schutz der Bergwelt e.V. download unter www.vzsb.de/publikationen.php und www.zobodat.at

Jahrbuch des Vereins zum Schutz der Bergwelt, 67. Jahrgang (2002) 139 – 158

„Waldsterben" im Osterzgebirge

Untersuchungen an Fichten auf einer Waldmessstation

von *Volker Beer*

In der Einführung wird die Waldschadenssituation im Erzgebirge erläutert. In den folgenden Kapiteln werden Ursachen und Wirkungen der Schadstoffe unter Berücksichtigung von Relief, Lage und Witterung auf die Waldpflanzen dargelegt. Zuletzt erfolgt die Darstellung von Untersuchungen auf einer Waldmessstation im Osterzgebirge.

Die Vitalität der Waldökosysteme wird durch eine Vielzahl natürlicher sowie auch anthropogener Faktoren beeinflusst. Neben verschiedenen natürlichen Einflussgrößen wirkt insbesondere die Schadstoffimmission belastend auf den Standort und die Bestände. Diese führen in Kombination mit Standortfaktoren zur Ausbildung von Schadsymptomen. Seit einigen Jahren sind im Erzgebirge vermehrt Vergilbungen zu beobachten, die den „neuartigen Waldschäden" (montane Vergilbung) zugeordnet werden können. An der Fichte zeigen sich diese Symptome als Vergilbungen der 2. und 3. Nadeljahrgänge der Lichtnadeln. Besonders betroffen sind die dem Licht zugewandten Nadeloberflächen. Die beschattete Nadelunterseite bleibt zunächst grün. Verantwortlich für diese beobachteten Vergilbungen sind in einem komplexen Zusammenwirken physiologische Vorgänge, die durch den Standort und die Umweltbedingungen beeinflusst werden.

Im Osterzgebirge stehen die Fichten unter mehrfachen Stress, der durch eine geringe Magnesiumversorgung und die beobachtete erhöhte Ozonbelastung, gemeinsam mit weiteren Standortfaktoren, ausgelöst wird. Es wachsen visuell gesunde Fichten neben vergilbten Pflanzen. Die physiologischen und biochemischen Vorgänge in den Fichtennadeln unterliegen jahreszeitlichen und vom Nadelalter abhängigen Schwankungen.

An drei Fichten unterschiedlichen Schädigungsgrades im Altenberger Forstrevier wurden von 1994 bis 1997 Untersuchungen zum Pigmentgehalt durchgeführt. Der Gehalt an Pigmenten ist nicht konstant, sondern unterliegt jahreszeitlichen und Stress - induzierten Schwankungen. Die Nadeln der geschädigten Fichten weisen über die gesamte Beobachtungszeit einen niedrigeren Chlorophyllgehalt als die Nadeln des optisch ungeschädigten Vergleichsbaumes auf. Diese Unterschiede sind bei den neugebildeten Nadeln bis zu deren vollständigen Ausbildung noch gering, aber werden zum Herbst hin deutlich sichtbar. Vergleicht man im Herbst den Chlorophyllgehalt der einzelnem Nadeljahrgänge, zeigt sich beim nur gering geschädigtem Baum eine Zunahme der Chlorophyllgehaltes vom 1. bis etwa 3. oder 4. Nadeljahrgang. Die noch älteren Nadeljahrgänge weisen einen mit zunehmendem Alter sinkenden Chlorophyllgehalt auf. Es sind bis zu 7 Nadeljahrgänge vorhanden. Bei stärker geschädigte Fichten wird beim 2. Nadeljahrgang der höchste Chlorophyllgehalt gemessen. Ältere Nadeljahrgänge sind nur bis zum 3. oder maximal 5. Nadeljahrgang vorhanden. Stark geschädigte Fichten weisen im 1. Nadeljahrgang den höchsten Chlorophyllgehalt auf. Mit zunehmendem Alter der Nadeljahrgänge sinkt dieser rasch. Insgesamt sind nur 2 oder 3 Nadeljahrgänge vorhanden.

© Verein zum Schutz der Bergwelt e.V. download unter www.vzsb.de/publikationen.php und www.zobodat.at

Der Zustand der Erzgebirgswälder stabilisierte sich auf relativ hohem Schadniveau. Eine Entwarnung kann trotz der stark gesunkenen Sulfatschwefeleinträge nicht gegeben werden. Stickoxideinträge sowie Ozonbelastungen weisen keine sinkende Tendenz auf. Die Folgen einer tiefgründigen Bodenversauerung und eine weitere Auswaschung von Nährstoffen aus Böden und Forstpflanzen („neuartigen Waldschäden") stellen die Forstwirtschaft vor neue Herausforderungen, auch wenn die sichtbaren Schäden erfreulicherweise langsam zurückgehen.

Einführung:

Das derzeitige Waldschadensproblem ist vom Grundsatz her kein neuartiges Phänomen. Bereits in der Mitte des 19. Jahrhunderts (STÖCKHARDT 1850, 1871 und WISLICENUS 1898) erschienen wissenschaftliche Untersuchungen zu Waldschäden, die durch Luftverunreinigungen aus Industrieanlagen verursacht wurden. 1922 schrieb der Forstrat C. GERLACH in der Zeitschrift Silva, dass er zwischen Sayda und Ullersdorf im Erzgebirge Industrieabgase, deren Ursprung in dem Industrie- und Braunkohlengebiet um Brüx (Most) in Böhmen zu finden ist, wahrnehmen konnte. Er sprach damals die Vermutung aus, dass diese Abgase das Tannensterben in Sachsen massgeblich verursachten (C. GERLACH 1922 und R. GERLACH 1922).

Heute sind weite Teile der Wälder Sachsens schwer geschädigt. So ergab sich mit Stand vom 1.1. 1991 folgendes Bild für den Freistaat Sachsen:

Schadzone I extrem:	6346 ha
Schadzone I:	31864 ha
Schadzone II:	78485 ha
Schadzone III:	165574 ha
Summe:	**282269 ha**

Damit lagen etwa zwei Drittel der Waldfläche Sachsens in Immissionsschadzonen (LIEBOLD 1991). Weite Teile des Erzgebirges sowie Teile des Lausitzer Berglandes und die Mittelgebirge entlang der Grenze zwischen Böhmen und Polen (Isergebirge, Adlergebirge, Eulengebirge, Riesengebirge) bildeten ein ökologisches Notstandsgebiet im Zentrum Europas.

In den Kammlagen des Erzgebirges wurden maximale 30 min. Werte von 1000 bis 4000 µg SO2/m³ Luft gemessen. Die Folge dieser extremen Belastung war der Zusammenbruch von ganzen Fichtenbetriebsklassen (LIEBOLD 1991). Seit Beginn der 80er Jahre werden diese klassischen Rauchschäden, die massgeblich durch Schwefeldioxid, seine Folgeprodukte (schweflige Säure, Schwefelsäure) und Fluorwasserstoff verursacht werden, durch die neuartigen Schäden, die u.a. durch Ozon, Stickoxide und Photooxidantien ausgelöst werden, überlagert. So findet man heute eine Mischung beider Schadtypen vor.

Trotz territorial unterschiedlicher Rückgänge der Schwefeldioxidimmissionen wird nach wie vor der physiologische Schwellenwert, der für Fichte mit 20 bis 50 µg SO2/m³ angegeben wird (WENTZEL 1987), weiterhin permanent überschritten. Die menschliche Geruchsschwelle liegt für Schwefeldioxid bei etwa 1000 µg SO2/m³.

Die folgenden Tabellen dokumentieren die Entwicklung der Schwefeldioxidimmissionen in Sachsen (WIENHAUS 1997).

Tab. 1: SO2 - Mittelwerte Sommerhalbjahr 1993 im Vergleich mit dem langjährigen Mittelwert bis 1991

Gebiet	<1991	1992	1993	<1991	1993
		Mittel		Maximalwert	
Mittleres Erzgebirge	80 µg/m³	50 µg/m³	44 µg/m³	1470 µg/m³	238 µg/m³
Schwartenberggebiet	80 µg/m³	50 µg/m³	73 µg/m³	550 µg/m³	321 µg/mv
Osterzgebirge	80 µg/m³	70 µg/m³	36 µg/m³	550 µg/m³	494 µg/m³
rechtselb. Sächs. Schweiz	70 µg/m³	50 µg/m³	30 µg/m³	260 µg/m³	155 µg/m³
linkselb. Sächs. Schweiz	100 µg/m³	50 µg/m³	36 µg/m³	850 µg/m³	207 µg/m³

© Verein zum Schutz der Bergwelt e.V. download unter www.vzsb.de/publikationen.php und www.zobodat.at

Tabelle 2: Mobile SO2-Messungen 1993 - 1996 nach Territorien (in µg SO2/m³) (Wienhaus 1997)

Territorium	1993			1994			1995			1996		
	n	Mittel	Max	n	Mittel	Max	n	Mittel	Max	n	Mittel	Max
Mittelerzgebirge	82	44	238	107	80	1322	118	35	234	119	28	209
Schwartenberggebiet	64	73	321	70	40	204	49	70	380	62	26	123
Osterzgebirge	84	36	494	92	47	426	61	40	212	81	26	328
linkselb. Sächs. Schweiz	117	36	207	164	47	540	144	32	540	138	25	130
rechstelb.Sächs. Schweiz	204	30	155	209	35	205	160	24	241	197	16	64
Zittauer Gebirge	76	36	161	107	30	239	96	30	606	80	14	82

Mit der politischen Wende 1989/90 in Ostdeutschland war der Zusammenbruch der sächsischen Industrie verbunden. Ein Grossteil der völlig veralteten Anlagen wurde stillgelegt. Weitere Standorte wurden modernisiert (Rauchgasentschwefelung, Gaswäsche etc.) bzw. Werksanlagen nach jetzigem Stand der Technik komplett neu errichtet. Damit verbunden war ein drastischer Rückgang der Emissionen von Schwefeldioxid und Staub durch die sächsische Industrie.

Tabelle 3: Schwefeldioxidkonzentrationen an ausgewählten Standorten des Freistaates Sachsen

(Jahresmittel in µg/m³; Quelle Jahresberichte zur Immissionssituation des Sächsischen Landesamtes für Umwelt und Geologie 1989-1995)

Station	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995
Mölbis	528	204			75	66	
Leipzig-Südwest	309	170	174	93	70	58	36
Zwickau	223	184	156	112	107	67	36
Aue	212	178	84	104	86	61	39
Radebeul-Wahnsdorf	85	68	74	33	38	31	24
Zinnwald	40		61	37	38	43	36

Tabelle 4: Ozonkonzentrationen an ausgewählten Standorten des Freistaates Sachsen

(Jahresmittel in µg/m³; Quelle Jahresberichte zur Immissionssituation des Sächsischen Landesamtes für Umwelt und Geologie 1989-1995)

Station	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995
Radebeul-Wahnsdorf	43	42	45	47	54	57	49
Fichtelberg		73	68	60			73
Dresden	19	20	30	45	44	44	40

© Verein zum Schutz der Bergwelt e.V. download unter www.vzsb.de/publikationen.php und www.zobodat.at

Tabelle 5: Stickstoffdioxidkonzentrationen an ausgewählten Standorten des Freistaates Sachsen

(Jahresmittel in µg/m³; Quelle Jahresberichte zur Immissionssituation des Sächsischen Landesamtes für Umwelt und Geologie 1989-1995)

Station	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995
Radebeul-Wahnsdorf		16	17		22	18	22
Zinnwald	10	10	9		15	19	17
Plauen		17	14			25	32
Dresden-Postplatz			38	35	35		35

Trotz dieser für unsere Umweltsituation erfreulichen Verbesserung der Luftgüte kann für das Erzgebirge keine Entwarnung gegeben werden, denn bei Inversions- und Südwetterlagen strömt aus dem böhmischen Becken stark mit Schwefeldioxid und Flourwasserstoff belastete Luft über das Erzgebirge nach Sachsen.

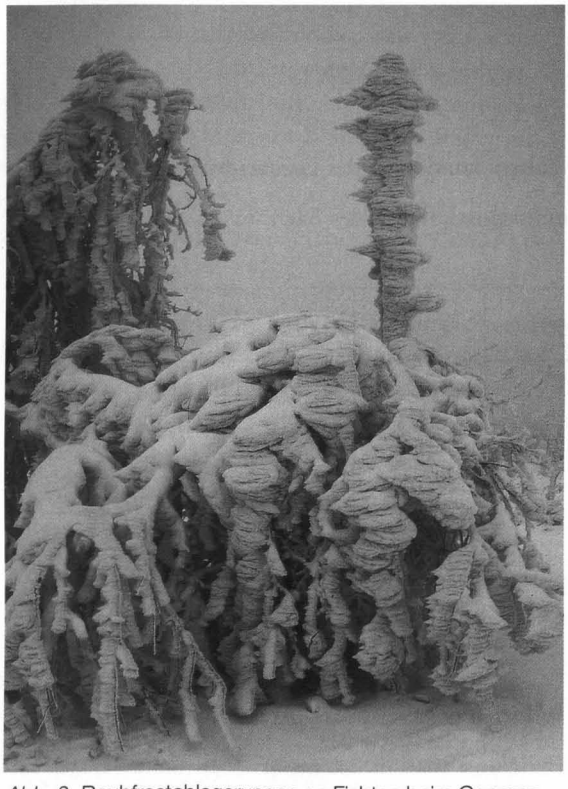

Abb. 3: Rauhfrostablagerungen an Fichten beim Georgenfelder Hochmoor am Erzgebirgskamm (14.12.1996).

Lage des FS Sachsen:

Der Freistaat Sachsen liegt in Mitteldeutschland und grenzt im Norden an die Bundesländer Brandenburg und Sachsen - Anhalt, im Westen an den Freistaat Thüringen und im Süden an den Freistaat Bayern. Im Südosten grenzt Sachsen an die Tschechische Republik und im Osten an Polen. Der Freistaat umfaßt das Gebiet zwischen 50°11' und 51°40' nördlicher Breite und zwischen 11° und 15° östlicher Länge. Sachsen liegt im Grenzbereich des europäischen Tieflandes und der mitteleuropäischen Mittelgebirgsschwelle. Die Landesfläche wird zu ca. 60,5 % landwirtschaftlich genutzt, zu ca. 24 % ist sie bewaldet (Forstwirtschaft) und ca. 11,5 % entfallen auf Siedlungen und Industrie. Nur etwa 1,5 % sind von Wasser (Flüsse, Seen) bedeckt.

Lage, Morphologie und Geologie des Erzgebirges:

Das Erzgebirge bildet im Südosten des Freistaates die natürliche Grenze zu Böhmen und Bayern. Dieses Gebirge ist die im Tertiär aufgestellte Pultscholle des zuvor im Rotliegenden bis zur welligen Rumpffläche verwitterten variskischen Gebirges. Diese Pultscholle erstreckt sich über 130 km von Nordost nach Südwest. Von Nord und Nordwest steigt sie allmählich an und bricht im Süden (Böhmen) steil zum Egergraben (Ohre) ab. Auf südlicher Seite wird der Egergraben vom böhmischen Mittelgebirge begrenzt. Dahinter befindet sich das böhmische Becken, in dessen Zentrum die Hauptstadt der Tschechischen Republik, Prag (Praha) liegt. Im Südwesten finden die Höhenzüge des Erzgebirges im Vogtland und Thüringer Wald ihre Fortsetzung. Im Westen und Nordwesten wird das Erzgebirge vom Erzgebirgsbecken, einem durch Sedimente des Rotliegenden

© Verein zum Schutz der Bergwelt e.V. download unter www.vzsb.de/publikationen.php und www.zobodat.at

gekennzeichnetem Übergangsgebiet zur Mittelgebirgszone begrenzt. Im Norden und Nordosten wird das Erzgebirge durch das Elbtal und das Elbsandsteingebirge begrenzt. Die Dresdner Elbtalweitung ist ein etwa 40 km langer und 3 bis 8 km breiter Grabenbruch, der sich von Nordwest nach Südost bis ins böhmische Becken erstreckt. Das Elbtal steigt, anfangs noch von pleistozänem Lösslehm bedeckt, leicht zum Erzgebirge an. Das Tal hat ein mildes Klima, das sogar Weinbau bis nach Pirna hinauf zulässt. Es fallen im Mittel 600 mm Niederschlag im Jahr. Das Klima des Tales zeigt Föhneinfluss sowie eine Neigung zur Temperaturinversion mit verstärkter Nebelbildung.

Im Erzgebirge herrschen Metamorphite des Mesozoikums vor. Im Osterzgebirge überwiegen die grauen Biotitgneise, im mittleren Erzgebirge rote Muskovitgneise und am Fichtelberg dominiert Muskovitschiefer. Westlich des Fichtelberges bestimmt von Quarzitklippen durchbrochener Glimmerschiefer die geologische Beschaffenheit des Gebirges. Phyllite und Tonschiefer herrschen im Westerzgebirge vor. Diese metamorphen Gesteine sind im gesamten Erzgebirge von Vulkanitstöcken durchbrochen. Diese Granite und Rhyolithe bilden Härtlinge, also Bergkuppen, die die Hochfläche überragen. Hier sind Kahleberg und Scharspitze als Beispiel zu nennen. Nicht unerwähnt seien die Granitkuppen bei Hirschberg und Eibenstock. Im Tertiär drangen basaltische Schmelzen in den Gesteinsverband ein und bildeten Ergussdecken wie am Scheibenberg oder Vulkanschlote wie am Geisingberg im Osterzgebirge, dem Cottaer Spitzberg, dem Decinsky Sneznik, den Zschirnsteinen und dem Grossen und Kleinen Winterberg im Elbsandsteingebirge. Die unterschiedliche Härte des Gesteins bedingt, dass der Erzgebirgskamm von Härtlingen überragt und von Sätteln unterbrochen wird. Im Nordosten leiten die Sandsteinebenen (ca. 300 bis 400 m NN), überragt von den Tafelbergen des Elbsandsteingebirges (450 bis 550 m NN) über das Erzgebirgsgrenzgebiet in den Erzgebirgskamm über, der langsam, aber nicht stetig von Nordost nach Südwest ansteigt. Mit dem 905 m hohen Kahleberg wird im Osterzgebirge die grösste Höhe erreicht. Der Kamm fällt dann unregelmässig ab und erreicht im Deutscheinsiedler Sattel mit 720 m Höhe eine sehr geringe Höhe bevor er zum Fichtelberg auf 1242 m unregelmässig ansteigt. Der tiefste Einschnitt in die Mittelgebirgsschwelle, die Sachsen vom Egergraben und dem Böhmischen Becken trennt, ist der Elbtaldurchbruch im Elbsandsteingebirge mit einer Höhe von 120 m. Folgende Kuppen/Berge und Sättel charakterisieren den Verlauf des Erzgebirgskammes einschliesslich des linkselbischen Teils des Elbsandsteingebirges: Grosser Zschirnstein 561 m, Decinsky Sneznik (Hoher Schneeberg) 721 m, Traugotthöhe 806 m, Geisingberg 824 m, Kahleberg 905 m und Pramenac (Bornhau-Berg) 909 m, Hemmschuh 846 m und Loucna (Wieselstein) 956 m, Kohlberg 837 m, Schwartenberg 787 m, Deutscheinsiedler Sattel 720 m, Ahornberg 823m, Kamenny vrch (Steindl) 842 m und Medvedi skala (Bärenfelsen) 923m, Jeleni hora (Hass-Berg) 993 m, Spicak (Spitzberg) 965 m, Fichtelberg 1242 m.

Das Osterzgebirge zeigt in seinen unteren und mittleren Lagen, bedingt durch geologische Störungen in der Nähe zum Elbtal und die unterschiedlich starke Verwitterung der harten Granite, Porphyrite und Basalte im weicheren Gneis, eine starke Reliefgliederung. Die Flüsse Gottleuba, Müglitz und Weisseritz gruben sich bis zu 100 m tief in die weicheren Gneisschichten ein. Das Hochlagenplateau des Osterzgebirges zeigt dagegen sanftere Reliefformen. Im Mittelerzgebirge dominieren sanfte Reliefformen mit schwach geneigten Hochflächen und flachen, stark frostgefährdeten Tälern. Es wird im wesentlichem durch die Freiberger Mulde entwässert. Das Westerzgebirge ist dagegen in hohe Berge und tief eingeschnittene Täler zergliedert. Die Flüsse Flöha, Zschopau und Zwickauer Mulde haben ihre Täler über 100 m tief in das Gebirge eingeschnitten. Diese geologisch bedingte starke Gliederung des Erzgebirges übt einen großen Einfluss auf das kleinräumige Wettergeschehen sowie die örtlich extrem hohen Immissionen, insbesondere im Bereich der Kammlagen, aus.

Das Wetter in Mitteleuropa:

Das Wetter in Mitteleuropa ist durch von Westen heranziehende Tiefdruckgebiete gekennzeichnet. Auf der Nordhalbkugel strömt die Luft entgegen dem Uhrzeigersinn in das Tief. So weht auf der Vorderseite eines „idealen" Tiefdruckgebietes der Wind aus

© Verein zum Schutz der Bergwelt e.V. download unter www.vzsb.de/publikationen.php und www.zobodat.at

Südost, dreht auf Süd und nimmt an Stärke zu. Mit Durchgang der Warmfront dreht der Wind weiter auf Südwest bis West. Nach Durchzug der Kaltfront dreht der Wind auf Nordwest vor und es fliesst die spezifisch schwerere Kaltluft ein. Der Wind dreht nun über Nord auf östliche Richtungen. In dieser Luftmasse kann sich ein Zwischenhoch oder Hochdruckgebiet aufbauen bis ein weiteres Tiefdruckgebiet heranzieht und sich der Vorgang wiederholt.

Im Hochdruckgebiet herrschen meist nur geringe Luftbewegungen. Die eingeflossene Luft verweilt über längere Zeit am gleichen Ort. Im Sommer wird aufgrund der starken Thermik (die Sonne erwärmt die Luft am Boden stärker als die darüber liegende Luft, die warme Luft dehnt sich aus und steigt nach oben,) die Luft vertikal gut durchmischt. Anders in der übrigen Zeit des Jahres, insbesondere im Winter. Die Strahlung der Sonne reicht nicht aus, die Luft am Boden zu erwärmen bzw. die Strahlung wird von Schnee oder Nebel reflektiert. So kann sich mehr und mehr Kaltluft am Boden sammeln. In der Kaltluft bildet sich Nebel. Es entsteht eine Inversion. Solche Wetterlagen sind sehr stabil. Die Inversion wird erst durch vorrückende Störungen und damit verbundenen kräftigen Wind aufgelöst.

Liegt ein Hochdruckgebiet über einer Industrieregion, reichern sich die von der Industrie emittierten Schadstoffe an. Je länger die Luftmasse am gleichen Ort verweilt, um so höhere Schadstoffkonzentrationen werden erreicht. Im Sommer wird eine allzustarke Schadstoffanreicherung durch die vertikale Luftdurchmischung verhindert. Es kann sich aber infolge reichem Strahlungsangebot der Sommersmog (enthält bodennahes Ozon) bilden. In der kalten Jahreszeit wird durch die Industrie die Nebelbildung (Abluft enthält Feuchtigkeit und Staubpartikel, die als Kondensationskeime wirken) erhöht. Der Nebel fördert durch die Reflektion des Sonnenlichts eine Verstärkung der Inversion. Besonders im Winter werden an derartigen Industriestandorten extreme Schadstoffkonzentrationen erreicht.

Regionale Besonderheiten der Witterung:

Unter Hochdruckeinfluss sammelt sich die Kaltluft in den das Erzgebirge umgebenden Tälern (Elbtal, Egergraben, Böhmisches Becken). Es bilden sich Inversionswetterlagen. Häufig liegt die Obergrenze dieser Inversionen unterhalb des Erzgebirgskammes. Die Hochlagen des Erzgebirges ragen in die klare, trockene Luft oberhalb der Inversion. Bei derartigen Wetterlagen werden im Gebirge zumindest tagsüber deutlich höhere Temperaturen als in den Tälern gemessen. Die Temperaturen unterliegen in der klaren Luft über der Inversion grossen Schwankungen zwischen Tag und Nacht. Die Luftfeuchte ist oberhalb der Inversion sehr gering. Somit sind oberhalb der Inversion alle Voraussetzungen für das Auftreten von Frosttrocknisschäden an Waldpflanzen gegeben.

Abb. 1: Durch Frosttrocknis geschädigte Fichten am Kahleberg im Osterzgebirge, aufgenommen im Mai 1996.

Wenn sich ein Hochdruckgebiet abschwächt und nach Südosteuropa zieht, beginnt der SO - Wind zu wehen. Er drückt die feuchten, mit Schadstoffen (vorwiegend Schwefeldioxid) angereicherten Inversionsnebel aus dem Egergraben gegen das Erzgebirge. Zunächst fliesst diese Luft durch die Taleinschnitte wie Elbtal und Deutscheinsiedler Sattel nach Sachsen ein. Die höheren Lagen des Gebirgszuges ragen wie Inseln aus dem heranziehenden Nebel. Nachdem der Nebel die Täler und Pässe durchströmt hat, löst er sich über dem sächsischen Mittelgebirgsvorland zunächst auf. Hierbei spielen auch Föhnwirkungen eine wichtige Rolle. Insbesondere das mittlere Erzgebirge ist durch ausgeprägte Föhnwetterlagen gekennzeichnet. Ist die Föhnwirkung zu gering und die Luft über Sachsen schon sehr feucht, bildet der einströmende Nebel über dem Mittelgebirgsvorland eine tiefliegende Schichtwolke. In den Sätteln werden

© Verein zum Schutz der Bergwelt e.V. download unter www.vzsb.de/publikationen.php und www.zobodat.at

Abb. 2: Blick vom Kahleberg nach Südost auf die Inversions- und Nebelobergrenze über dem Egergraben (Ohre) in Böhmen (Tschechien) am 7.12.1996.

extrem hohe Schadstoffkonzentrationen gemessen. Bei dem weiteren Zug der die Schadstoffe transportierenden Luftmassen nach Nordwesten verdünnen sich die Schadstoffe in der Umgebungsluft.

Nähert sich schnell ein kräftiges Tiefdruckgebiet, frischt der Wind aus Südost deutlich auf und erreicht am Erzgebirgskamm oftmals Sturmstärke. In diesem Fall wird die mit Schadstoffen angereicherte Luft gründlich aus dem Böhmischen Becken und dem Egergraben ausgeräumt. Die Luft wird in breiter Front über den Gebirgskamm gedrückt. Sie fliesst auch über die Gipfel nach Sachsen ein. Entlang des ganzen Kammes werden in einer derartigen Situation hohe Schadstoffkonzentrationen gemessen.

Erreicht dagegen nur eine schwache Störung Ostsachsen, so wird die Kaltluft nur teilweise oder gar nicht aus dem Egergraben ausgeräumt. Nur lokal ziehen die schadstoffbelasteten Nebel nach Sachsen, so im oberen Elbtal und im Deutscheinsiedler Sattel, wo dann auch wieder hohe Schadstoffkonzentrationen auftreten, obwohl am Kamm und auf den Gipfeln des Erzgebirges sowie im Erzgebirgsvorland weder Nebel noch Schadstoffe registriert werden können.

Es zeigt sich, dass die Schadstoffbelastung im Erzgebirgsraum einerseits vom Relief des Gebirges und andererseits von der Grosswetterlage sowie von der Höhe der Obergrenze der Inversionsschicht abhängt. Wo nun die höchsten Schadstoffkonzentrationen auftreten, bestimmt die Windrichtung. So gibt es lokal deutliche Unterschiede, ob ein Südost-, Süd- oder Südwestwind die sauren Nebel über das Gebirge drückt und in welcher Stärke der Nebel über den Kamm fliesst, also ob er nur durch die tiefsten Sättel und Taleinschnitte strömt, oder in breiter Front über den Kamm einfliesst, so dass nur die höchsten Erhebungen (Kahleberg, Fichtelberg) über den Nebel ragen, oder ob der Nebel so stark über das Gebirge gedrückt wird, dass auch die höchsten Gipfel „überflutet" werden.

In den Kammlagen wird der ziehende Nebel in jedem Fall durch dort vorhandene Pflanzen / Bäume ausgekämmt bzw. fällt als Sprühregen aus. Diese Nebelniederschläge sind extrem sauer. Im November und Dezember 1996 wurden an drei aufeinanderfolgenden Wochen Schnee- und Rauhfrostproben im Osterzgebirge entnommen. Es zeigte sich, dass die Rauhfrostproben pH-Werte zwischen 3 und 4 aufwiesen, während der Schnee pH-Werte zwischen 5 und 6 zeigte. Somit bestätigt sich, dass die höchsten Schadstoffkonzentrationen diese Industrienebel aufweisen, unabhängig ob sie über einer tschechischen oder deutschen Industrieanlage entstanden. Ausschlaggebend sind die Emissionen der betreffenden Industriestandorte. Dass die höchsten Schadstoffkonzentrationen im Bereich des Erzgebirgskammes bei südlichen Winden gemessen wurden, hat seine Ursache in den beschriebenen meteorologischen Gesetzmäßigkeiten. Die genauso stark belasteten Luftmassen der sächsischen Industriestandorte wurden dementsprechend in nordwestlicher Richtung über das norddeutsche Tiefland verfrachtet.

Wirkmechanismen der neuartigen (photooxidativen) und klassischen (Schwefeldioxid) Schadstoffe auf Waldökosysteme und Pflanzen:

Wälder als komplexe Ökosysteme sind vielfältigen Einflüssen ausgesetzt. So einerseits natürlichen Faktoren wie Standort (Bodenbeschaffenheit, Nährstoffangebot, Wasserangebot), der natürlichen Exposition, den Einflüssen der Witterung wie Hitze, Kälte, Dürre, Sturm, Schnee, Unwetter und biologischen natürlichen Faktoren wie Schädlingskalamitäten, Pilzbefall, Schäden durch Wild (schälen von Rinden, abäsen junger Triebe und Pflanzen). Durch natürliche Abwehrmechanismen kann das Ökosystem

© Verein zum Schutz der Bergwelt e.V. download unter www.vzsb.de/publikationen.php und www.zobodat.at

Abb. 4: Fichtenzweig mit durch „Neuartige Schäden" (Stickoxide in Kombination mit Ozon) geschädigten Nadeln. Nadeloberseite ist vergilbt. Aufgenommen: Juli 1995

Abb. 5: Unterseite desgleichen Zweiges wie Abbildung 4. Die Nadelunterseite ist nicht vergilbt. Aufgenommen im Juli 1995.

Schädigungen ausgleichen. Neben den natürlichen Faktoren wirken anthropogene Belastungen durch die Abgase und Abwässer vom Industrie, Kraftwerken, Verkehr und Hausbrand als weitere Belastungen auf die Wälder ein. Diese Belastungen lassen sich im Wesentlichen in die klassischen und die neuartigen (photooxidativen) Schäden einteilen:

Photooxidantien sind sekundäre Luftschadstoffe, die unter dem Einfluß des Sonnenlichtes in komplexen photochemischen Reaktionsketten vornehmlich aus Stickoxiden (NOx) und reaktiven Kohlenwasserstoffen gebildet werden. Ozon ist als relativ stabiles Endprodukt dieser Reaktionsketten anzusehen. So weist Ozon auf die Anwesenheit anderer, kurzlebigerer und viel reaktiverer Verbindungen hin, sofern es nicht direkt aus molekularem Sauerstoff durch Einwirkung von ultravioletter Strahlung gebildet wurde.

Die Betrachtung der Wirkung von Photooxidantien auf Pflanzen führt zu dem Schluss, dass ein Leben in einer sauerstoffhaltigen Atmosphäre unvermeidlich mit einer Photooxidantienexposition verbunden ist. Auch ohne anthropogene Emission primärer Luftschadstoffe bilden sich in der Atmosphäre Photooxidantien. Somit muss von einer natürlichen Hintergrund-Konzentration derartiger Stoffe ausgegangen werden. Die Pflanzen, insbesondere die Nadelbaumarten geben eine Vielzahl von Terpenverbindungen an die Atmosphäre ab. Bisher sind über 20.000 verschiedene Isoprenoide bekannt. Diese sind in der Lage mit angeregtem Sauerstoff oder Ozon vielfältige Oxidationsreaktionen einzugehen. So wird Pinen durch Singulett - Sauerstoff zu Verbenylhydroperoxid umgesetzt. Diese natürlichen Photooxidantien wirken auf die Pflanzen zurück. Begasungsversuche mit ß - Pinen an Fichten zeigten eine Vergilbung der Nadeln, eine reduzierte Photosyntheseleistung und einen reduzierten Pigmentgehalt.

Bei Zugabe von α - Tocopherylacetat, einem Antioxidanz, (über die Wurzel) konnte die Wirkung des ß - Pinens abgeschwächt werden.

Diese natürlichen Photooxidantien beeinflussen neben den anthropogenen Photooxidantien massgeblich den Gesundheitszustand der Bäume. Um naturnahe Photooxidantiengemische und somit möglichst naturähnliche Schadbilder im Begasungsexperiment zu erzeugen, wäre es von Interesse, Kombinationsbegasungen mit Ozon, Stickoxiden, Schwefeldioxid und Terpenen, zum Beispiel dem ß - Pinen, durchzuführen. Die experimentelle Durchführung solcher Versuche dürfte jedoch grosse Schwierigkeiten bereiten. Insbesondere die Erfassung der Pinenkonzentration, sowie die Konzentration und Art von Oxidationsprodukten des Pinens in der Kabinenluft wird nur mit einem sehr grossen analytischen und apparativen Aufwand möglich sein.

Auch innerhalb des pflanzlichen Stoffwechsels entstehen zwischenzeitlich eine ganze Reihe äusserst reaktiver Sauerstoffverbindungen. Als Beispiel möch-

© Verein zum Schutz der Bergwelt e.V. download unter www.vzsb.de/publikationen.php und www.zobodat.at

te ich die Photosynthese wählen: Bei starker Sonneneinstrahlung wird in der Lichtreaktion mehr NADPH gebildet (CO2-Konzentration ist geschwindigkeitsbestimmend) als im Calvinzyklus verbraucht wird. Als Folge davon steht NADP+ als Akzeptor (Elektronen aufnehmendes Biomolekül) der in der Photosynthese angeregten Elektronen nicht mehr in ausreichendem Masse zur Verfügung. Damit das Elektronentransportsystem bei NADP+ - Mangel nicht in einen überenergetisierten Zustand gelangt, müssen die angeregten Elektronen auf einen anderen Akzeptor übertragen werden. Als solcher dient der in der Photosynthese entstandene molekulare Sauerstoff. Als Produkte entstehen Superoxidradikale und Wasserstoffperoxid (H2O2). Wenn sogar bei solchen grundlegenden Prozessen wie der Photosynthese derartige toxische Sauerstoffverbindungen entstehen, ist es für die Pflanzen lebensnotwendig, entsprechende Entgiftungsmechanismen zu entwickeln. Enzymatisch entgiftet werden beispielsweise H2O2, organische Peroxide und Superoxidradikale. Ozon und Hydroxylradikale werden durch Antioxidantien entgiftet.

So werden die eingetragenen und gebildeten Photooxidantien durch die vorhandenen Entgiftungsmechanismen abgefangen, ohne dass der Gleichgewichtszustand des Stoffwechsels gestört wird. Diese Entgiftungsmechanismen sind teilweise induzierbar, also bei gering vermehrten Eintrag von Photooxidantien wird durch physiologische Veränderungen die Kapazität dieser Mechanismen erweitert. Es stehen also bestimmte Enzyme in größerer Menge bereit. So zum Beispiel die Superoxiddismutat(SOD)- Aktivität in Fichtennadeln. Am unbelastetem Standort sinkt sie mit zunehmenden Nadelalter, am belasteten Standort wird unabhängig vom Nadelalter eine erhöhte Aktivität eingestellt.

Soll von diesen Aktivitäten auf eine anthropogene Beeinflussung geschlossen werden, muss geklärt werden, ob die primären Ursachen / Luftinhaltsstoffe, die die Entstehung der Photooxidantien ausgelöst haben, anthropogenen Ursprungs sind.

Erst wenn der Eintrag von Photooxidantien die Entgiftungskapazität übersteigt, kommt es zu Schädigungsreaktionen. Bei Ozon sind das unter anderem Veränderungen des Stoffwechsels, dem aber Reparatur- und Kompensationsmechanismen entgegenwirken. Es stellt sich ein neues Gleichgewicht ein, das durch diese Kompensationsmechanismen aufrechterhalten wird. Übersteigt der Schadstoffeintrag auch diese Kapazität, kommt es zu einer Schädigung.

Somit ist bei der Untersuchung von Enzymaktivitäten in Abhängigkeit der Schadstoffbelastung durch Photooxidantien an Pflanzen von wesentlicher Bedeutung, an welcher Stelle dieser Abfolge von Prozessen sich die Untersuchungspflanzen befinden.

Das alles experimentell zu erfassen, ist sehr schwierig, schon deshalb, weil die Kapazität der Entgiftungsmechanismen einer entwicklungsphysiologischen Steuerung unterliegt. Zusammenhänge zwischen der Schädigung durch Photooxidantien und der Kapazität der Entgiftungsfähigkeit der Pflanzen unterliegen auch dem saisonalem Rhythmus des Antioxidantiengehaltes der Pflanzenzellen. So wird es auch von erheblicher Bedeutung sein, ob eine Schädigung im Sommer oder im Winter, ob am Tage oder in der Nacht erfolgt.

Werden soviel Einflussgrößen wie möglich konstant gehalten und Pflanzen gleicher Provenienz in Kabinen Begasungsversuchen unterworfen, lassen sich Beziehungen zwischen Schadstoffeinwirkung und Aktivitätsänderung von Enzymen, bzw. Antioxidantienkonzentrationsveränderungen feststellen. Durch Erhöhung der Versuchspflanzenanzahl lässt sich die statistische Sicherheit von Messergebnissen erhöhen. Jedoch genügt allein eine große Probenzahl bei derartigen biologischen Untersuchungen nicht zur Sicherung der Ergebnisse. Bei derartigen Untersuchungen ist es erforderlich, die Messungen über mehrere Vegetationsperioden, wenigstens 3 Jahre, fortzuführen, um die Streuung der Witterung berücksichtigen zu können. Wird eine Probe nur über ein Jahr untersucht, dann sind die Ergebnisse nur für genau den in dem betreffendem Jahr erfolgten Witterungsverlauf signifikant. Treten beispielsweise in dem einen Jahr Spätfröste auf, in dem anderem nicht, so können sich die biologischen Parameter dergleichen Probe bei ansonsten gleichen Bedingungen deutlich unterscheiden.

Jedoch ist die Übertragbarkeit der Ergebnisse solcher Kabinenversuche auf Bestände nur in Grenzen

© Verein zum Schutz der Bergwelt e.V. download unter www.vzsb.de/publikationen.php und www.zobodat.at

möglich, schon aus dem Grund, das alle in den Kabinen konstant gehaltenen oder ausgeschalteten Einflussgrößen in der Natur in unterschiedlicher und stets wechselnder Intensität wirksam sind. Ausserdem findet man im Bestand Bäume der verschiedensten Arten, Provenienzen und Altersklassen die sich auch gegenseitig beeinflussen.

Bei Fichten wird die Wirkung von Ozon sowohl bezüglich Symptomausprägung als auch teilweise bezüglich einer Chlorophyllgehaltsverringerung in Gegenwart hoher Lichtintensität verstärkt. Dies wird zusätzlich noch bei Nährstoffmangel, insbesondere Stickstoffmangel, weiter verstärkt. Hierbei lässt sich unter Einbeziehung des Ozons und seiner direkten Wirkung auf das Pigmentsystem eine Wechselwirkung zwischen Lichtstärke und Chlorophyllgehalt über die Synthese von stickstoffhaltigen Porphyrinringen in den Chlorophyllen annehmen, die lichtgesteuert ist.

Somit wird deutlich, dass die Photooxidantien gemeinsam mit den anderen Faktoren in vielfältige Weise auf die Stoffwechselprozesse einwirken. Da aber einer Akkumulation der Schadstoffe der pflanzliche Stoffwechsel in gewissem Umfang entgegenwirkt, ist ein chemischer Nachweis schwierig. Zur Erhebung von Ozonschäden/Photooxidantienschäden können jedoch pflanzliche Bioindikatoren eingesetzt werden. Geeignet als Indikatorpflanzen sind Tabak *(Nicotiana tabacum Bel.)* und Fichte *(Picea abies)*. Flechten sind gegenüber Photooxidantien tolerant, aber aufgrund ihrer Empfindlichkeit gegenüber klassischen Rauchschäden (SO2) für deren Anzeige gut geeignet.

Durch die Wirkung der Photooxidantien auf die zellulären Membranen wird die Organisation und Struktur der darin eingelagerten Pigmente beeinflusst. So kann die Bestimmung der Pigmente, beispielsweise bei Fichte, zu Aufschlüssen über Belastung durch Photooxidantien führen. Die Nadeln geschädigter Fichten zeigen verringerte Pigmentgehalte. Der Chlorophyllgehalt geschädigter Fichtennadeln liegt signifikant unter dem ungeschädigter Nadeln. Chlorophyll a und Chlorophyll b werden etwa gleichermassen geschädigt, so dass sich das Verhältnis Chlorophyll a / Chlorophyll b nicht signifikant verändert. Der Carotinoidgehalt geschädigter Fichten ist reduziert. Die Relation Gesamtchlorophyll / Carotinoide zeigt eine signifikante Beziehung zum Entnadelungsgrad und zur Photooxidantienbelastung der Pflanzen. Mit steigender Belastung sinkt das Gesamtchlorophyll / Carotinoidverhältnis.

Die Photosynthese versorgt die gesamte Pflanze mit Assimilaten. Geschädigte Fichten entwickeln deutlich kleinere Nadeln, haben somit eine kleinere Assimilationsfläche und eine geringere Pigmentkonzentration. Das führt zu einer zu geringen Photosynthesekapazität und mit anderen Stressfaktoren (Frost, Dürre, Nährstoffangebot) zu komplexen Schadwirkungen.

Einen entscheidenden Beitrag an den Waldschäden leisten die luftgetragenen Schadstoffe, so auch die Photooxidantien. Sichtbar wird das an der Höhenverteilung der Schäden. Die Schäden nehmen mit steigender Höhe zu und erreichen in den Alpen ein Maximum in Höhenlagen zwischen 1100 m und 1600 m. Das entspricht der Höhenlage der Inversionsschicht. Inversionen sind mit Hochdruckwetterlagen gekoppelt und werden durch die adiabatische Erwärmung der im Hochdruckgebiet absinkenden Luft und strahlungsbedingte Abkühlung in Bodennähe verursacht. Dadurch wird die sonst übliche Temperaturabnahme mit zunehmender Höhe umgekehrt. Es ist also am Boden / im Tal kälter als in höhergelegenen Regionen. Dieser positive vertikale Temperaturgradient führt zu einer starken Unterbindung des vertikalen Luftaustausches. So reichern sich die unterhalb der Inversionsschicht abgegebenen Schadstoffe in der Inversion an und können innerhalb weniger Tage toxische Konzentrationen erreichen. Die Inversionsschicht ist häufig durch stratusartige / hochnebelartige Bewölkung gekennzeichnet. Diese Nebel verhindern das Eindringen photochemisch aktiver Strahlung in tiefere Schichten. An der Grenzfläche herrschen somit optimale Bedingungen für photochemische Prozesse, denn hier treffen die Strahlung, mitgeführtes sowie gebildetes Ozon der klaren Luft über der Inversionsschicht auf die anthropogenen Schadstoffe, die Feuchtigkeit und die Schwebstoffe der Inversion. Diese obere Grenzschicht stellt somit einen optimalen photochemischen Reaktor dar. Viele der entstehenden Photooxidantien sind

© Verein zum Schutz der Bergwelt e.V. download unter www.vzsb.de/publikationen.php und www.zobodat.at

gut wasserlöslich und können sich in den vorhandenen Nebeltröpfchen anreichern und in der wässrigen Phase weitere Reaktionen eingehen. Der pH-Wert dieser Nebeltröpfchen kann extrem niedrige Werte unter pH = 3 erreichen. Diese reaktiven Nebeltröpfchen können nun mit den Pflanzen der entsprechenden Höhenlagen in Kontakt treten und mannigfache Schäden auslösen (z.B. direkte Schädigung der Nadeln, Versauerung des Bodens durch Auskämmen der ziehenden Nebelschwaden durch die Vegetation).

Im Unterschied zu dem beschriebenen Schadtyp durch Photooxidantien / Ozon sind die massiven Schäden der Mittelgebirge, vor allem dem Erzgebirge dem klassischen Schwefeldioxidschäden, so dem SO2 - Ca - Typ (klassischer Kraftwerkstyp) zuzuordnen. Zu diesem Schadbild werden neben dem Schwefeldioxideinträgen auch die weiteren anthropogenen Belastungen wie Chlorwasserstoffsäure, Fluorwasserstoffsäure, Stickoxide, Russ, Staub und Schwermetalle, jedoch ohne Einwirkung von photochemischer Strahlung und photochemischen Reaktionen gezählt. Bei diesem Schadtyp erfolgt die Schädigung vorrangig durch Schwefeldioxid, das den Grossfeuerungsanlagen entstammt. Parallel dazu werden durch diese Anlagen grosse Mengen kalziumhaltiger Stäube emittiert. Durch die alkalischen Bestandteile der Rauchgase konnten teilweise die Säuren kompensiert werden. Auf dem Weg vom Emittenten zur Senke kann das Schwefeldioxid durch Wasseraufnahme zu schwefliger Säure, bzw. durch Wasseraufnahme nach vorangegangener Oxidation zu Schwefelsäure reagieren. Diese Säuren erreichen dann mit den Niederschlägen als nasse Deposition (Eintrag, Ablagerung) oder mit dem Nebel als feuchte Deposition die Mittelgebirge. Sie sind als saure Niederschläge bekannt und schädigen die Pflanzen einerseits durch Bodenversauerung über das Wurzelsystem, andererseits über die direkte Aufnahme durch die Assimilationsorgane. Die Schadwirkung der schwefelsauren Depositionen wird durch das Auskämmen von saurem Nebel (aufliegende Wolkendecke) durch die Pflanzen in den höheren Lagen der Mittelgebirge verstärkt. Es zeigt sich auch eine verstärkte Schadwirkung auf Flächen, die dem die sauren Nebel transportierendem Wind zugewandt sind.

Abb. 6: Klareis (Eisregen, Nebelnässen) Rauhfrost, Naßschnee und Schneefall führten zu Wipfel- und Kronenbrüchen. Aufgenommen: Osterzgebirge, Forstamt Altenberg, Revier Hirschsprung Abteilung 443 a3 am 21.12.1995.

Bei der Aufnahme durch die Nadel stellt sich den Schadstoffen zunächst die kutikuläre (oberste Zellschicht des Blattes) Wachsschicht in den Weg. Wachse sind chemisch sehr beständig und stellen einen guten Schutz der Assimilationsorgane dar.

Wie rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen zeigen, werden die Wachse auf der Pflanze trotzdem zerstört. Das ist durch Einwirkung von organischen Reaktionsprodukten des Ozons, einerseits aus den organischen Aerosolen der Pflanzen selbst und Ozon, andererseits aus organischen Abgasen und Stickoxiden aus Industrie und Verkehr und Ozon gebildet, möglich. So fördert der Photosmog in Zusammenwirkung mit energiereichen Licht die Zerstörung der kutikulären Wachse.

Die Schadstoffaufnahme über die Assimilationsorgane erfolgt in den meisten Fällen über die Stomata (Spaltöffnung) und hängt von deren Öffnungsgrad

© Verein zum Schutz der Bergwelt e.V. download unter www.vzsb.de/publikationen.php und www.zobodat.at

ab. Dieser wird durch den Stoffwechsel der Pflanze bestimmt. Bei aktiven Stoffwechsel, also einer grossen Stomataleitfähigkeit können bei gleichem Schadstoffangebot grössere Mengen Schadstoffe aufgenommen werden als bei geschlossener Stomata. So fallen die Maxima der Schwefeldioxidbelastung in den Winter, also in den Zeitraum der Stoffwechselruhe, so dass dieser Zutrittsweg nahezu verschlossen bleibt und nur der Zugang durch Diffusion und durch Nekrosen (akute Schäden) möglich ist. Im Gegensatz dazu liegen die Maxima der Photooxidantienbelastung im Sommer, wenn die Pflanzen stoffwechselaktiv sind und der Zugang über die Stomata erleichtert wird. So sind die Aufnahmemöglichkeiten für die Photooxidantien weitaus günstiger als für die klassischen Rauchschadstoffe. Das kann eine Ursache dafür sein, dass schon sehr geringe Konzentrationen von Photooxidantien zu relativ starken Schäden an den Pflanzen führen.

Sind die Schadstoffe in der Pflanze, wirken sie auf deren Stoffwechsel ein. Die Folge davon sind veränderte Enzymaktivitäten und veränderte Permeationsfähigkeiten zellulärer Membranen. Solche Veränderungen sind schon feststellbar, noch bevor ein sichtbares Schadbild erkennbar wird. Auf den Einfluss von Schadstoffen weisen in besonderem Masse Aktivitätsänderungen von Peroxidasen, Glutathion - Reduktase, Phosphoenolpyruvat - Carboxylase, der Zimtalkohol - Dehydrogenase und der Gehalt von Antioxidantien wie Glutathion und Ascorbat hin. Jedoch wäre es ein Trugschluss, allein von einer bestimmten Aktivitätsänderung eines oder mehrerer dieser Enzyme auf eine bestimmte Schadstoffeinwirkung einer bestimmten chemischen Verbindung zu schliessen, denn die Enzymaktivität wird durch eine Reihe von Faktoren, beginnend bei der Vitalität der Pflanze, über die Jahreszeit (in welchem Zustand ist der momentane Stoffwechsel, z.B. Austrieb oder Ruhe) bis hin zu biotischen und abiotischen Standortfaktoren bestimmt. Somit stehen alle Einflussgrössen die auf eine Untersuchungspflanze wirken mit dieser und untereinander in Wechselbeziehung.

Ein massgeblicher Einflussfaktor ist der Boden. So bestimmt dessen Nährstoff- und Wasserangebot wesentlich den Vitalitätszustand der Pflanzen. Ein Säureeintrag verändert die Bodenbeschaffenheit, die Mikroflora und auch die Ausbildung von Mykorrhiza („Pilzwurzel", Symbiose von Pflanzenwurzel und Pilzhyphe) an den Feinwurzeln. Das Pilzgeflecht vergrössert die resorbierende Oberfläche der Feinwurzel, nimmt mineralische Nährstoffe wie Stickstoff, Phosphor und Kalium effektiver auf und schützt die Wurzel vor krankheitserregenden Pilzen. Im Gegenzug erhält das Pilzgeflecht energiereiche Verbindungen (Kohlehydrate) von den Wurzeln. Mykorrhizawurzeln zeigen eine 2 bis 4-fach höhere Atmungsintensität als Wurzeln ohne Symbiose (Zusammenleben zum gegenseitigen Vorteil beider biologischer Partner). Wird die Mykorrhizabildung verhindert, zeigen die Pflanzen schwere Schäden.

Durch Säureeintrag verändert sich der pH-Wert des Bodens und damit die Verfügbarkeit der Nährelemente. Auch werden phytotoxische Ionen wie Al^{3+} gelöst und können durch die Wurzel aufgenommen werden. So trat durch langjährige Deposition (Eintrag, Ablagerung) von Säuren infolge der Schwefeldioxidbelastung eine teilweise tiefgründige Bodenversauerung ein, die jedoch durch die gleichzeitige Deposition von kalzium- und magnesiumhaltigen Stäuben der Kraftwerke etwas abgepuffert werden konnte. Bleiben durch effektive Staubfilter bei Beibehaltung oder deutlich langsamer sinkender Schwefeldioxidemission diese Stäube aus, könnte ein weiterer Versauerungsschub ausgelöst werden. Gleichzeitig wird durch Auswaschung ein Nährstoffmangel induziert, der zu entsprechenden Nährstoffmangelbildern führt. Eine kombinierte Einwirkung von Ozon und saurem Nebel führt bei Fichten zu einer gesteigerten Auswaschung von Magnesium und Kalzium, wobei die ausgewaschene Ionenmenge vorrangig von der Ozonkonzentration abhängt. Weiterhin ist die Auswaschung vom Vitalitätszustand der Bäume abhängig. Höchste Auswaschung zeigen Fichten geschwächter Vitalität des Magnesiummangeltyps. So wird deutlich, dass einmal geschwächte Pflanzen weitaus stärker angegriffen werden als vergleichsweise vitale Pflanzen. Nicht zuletzt wird die Vitalität der Bäume durch ihre Exposition bestimmt. So sind große Bäume, Bäume am Waldrand und Bäume in Kammlagen weitaus stärker den Witterungseinflüssen, vor allem Wind und Nebel ausgesetzt, als an vergleichbaren geschützten Standorten. Wind und Nebel

© Verein zum Schutz der Bergwelt e.V. download unter www.vzsb.de/publikationen.php und www.zobodat.at

Abb. 7: Sich auflösender Fichtenbestand auf dem Kahleberg nach jahrelangem Einfluss von saurem Regen, Schwefeldioxid (SO2-Ca-Typ, klassischer Kraftwerkstyp) in der Schadzone I extrem (stärkste Schadzone). Das rauhe Klima am Erzgebirgskamm wirkt schadverstärkend. Lichtliebende und säuretolerante Reitgrasarten überwuchern die freiwerdenden Flächen. Aufgenommen im Juli 1993.

verstärkt die Schäden durch anthropogene Belastungen. So sterben auch die alten Bestände, Bäume am Waldrand und in den Kammlagen zuerst ab.

Nun, hieran zeigt sich die mannigfache Vernetzung der Wirkfaktoren. Wird also ein Waldbestand durch eine Schadwirkung, z.B. einer Schadgaseinwirkung geschwächt, so sind die Wirkungen sehr komplex. Durch das Schadgas verlichten sich die Kronen, in der Folge davon fällt mehr Sonnenlicht auf den Boden, das wiederum hat Folgen: einerseits die raschere Austrocknung des Bodens, andererseits eine Veränderung des Unterwuchses. Schatten- und feuchtigkeitstoleranter Unterwuchs wird durch licht- und trockentolerante Arten verdrängt. Diese Artenveränderung hemmt beispielsweise die natürliche Waldverjüngung. Durch die ursächliche Verlichtung des Bestandes wird der Wind im Bestand weniger abgebremst, also eine weitere Förderung der Austrocknung.

Demgegenüber können ergiebige Niederschläge den Boden abspülen (Erosion). Ausserdem können die Niederschläge nicht mehr in genügendem Maße gespeichert werden (wasserhaushaltsregulierende Funktion beeinträchtigt). Alle diese Einflussgrößen wirken auf die geschwächten Bäume zurück (Rückkopplung). Die Folge: weiterer Stress für den Bestand und somit fortschreitende Vitalitätseinbussen. Dauert die Schadstoffimmission weiterhin an, erfolgt durch diese natürlich auch eine weitere Schwächung. Weitere biologische Faktoren wie Schadinsekten und Schadpilze tragen durch ihre sprunghafte Vermehrung zu einer weiteren Bestandsschädigung bei. Damit verändert sich auch die Artenzusammensetzung des Biotops. Daran wird deutlich, durch die Komplexität der Wirkungen wird das Ökosystem mehr und mehr destabilisiert. Schon ein kleiner Anlass genügt, um irreversible Schäden auszulösen. Leider wird oftmals dieser Auslöser mit den tieferliegenden Ursachen verwechselt.

Untersuchungen zum Pigmentgehalt unterschiedlich stark geschädigter Fichten im Osterzgebirge auf der Versuchsfläche Oberbärenburg:

Die Vitalität der Waldökosysteme wird durch eine Vielzahl natürlicher sowie auch anthropogener Faktoren beeinflusst. Neben verschiedenen natürlichen Einflussgrössen wirkt insbesondere die Schadstoffimmission belastend auf den Standort und die Bestände. Diese führen in Kombination mit Standortfaktoren zur Ausbildung von Schadsymptomen. Seit einigen Jahren sind im Erzgebirge neben den „klassischen" Schädigungen durch Schwefeldioxid und sauren Regen vermehrt Vergilbungen zu beobachten, die den „neuartigen Waldschäden" (montane Vergilbung) zugeordnet werden können. An der Fichte zeigen sich diese Symptome als Vergilbungen der 2. und 3. Nadeljahrgänge der Lichtnadeln. Besonders betroffen sind die dem Licht zugewandten Nadeloberflächen. Die beschattete Nadelunterseite bleibt zunächst grün. Verantwortlich für diese beobachteten Vergilbungen sind in einem komplexen Zusammenwirken physiologische Vorgänge, die durch den Standort und die Umweltbedingungen beeinflusst werden.

Am Standort Oberbärenburg stehen die Fichten unter mehrfachen Stress, der durch eine geringe Magnesiumversorgung und die beobachtete erhöhte Ozonbelastung, gemeinsam mit weiteren Standortfaktoren und den noch immer vorhandenen Einträgen des sauren Regens und der witterungsabhängigen Schwefeldioxidbelastung, ausgelöst wird. An diesem Standort wachsen visuell gesunde Fichten neben ver-

© Verein zum Schutz der Bergwelt e.V. - Download unter www.vzsb.de/publikationen.php und www.zobodat.at

Abb. 8: Optisch gesunde Vergleichsfichte der Untersuchungen zu immissionsbedingten Waldschäden. Oktober 1995.

gilbten Pflanzen. Die physiologischen und biochemischen Vorgänge in den Fichtennadeln unterliegen jahreszeitlichen und vom Nadelalter abhängigen Schwankungen.

An drei Fichten unterschiedlichen Schädigungsgrades des Standortes Oberbärenburg / Osterzgebirge wurden von 1994 bis 1997 Untersuchungen zum Pigmentgehalt durchgeführt. Der Gehalt an Pigmenten ist nicht konstant, sondern unterliegt jahreszeitlichen und Stress - induzierten Schwankungen. Die Nadeln der geschädigten Fichten weisen über die gesamte Beobachtungszeit stets einen niedrigeren Chlorophyllgehalt als die Nadeln des optisch ungeschädigten Vergleichsbaumes auf. Diese Unterschiede sind bei den neugebildeten Nadeln bis zu deren vollständigen Ausbildung noch gering, aber werden zum Herbst hin deutlich sichtbar. Vergleicht man im Herbst den Chlorophyllgehalt der einzelnem Nadeljahrgänge, zeigt sich beim nur gering geschädigtem Baum eine Zunahme der Chlorophyllgehaltes vom 1. bis etwa 3. oder 4. Nadeljahrgang. Die noch älteren Nadeljahrgänge weisen einen mit zunehmendem Alter sinkenden Chlorophyllgehalt auf. Es sind bis zu 7 Nadeljahrgänge vorhanden. Bei stärker geschädigten Fichten wird beim 2. Nadeljahrgang der höchste Chlorophyllgehalt gemessen. Ältere Nadeljahrgänge sind nur bis zum 3. oder maximal 5. Nadeljahrgang vorhanden. Stark geschädigte Fichten weisen im 1. Nadeljahrgang den höchsten Chlorophyllgehalt auf. Mit zunehmendem Alter der Nadeljahrgänge sinkt dieser rasch. Insgesamt sind nur 2 oder 3 Nadeljahrgänge vorhanden. Auch zeigt sich bei geschädigten Bäumen stets ein erhöhter Ascorbatgehalt. So sind visuell ungeschädigte Pflanzen durch einen hohen Chlorophyll- und niedrigen Ascorbatgehalt, deutlich geschädigte Fichten durch einen niedrigen Chlorophyll- und einen stark erhöhten Ascorbatgehalt gekennzeichnet.

Insbesondere während des Austriebes reagieren die Bäume deutlich auf Umwelteinflüsse. Im Herbst unterliegen die Chlorophyllgehalte und Quotienten Gesamtchlorophyll / Carotine keinen allzugrossen Schwankungen. Da die Werte der Untersuchungsparameter ab September keinen grossen zeitlichen Schwankungen unterliegen, aber zwischen den Schädigungsstufen deutliche Unterschiede erkennbar sind, ist es sinnvoll, für die Charakterisierung von ausgewählten Beständen grössere Baumkollektive zweimal im Zeitraum September bis November zu beproben.

Die Vegetationsperiode 1994 verlief heiss und trocken. Es traten etwas erhöhte Ozon- und Strahlungswerte auf. Der Chlorophyllgehalt und die daraus abgeleiteten Parameter ergaben deutliche Hinweise auf eine erfolgte Schädigung. Insbesondere die am stärksten geschädigte Fichte zeigte starke Vergilbungen der älteren Nadeljahrgänge, die aber auch durch die schlechte Magnesiumversorgung interpretiert werden könnten. Die schwach geschädigte Fichte zeigte dagegen deutliche Vergilbungen der Nadeloberseiten der 2. und 3. Nadeljahrgänge. Die Magnesiumspiegel dieser Fichte lagen deutlich über denen der am stärksten geschädigten Fichte. Diese Vergilbungserscheinung, die im August am deutlichsten ausgeprägt war und sich im Herbst wieder zurückbildete, könnte der Wirkung von Ozon, starker Strahlung und der Trockenheit zugeordnet werden. In den Folgejahren gestaltete sich die Witterung sehr feucht und zunehmend kühler. Trotzdem wurden weiterhin hohe Ozonbelastungen gemessen. Es traten aber keine so deutlichen Schädigungen an den Fichten auf. Über diese Zeit wurde eine nahezu kontinuierliche Verbesserung der Pigmentausstattung beobachtet. Die Werte weisen aber trotzdem auf eine fortbestehende latente Schädigung der Fichte. Da keine so extremen Starkregen wie 1995 auftraten,

© Verein zum Schutz der Bergwelt e.V. download unter www.vzsb.de/publikationen

konnten die Magnesiumspiegelwerte wieder leicht ansteigen. Es ist aber eine Einwehung von Dünger nicht auszuschließen, denn es fand eine Düngung von in der Nähe gelegenen Beständen vom Hubschrauber aus statt. In der Vegetationsperiode 1997 war ein weiterer Rückgang der Schwefeldioxidimmissionen zu verzeichnen. Besonders auffällig ist die Fähigkeit zur Vitalisierung der zu Untersuchungsbeginn am stärksten geschädigten Fichte.

Ausblick:

Hauptursache für die massiven Schäden an den Beständen waren die hohen Schwefeldioxidimmissionen, die ihre Ursache in der sächsischen und böhmischen Industrie hatten. Die Böden sind in der Folge tiefgründig versauert. Auch wenn diese Ursache inzwischen nahezu nicht mehr wirksam ist, wird es Jahrzehnte dauern, bis sich die Böden erholt haben. Das gilt unabhängig von den Kalkdüngungen durch die Forstwirtschaft. Verstärkt wurden diese Schadwirkungen durch die natürliche Nährstoffarmut dieser Standorte, das rauhe Klima und sich in den geschwächten Beständen rasant ausbreitende biotische Schädlinge (Borkenkäfer). Gegenwärtig ist das Totholz weitgehend geräumt und die Mehrzahl der Flächen neu aufgeforstet. Auf Brachen gedeihen durch natürliche Verbreitung Birke, Eberesche und Weide. Eine natürliche Ausbreitung von Waldpflanzen wird aber durch Reitgrasarten massiv unterdrückt. Diese Gräser gedeihen auf armen Standorten, tolerieren Säureeinflüsse und sind sehr beständig gegenüber Witterungsextremen. Da sie dichte, filzige Rasen bilden, verhindern sie die Keimung von Waldpflanzen, ja sie können sogar Pflanzungen unterdrücken.

Geschädigte, aber nicht abgestorbene Fichtenbestände konnten sich in erstaunlichem Umfang revitalisieren. Gegenwärtig strebt die Forstwirtschaft den Aufbau gemischter Forsten mit Fichte, Buche, Kiefer und verschiedenen Weichhölzern an. Strukturreiche Mischbestände sind gegenüber Schadwirkungen deutlich widerstandsfähiger als gleichaltrige (einschichtige) Fichtenmonokulturen, wie sie in der Vergangenheit angelegt wurden.

Der Zustand der Erzgebirgswälder stabilisiert sich gegenwärtig auf relativ hohem Schadniveau. Eine Entwarnung kann trotz der stark gesunkenen Sulfatschwefeleinträge nicht gegeben werden. Stickoxideinträge sowie Ozonbelastungen weisen keine sinkende Tendenz auf. Die Folgen einer tiefgründigen Bodenversauerung und eine weitere Auswaschung von Nährstoffen aus Böden und Forstpflanzen („neuartigen Waldschäden") stellen die Forstwirtschaft vor neue Herausforderungen, auch wenn die sichtbaren Schäden der Forstpflanzen erfreulicherweise langsam zurückgehen. Die gravierenden Schäden der 80er und 90er Jahre waren eine massive Warnung, was unkontrollierte Industrialisierung (keine Rauchgasreinigung!) weitab vom Standort der Kraftwerke für massive Schäden auslösen kann. Die Verantwortung der Unternehmen darf nicht am Werkszaun enden. Neue Schäden, insbesondere an Rot-Buchen, zeichnen sich gegenwärtig durch bodennahes Ozon und Stickoxidemissionen ab. Diese sind aber bisher in ihrer Intensität keinesfalls mit den Schäden, die durch Schwefeldioxid und sauren Regen an den Erzgebirgswäldern verursacht wurden, zu vergleichen. Die Ursache ist zuallererst in den gegenüber den 70er und 80er Jahren deutlich strengeren gesetzlichen Bestimmungen zum Schutz von Natur und Umwelt (Bundesnaturschutzgesetz, Wasserhaushaltsgesetz, Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz, Bundesimmissionsschutzgesetz und die entsprechen-

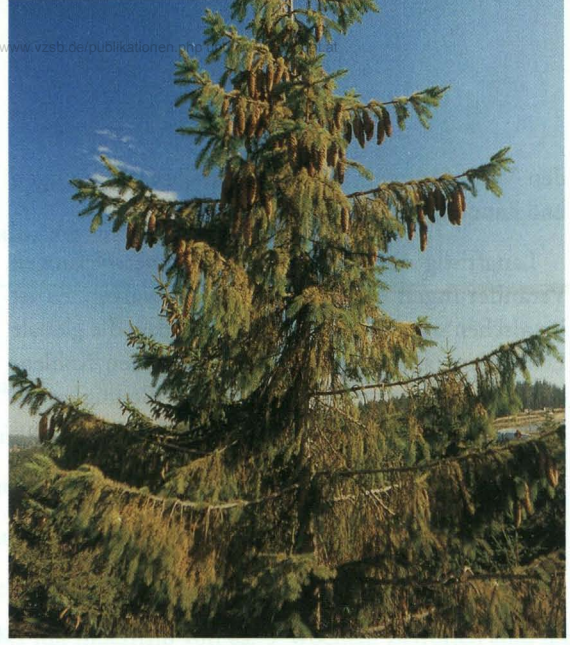

Abb. 9: Stark geschädigte Fichte durch vorangegangene Schwefeldioxidbelastung (SO2-Ca-Typ, klassischer Kraftwerkstyp) in Kombination mit Einfluss von Stickoxiden und Ozon. Sehr starke Magnesiummangelvergilbung infolge starker Auswaschung (leaching) von Nährstoffen aus den Nadeln durch den sauren Regen in Kombination mit armen Standort und „Neuartigen Schädigungen" durch Stickoxide und Ozon. Aufgenommen im Oktober 1994.

© Verein zum Schutz der Bergwelt e.V. download unter www.vzsb.de/publikationen.php und www.zobodat.at

den Verordnungen, Durchführungsbestimmungen und Landesgesetze) zu sehen.

Langfristig werden auch durch Klimaänderungen Veränderungen der Waldstruktur erwartet. Es ist inzwischen wissenschaftlich erwiesen, dass die globale Erwärmung auch durch die anthropogenen Kohlendioxidemissionen verursacht und beschleunigt wird. Insbesondere im Osten und Süden der Bundesrepublik (Brandenburg, Sachsen, Bayern) rechnen Klimatologen mit vermehrten Witterungsextremen wie Trocknisereignissen, insbesondere während der Vegetationsperiode und der Möglichkeit von extremen Starkniederschlägen während des ganzen Jahres. So werden insbesondere in diesen Regionen die Rot-Buchen – Fichten – Tannenwälder kolliner bis submontaner Lagen durch die besser Witterungsextreme und Trockenheit ertragenden Hainbuchen – Kiefern – Eichenwaldgesellschaften ersetzt werden. Nur wird die Klimaänderung aller Voraussicht nach schneller erfolgen, als die Lebensdauer einer Waldgeneration andauert. Die Pflanzen werden also mit dem Klimawandel nicht schritthalten können.

Anlage 1:

Parameterübersicht zum Verhalten von Fichte unter Ozoneinwirkung (photooxidative / neuartige Waldschäden) bei untergeordnetem Einfluß von NOx und SO2

Parameter	geschädigt	gesund
Gesamtchlorophyll	bis 3,5 mg/gTM	2,5 - 7 mg/gTM
Chlorophyll a	0,15 - 1,5 mg/gTM	1,5 - 4,5 mg/gTM
Chlorophyll b	0,3 - 0,6 mg/gTM	0,5 - 0,8 mg/gTM
Carotinoide (x + c)	0,3 - 0,6 mg/gTM	0,5 - 0,8 mg/gTM
Chl. a / Chl. b	3 - 4	2,5 - 3,5
Chl. ges./Carotinoide	2 - 4,5	4 - 6
RGC 3./2. Ndj.	kleiner 1	größer 1
PEPC	50 - 150 µmol/h . gTM	20 - 90 µmol/h . gTM
CAD	0,6 - 0,8 mkat/kg Protein	0,2 - 0,6 mkat/kg Protein
Putrescin	bis 3400 nmol/gTM	100 - 500 nmol/gTM
Protein	40 - 100 mg/gTM	10 - 50 mg/gTM
Ascorbat	5 - 8 mg/gTM	2 - 3 mg/gTM
ACC	4 - 15 nmol/gFM	0,3 - 5 nmol/gFM
Prolin	bis 20 µmol/gTM	bis 1 µmol/gTM
Bruttophotosynthese (Sommer)	4 - 6 µmol CO_2/m^2s	7 - 10 µmol CO_2/m^2s
Bruttophotosynthese (Winter)	0,5 - 0,8 µmol CO_2/m^2s	1 - 3 µmol CO_2/m^2s
Respiration (Sommer)	0,8 - 1 µmol CO_2/m^2s	0,8 - 1,5 µmol CO_2/m^2s
Respiration (Winter)	0,5 - 0,6 µmol CO_2/m^2s	0,7 - 0,9 µmol CO_2/m^2s
Transpiration	0,6 - 1 mmol H_2O/m^2s	1 - 1,5 mmol H_2O/m^2s
stomat. Leitfähigkeit f. H2O	15 - 40 mmol H_2O/m^2s	40 - 60 mmol H_2O/m^2s

Ascorbat ist bei gesunder Fichte in Sonnennadeln auf 3 - 6 mg/gTM erhöht.
Schwefeldioxid allein erniedrigt Putrescin auf 20 - 100 pmol/µg Protein.
PEPC (Phosphoenolpyruvat-Carboxylase): beim Absterbeprozeß Zusammenbruch der Aktivität.
Prolin: reagiert besonders auf Trockenstress mit Anstieg
ACC: 1-Aminocyclopropan-1-carbonsäure
CAD: Zimtalkoholdehydrogenase
Chl: Chlorophyll

(SIEFERMANN-HARMS 1998, 1990; SLOVIK et. al. 1992, 1993, 1995, 1996; eigene Arbeiten)

© Verein zum Schutz der Bergwelt e.V. download unter www.vzsb.de/publikationen.php und www.zobodat.at

Anlage 2:

Typische Schadbilder an Fichte

1. Photooxidative Vergilbung (Ozon):

Vorfrühling:	grüne Benadelung
März - Juni:	Frühjahrsergrünung (keine Vergilbungserscheinungen beobachtbar)
Beginn der Schädigung:	Anfang Mai (latente Schäden)
Hauptphase der Schädigung:	Mai - Juli (sichtbare Vergilbung)
Abschluss:	Juli - September

Eine schnelle Vergilbung erfolgt im Zeitraum Mai bis Juli innerhalb von ca. 5 Wochen. Betroffen sind die Nadeljahrgänge ab dem 2. Nadeljahrgang, insbesondere die mittleren Nadeljahrgänge. Der Neuaustrieb ist nicht betroffen. Die Nadeloberseite ist stärker vergilbt als die Nadelunterseite. Der Ablauf kann witterungsbedingt zeitlich verschoben sein.

2. Mg - Mangelvergilbung:

Diese Vergilbung erfolgt schleichend über das ganze Jahr, an den ältesten, am weitesten innen sitzenden Nadeljahrgängen beginnend, im Extremfall ist auch der Neuaustrieb betroffen. Die Vergilbung ist nicht lichtabhängig. Häufig sind zum Ausgang des Winters (Februar bis April) deutlich ausgeprägte Vergilbungen sichtbar. Auslösend und verstärkend wirken Nährstoffauswaschungen im Boden und auch in den Nadeln selbst durch die sauren Stoffeinträge (saurer Regen und saurer Nebel). Arme und ziemlich arme Standorte sind am stärksten betroffen und können auch ohne Schadstoffeinträge dieses Schadbild auslösen.

3. Schädigung durch den Einfluss von Schwefeldioxid und saurem Niederschlag:

Braune Nekrosen der Nadeln sowie Verbräunung von den ältesten, also am weitesten innen sitzenden Nadeljahrgängen beginnend und nach den jüngeren, weiter außen sitzenden Nadeljahrgängen fortschreitend. Derartig geschädigte Fichten sind stark verlichtet und weisen nur die jüngeren Nadeljahrgänge auf. Im fortgeschrittenem Stadium stirbt die Krone ab und im Bereich des oberen Drittels der ehemals grünen Krone sind nur noch Nadelbüschel der beiden jüngsten Nadeljahrgänge zu sehen.

4. Frosttrocknisschäden:

Derartige Schäden treten meist gegen Ende des Winters auf. Bei klarem Wetter mit positiven Tagestemperaturen und intensiver Sonnenstrahlung beginnt der Stoffwechsel der Fichten. Dabei geben die Nadeln Wasserdampf an die Atmosphäre ab. Aus dem gefrorenem, schneebedeckten Boden können die Wurzeln kein Wasser in die Nadeln fördern. In der Folge vertrocknen die jüngsten, am weitesten aussen sitzenden Nadeljahrgänge. Ihre Farbe wird zunächst graugrün, einige Zeit später leuchtend rotbraun.

© Verein zum Schutz der Bergwelt e.V. download unter www.vzsb.de/publikationen.php und www.zobodat.at

Schrifttum:

a) Bücher:

BITTLINGMAIER, L., REINHARDT, W., SIEFER-MANN-HARMS, D. (1995) (Hrsg.): „Waldschäden im Schwarzwald - Ergebnisse einer interdisziplinären Freilandstudie zur montanen Vergilbung am Standort Freudenstadt/Schöllkopf". (ecomed), Landsberg.

GEHRIG, R. et. al. (1991): Höhenabhängigkeit von Schadstoffimmissionen. Meteorologie und Luftchemie in Waldbeständen Bd. 4 (1991) 175 – 183; (Verlag der Fachvereine) Zürich.

GUDERIAN, R. (1985): Ecological Studies 52, Air pollution by photochemical oxidants. (Springer) Berlin Heidelberg New York Tokyo.

HEINRICH et. al. (1990): Atlas zur Ökologie. München.

VOGEL, G. et. al. (1979): Taschenbuch der Biologie, Band I, (G. Fischer) Jena.

b) Zeitschriftenbeiträge:

BEER, V. (1995): Pigmentgehalt an Fichten unterschiedlichen Schädigungsgrades im Osterzgebirge. AFZ 50 (15), 804 – 806.

BEER, V. (1997): Pigmentgehalt an Fichten unterschiedlichen Schädigungsgrades. Vergleich der Vegetationsperioden 1994 und 1995 an Standort Oberbärenburg. AFZ/Der Wald, 1, 35 – 36.

BEER, V., ZIMMERMANN, F., GOLDBERG, V. (1997): Zusammenhang von besonderer Witterungssituation und Stoffeinträgen durch Nebel im oberen Erzgebirge im Winter 1996/97. Sächsische Schweiz Initiative 1997. 14: 10 – 16.

GERLACH, C. (1922): Ein Beitrag zur Rauchschadensfrage. Forstliche Wochenschrift Silva, Tübingen (1922): 61.

GERLACH, R. (1922): Naturverjüngung und Rauchschäden. Forstliche Wochenschrift Silva, Tübingen (1922): 161 – 164.

HORSCH, F. et al. (1995) (Hrsg.): „11. Statuskolloquium des PEF vom 14. bis 16. März 1995 im Forschungszentrum Karlsruhe" FZKA-PEF 130, Karlsruhe, 1995 (Bereich 1A: „Erfassung und Analyse der Einwirkungen von Luftschadstoffen auf Waldökosysteme, Abgrenzung gegenüber anderen möglichen Ursachen für die neueren Waldschäden").

HOUGH, A. M. et. al. (1987): Computer modelling studies of the distribution of photochem. ozone production between different hydrocarbons. Atmos. Environ. 21: 2015 – 2033.

KRAUSE et. al. (1986): Zur Wirkung von Ozon und saurem Nebel auf phän. und phys. Parameter an Nadel- u. Laubgehölzen im komb. Begasungsexp. Spez. Ber. d. KFA Jülich 369: 208ff.

LANGEBARTELS, C. et. al. (1991): Biochemical plant responses to ozone. Plant. Physiol. 95: 882 – 889.

LICHTETHALER, K. (1987): Chlorophylls and Carotinoides: Pigments of Photosynthetic Biomembrans. Methods in Enzymology 148: 351 – 382.

LIEBOLD, E. (1991): Schadenszustand und -entwicklung in den SO2-geschädigten Fichtengebieten Sachsens. AFZ 10: 492 – 494.

MACHER, M. et. al. (1988): Photooxidantien und Wirkungen auf niedere und höhere Pflanzen. GSF - Bericht 17/88: 371 – 381; 11. - 15. 4. 1988 Garmisch – Partenkirchen.

Ökologische Waldzustandskontrolle - Richtlinien zum Basisnetz. VEB Forstprojektierung Potsdam 1987.

RENNENBERG, H. et. al. (1988): Wirkung von Photooxidantien auf Pflanzen. GSF - Bericht 17/88: 360 – 370, 11. - 15. 4. 1988 Garmisch – Partenkirchen.

RENNENBERG, H. et. al. (1990): Emission of volatile sulphur compounds from spruce trees. Plant. Physiol. 92: 560 – 564.

SCHMIEDEN, U., WILD, A. (1995): „The contribution of Ozone to forest decline", Physiol. Plant. 94: 371-378.

© Verein zum Schutz der Bergwelt e.V. download unter www.vzsb.de/publikationen.php und www.zobodat.at

SCHNITTENHELM, J. et. al. (1993): Das antioxidative System der Fichte. Forstw. Cbl. 112: 240 – 250.

SCHRIFTREIHE des Bundesministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten. Reihe A „Angewandte Wissenschaft" Heft 427.

Waldzustandsbericht der Bundesregierung 1993. Landwirtschaftsverlag GmbH Münster S. 80 – 81.

SIEFERMANN - HARMS, D. (1989): Physiologische und biochemische Untersuchungen zur Montanen Vergilbung von Fichten - Teil II: Erste Ergebnisse vom PEF Forschungsschwerpunkt Freudenstadt. 5. Statuskolloquium des PEF vom 7. - 9. März 1989 im Kernforschungszentrum Karlsruhe. KfK - PEF 50, April 1989 (1): 293 – 303.

SIEFERMANN - HARMS, D., Lisiecki, K., Steegeborn, J. (1990): Vergilbung geschädigter Fichten - Was geschieht im Photosyntheseapparat? KFK - Nachr. 22 (1): 33 – 38.

SLOVIK, S. et al. (1992): Quantifizierung der physiologischen Kausalkette von SO2-Immissionsschäden (I). Ableitung von SO2-Immissionsgrenzwerten für akute Schäden an Fichte. AFZ 15: 800-805.

SLOVIK, S. et al. (1992): Quantifizierung der physiologischen Kausalkette von SO2-Immissionsschäden (II). Ableitung von SO2-Immissionsgrenzwerten für chronische Schäden an Fichte. AFZ 17: 913-920.

SLOVIK, S. et al. (1995): Stomatal SO2-Uptake and sulfate accumulation in needles of Norway spruce stands (Picea abies) in Central Europe. Plant and Soil 168-169: 405-419.

SLOVIK, S. et. al. (1993): Analysis and quantification of long-term effects of SO2 immission on spruce forests. Inst. f. Biowissenschaften d. Uni. Würzburg.

SLOVIK, S. et al. (1996): Wirkungen hoher SO2 - Konzentrationen auf Fichte, Stechfichte, Waldkiefer und Latsche. AFZ/Der Wald 10/1996: 570-572.

STÖCKHARDT, J. A. (1871): Untersuchg. über die schädliche Einwirkung des Hütten- und Steinkohlenrauches auf das Wachstum der Pflanzen, insbesondere Fichte und Tanne. Thar. Forstl. Jahrb. Bd. 21: 218 – 254.

STÖCKHARDT, J. A. (1850): Über einige durch den Bergbau und Hüttenbetrieb für die Landeskultur entstehende Benachteiligungen. Z. f. deutsche Landwirte NF 1: 35 – 38; 129 – 137.

UMWELTBUNDESAMT (1995): „Reviewkonferenz vom 25. -27. September in Berlin / Auswertung der Waldschadensforschungsergebnisse (1982-1992) zur Aufklärung komplexer Ursache-Wirkungsbeziehungen mit Hilfe systemanalytischer Methoden" (Vorläufige Ergebnisberichte des Fachgebietes 2.2 „Forstpflanzenphysiologie" (SCHMIEDEN, U., WILD, A.) und des Fachgebietes 2.3. „Synökologische Bioindikation" (SCHWEIZER, B., ARNDT, U.), UBA, Berlin.

WALDSCHADENSBERICHT 1995. Freistaat Sachsen. Sächsisches Staatsministerium für Landwirtschaft, Ernährung und Forsten, Referat Presse und Öffentlichkeitsarbeit, Dresden, S. 6.

WALDSCHADENSBERICHT 1996. Freistaat Sachsen. Sächsisches Staatsministerium für Landwirtschaft, Ernährung und Forsten; Referat Presse und Öffentlichkeitsarbeit, Dresden.

WALDSCHADENSBERICHT 1997. Freistaat Sachsen. Sächsisches Staatsministerium für Landwirtschaft, Ernährung und Forsten, Referat Presse und Öffentlichkeitsarbeit, Dresden.

WALDZUSTANDSBERICHT DER BUNDESREGIERUNG 1995. Herausgeber: Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten, Referat 615, Bonn, S. 2, 13, 30.

WENTZEL, K.F. (1987): Waldschäden - was ist wirklich neu? GSF Mensch und Umwelt, Patient Wald, München, Sept.: S. 23.

WIENHAUS, O. (1997): Untersuchungen zur Belastung durch Fluorverbindungen und Schwermetalle über den Grenzgebirgen Sachsens. Tharandt, Forschungsbericht.

© Verein zum Schutz der Bergwelt e.V. download unter www.vzsb.de/publikationen.php und www.zobodat.at

WIESER et. al. (1991): Ozonefumigation in the sun crown of norway spruce. Expertentagung Waldschadensforschung im östlichen Mitteleuropa und in Bayern. 13. bis 15. 11. 1990 in Schloß Neuburg/Inn bei Passau. GSF - Bericht 24/91 567ff. Herausgeber: Projektgruppe Bayern zur Erforschung der Wirkung von Umweltschadstoffen.

WILD, A. et. al. (1990): Untersuchungen der Thylakoidmembran und der PEPC bei Fichten in Open - Top – Kammern. 6. Statuskolloquium des PEF. KfK PEF 61 Bd. 1: 231. Herausgeber: Projekt Europäisches Forschungszentrum für Maßnahmen zur Luftreinhaltung im Kernforschungszentrum Karlsruhe.

WILD, A., SCHMITT, V. (1995): „Diagnosis of damage to Norway spruce (Picea abies) through biochemical criteria", Physiol. Plant. 93: 375-382.

WILLENBRINK, J. et. al. (1993): CO2 - Fixierung und Assimilatverteilung in Fichten unter Langzeitbegasung mit Ozon. Forstw. Cbl. 112: 50 – 56.

WISLICENUS, H. (1898): Nachweis der schwefligen Säure in der Waldluft des Tharandter Waldes. Thar. Forstl. Jahrb. Bd. 48: 173ff.

ZIMMERMANN, F., BÄUCKER, E., BEER, V., BERNHOFER, CH., GOLDBERG, V., LUX, H., REUTER, F., WIENHAUS, O. (1997): Winterschäden 1995/96 in den Kamm- und Hochlagen des Erzgebirges; Vergleich der Vegetationsperioden 1995 und 1996 am Standort Oberbärenburg. AFZ/der Wald, 11: 579 – 582.

Anschrift des Autors:
Dr. Volker Beer
Georg-Schumann-Str. 281
D – 04159 Leipzig

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: Jahrbuch des Vereins zum Schutz der Bergwelt

Jahr/Year: 2002

Band/Volume: 67_2002

Autor(en)/Author(s): Beer Volker

Artikel/Article: "Waldsterben" im Osterzgebirge Untersuchungen an Fischten auf einer Waldmessstation 139-158