

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Waldökosysteme	3
2.1	Struktur und Funktion von Wald- ökosystemen	3
2.2	Störung von Waldökosystemen durch natürliche Umweltfaktoren	5
2.2.1	Dynamik und Erneuerung von Waldökosystemen	6
2.2.1.1	Struktur und Entwick- lung von Urwäldern	6
2.2.1.2	Struktur und Verjüngung von Wirtschaftswäldern	8
2.3	Belastung von Waldökosystemen durch anthropogene Umweltfaktoren	9
2.3.1	Verletzlichkeit von Waldöko- systemen	10
2.3.2	Ökosystemarer Charakter der Schädigung von Wäldern: das Lehrbeispiel Erzgebirge	12
2.3.3	Zeitliche Dimension der Schädigung von Waldökosys- temen durch Immissionen	17
3	Chronologie des Waldzustands	19
3.1	Nutzungsgeschichte des Waldes	19
3.1.1	Eingriffe in den Wald durch Rodung und Nutzung	19
3.1.1.1	Waldnutzung zugunsten der Landwirtschaft	20
3.1.1.2	Nutzung des Waldes für die Jagd	21
3.1.1.3	Holzgewinnung im Wald	22
3.1.1.4	Nachhaltige Forstwirt- schaft	22
3.1.2	Wandel von Waldökosystemen durch Nutzungseingriffe	24
3.1.2.1	Veränderung der Baumartenanteile	24

Zeichnis

3.1.2.2	Einwirkung der Waldnutzung auf die Böden	27
3.2	Geschichte des Einflusses von Luftschadstoffen auf Wälder	31
3.2.1	Ausbreitung und Erforschung der Rauchsäden (1849 bis 1914)	31
3.2.1.1	Die führende Rolle der Sächsischen Forst- akademie Tharandt	33
3.2.1.2	Ein Musterprozess um Rauchsäden im Wald	34
3.2.1.3	Starke Ausweitung der Rauchsadens- forschung	35
3.2.1.4	Stand der Kenntnisse über Rauchsäden bei Beginn des ersten Welt- kriegs	36
3.2.2	„Die Zeit der öffentlichen Lethargie und des beschleunigten Tannensterbens (1914 bis 1959)“ (nach Rubner 1983)	37
3.2.3	Wachsendes Umweltbewusstsein und verfehlte Konsequenzen (1959 bis 1981)	39
3.2.4	Öffentliche Diskussion um Waldsterben bzw. neuartige Waldschäden (seit 1981)	42
3.3	Waldzustandserhebung	44
3.3.1	Symptome einer Erkrankung bzw. Schädigung von Wald- bäumen	44
3.3.2	Durchführung der Wald- zustandserhebung	45
3.3.3	Kritik der Waldzustands- erhebung	47
3.3.4	Ergebnisse der Waldzustands- erhebung	51

3.4	Erkenntnisse aus Zuwachsmessungen und dendrochronologischen Untersuchungen	54
3.4.1	Zuwachsanstieg von Wäldern in weiten Teilen Europas	54
3.4.2	Bedeutung von Jahrringuntersuchungen	55
3.4.3	Entwicklung der Jahrringbreiten	56
3.4.4	Abrupte Zuwachsreduktionen	58
3.4.5	Jahrringausfälle	58
3.4.6	Darstellung der Ergebnisse	59
4	Anthropogene Umweltveränderungen	61
4.1	Ökotoxikologische Grundlagen	61
4.2	Chemische Umweltfaktoren	65
4.2.1	Gase der Atmosphäre	65
4.2.2	Emissionen	68
4.2.2.1	Schwefeldioxid	68
4.2.2.2	Stickstoffoxide	70
4.2.2.3	Lachgas	72
4.2.2.4	Ammoniak	72
4.2.2.5	Ozon und andere Photooxidantien	73
4.2.2.6	Methan	80
4.2.2.7	Emissionen flüchtiger organischer Verbindungen	81
4.2.3	Transport von Gasen zum Wirkort	82
4.2.4	Reaktivität: Schadwirkung versus Entgiftung	84
4.2.5	„Saurer Regen“	84
4.2.6	Aerosole und Schwermetalle	87
4.2.6.1	Quellen, Transport und Deposition von Aerosolen	87
4.2.6.2	Entwicklung der Schwermetallemissionen	88
4.2.7	Stoffdepositionen und -verteilung	91
4.3	Physikalische Umweltfaktoren	94
4.3.1	Sonnenstrahlung	94
4.3.2	Das natürliche Treibhaus	97
4.3.3	Der anthropogene Treibhauseffekt	97
4.3.4	Ozonloch und UV-Strahlung	102

5	Effekte von Umweltveränderungen auf den Zustand von Waldökosystemen: Wirkungs- und Schutzmechanismen . . .	107
5.1	Immission von Spurengasen	107
5.1.1	Schwefeldioxid	107
5.1.1.1	Aufnahme von SO ₂ durch Fichtennadeln . .	108
5.1.1.2	Toxizität von SO ₂ und seiner Folgeprodukte . .	110
5.1.1.3	Metabolische Entgiftung von SO ₂ und von schwefliger Säure	112
5.1.1.4	Beeinflussung der Kationenernährung durch SO ₂	115
5.1.1.5	Nadel- oder Blattwurf als Folge einer SO ₂ -Belastung	118
5.1.1.6	Unterschiedliche Mechanismen der Schädigung bei akuter und chronischer Belastung mit SO ₂ und unterschiedliche Toleranz verschiedener Baumarten	118
5.1.1.7	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen . . .	118
5.1.2	Immissionen oxidierten und reduzierten Stickstoffs	119
5.1.2.1	Stickstoffdioxid, NO ₂ . .	119
5.1.2.2	Ammoniak	124
5.1.2.3	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen . . .	125
5.1.3	Ozon	125
5.1.3.1	Toxizität von Ozon . . .	129
5.1.3.2	Entgiftung von Ozon . .	131
5.1.3.3	Lassen sich Belastungsgrenzen durch Ozon definieren?	134
5.1.3.4	Genaktivierung unter oxidativem Stress	136
5.1.3.5	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen . . .	136
5.1.4	Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Luftschadstoffen	137

5.2	Wirkungen von Säureeinträgen	137
5.2.1	Direkte Schädigung von Blättern und Nadeln	138
5.2.2	Säurewirkungen in Böden	138
5.2.2.1	Pufferreaktionen im Boden	139
5.2.2.2	Bodeninterne Versauerung	146
5.2.2.3	Aluminiumwirkungen .	149
5.2.2.4	Mangantoxizität	152
5.3	Nährstoffeinträge	153
5.3.1	Steigende atmosphärische CO ₂ -Konzentrationen	153
5.3.1.1	Einfluss erhöhter CO ₂ -Konzentrationen auf den Primärstoffwechsel und auf Stress- toleranzmechanismen .	155
5.3.1.2	Pflanzeninterne Kohlenstoffverteilung unter erhöhten CO ₂ -Konzentrationen in Beziehung zu symbiontischen Interaktionen	156
5.3.1.3	Einfluss erhöhter CO ₂ -Konzentrationen auf den Stickstoffhaushalt .	159
5.3.1.4	Wachstum unter erhöhten CO ₂ -Konzentrationen	160
5.3.2	Stickstoffwirkungen	161
5.3.2.1	Stickstoff in Waldökosystemen	161
5.3.2.2	Stickstoffausträge	164
5.3.3	Schwefelwirkungen	165
5.3.4	Sonstige Nährstoffe: austauschbare M _b -Kationen und Vorräte im Auflagehumus	165
5.4	Schwermetalle	167
5.5	Wirkung der UV-Strahlung auf Bäume	170
5.5.1	Wirkung auf Biomoleküle	170
5.5.2	Wechselwirkung mit Licht und Abschirmung	170
5.5.3	Wirkung auf Photosynthese und Biomasse	172
5.5.4	Reparatursysteme	172

5.5.5 UV-B-Wirkung auf Ökosysteme	173
--	-----

6 Lassen sich die Veränderungen der Waldgesundheit kausal durch Umwelt- veränderungen erklären?	175
---	-----

6.1 Reaktionen einzelner Baumarten in Waldökosystemen	175
--	-----

6.1.1 Weißtanne (<i>Abies alba</i> Mill.) . .	175
--	-----

6.1.1.1 Tannensterben: Symptome und Aus- breitung	176
---	-----

6.1.1.2 Schwefeldioxid als zentrale Ursache von Tannenschädigung und Tannensterben	179
---	-----

6.1.1.3 Jahrringbau der Tanne und Belastung durch Schwefeldioxid	181
--	-----

6.1.1.4 Mitwirkung von Frost- ereignissen	197
--	-----

6.1.1.5 Bedeutung von Dürre- perioden und Wurzel- erkrankungen	198
--	-----

6.1.1.6 Ernährungszustand von Tannen	200
---	-----

6.1.1.7 Weitere als Ursachen diskutierte Faktoren . .	201
--	-----

6.1.1.8 Komplexes Zusammen- wirken von Teilursa- chen	202
---	-----

6.1.1.9 Offene Fragen	205
---------------------------------	-----

6.1.2 Fichte (<i>Picea abies</i> Karst.)	205
---	-----

6.1.2.1 Erkrankungssymptome an der Baumkrone sowie deren räumliches und zeitliches Auftreten . . .	205
---	-----

6.1.2.2 Aussagen zum zeitlichen Ablauf nach Zuwachs- messungen und dendro- chronologischen Befunden	212
---	-----

6.1.2.3 Schädigende Wirkungen von Gasen und saurem Nebel	217
--	-----

6.1.2.4 Bedeutung von Patho- genen und Parasiten an Trieben und Nadeln . .	223
--	-----

6.1.2.5	Wirkungen von Eigenschaften und Veränderungen der Böden auf die Ernährung der Fichte	224
6.1.2.6	Wurzelentwicklung und Mitwirkung von Lebewesen in der Rhizosphäre	230
6.1.2.7	Mitwirkung der Witterung	234
6.1.2.8	Komplexes Zusammenwirken von Teilursachen	237
6.1.2.9	Offene Fragen	239
6.1.3	Rotbuche (<i>Fagus sylvatica</i> L.) .	239
6.1.3.1	Symptome an der Baumkrone sowie deren Verbreitung und zeitliche Entwicklung	240
6.1.3.2	Chronologie von Vitalitätsverlusten nach Zuwachsmessungen und dendrochronologischen Befunden	246
6.1.3.3	Bedeutung von Parasiten und Pathogenen an Stamm und Krone	250
6.1.3.4	Schädigende Wirkungen von Gasen und saurem Nebel	251
6.1.3.5	Wirkungen von Eigenschaften und Veränderungen der Böden auf die Ernährung der Buche	255
6.1.3.6	Wurzelentwicklung und Mitwirkung von Lebewesen in der Rhizosphäre	259
6.1.3.7	Mitwirkung der Witterung	262
6.1.3.8	Komplexes Zusammenwirken von Teilursachen	265
6.1.3.9	Offene Fragen	267

6.1.4 Stieleiche (<i>Quercus robur</i> L.) und Traubeneiche (<i>Quercus petraea</i> (Matt.) Liebl.)	268
---	-----

6.1.4.1 Symptome an Krone und Stamm sowie Verbreitung und zeitlicher Ablauf derzeitiger Eichenerkrankungen . .	268
--	-----

6.1.4.2 Chronologie von Erkrankungen nach Zuwachsmessungen und dendrochronologischen Befunden	275
---	-----

6.1.4.3 Mitwirkung von Pathogenen an Wurzeln, Stamm und Krone . . .	277
---	-----

6.1.4.4 Nährstoffversorgung sowie Eigenschaften und Veränderungen der Böden	283
---	-----

6.1.4.5 Mitwirkung von Wasserhaushalt, Witterungsextremen und Veränderungen des Klimas . . .	284
--	-----

6.1.4.6 Wirkungen gasförmiger Schadstoffe	289
---	-----

6.1.4.7 Mitwirkung von blattfressenden und rindenbrütenden Insekten . . .	290
---	-----

6.1.4.8 „Eichensterben“ in früherer Zeit	294
--	-----

6.1.4.9 Komplexes Zusammenwirken von Teilursachen und offene Fragen	296
---	-----

6.2 Veränderungen der Bodenvegetation von Waldökosystemen	299
---	-----

6.2.1 Dichte des Kronendachs	299
--	-----

6.2.2 Deposition von Fremdstoffen .	300
-------------------------------------	-----

6.3 Veränderungen der Vegetation epiphytischer Flechten in Waldökosystemen	301
--	-----

6.3.1 Experimentelle Befunde zur Bioindikation anhand von Flechten	302
--	-----

6.3.2 Vergleiche zwischen Immissionsbelastung und Flechtenvegetation	303
--	-----

6.3.3	Passives und aktives Monitoring anhand von Flechten	303
6.4	Beispiele für Veränderungen der Tierwelt von Waldökosystemen	305
6.4.1	Vorkommen von Arthropoden am Stammfuß von Buchen . . .	305
6.4.2	Schädigung der Fichtenwälder in Hochlagen des Westergebirges und Populationsentwicklung der Tannenmeise (<i>Parus ater</i>)	305
6.4.3	Bodenversauerung und Populationsentwicklung der Kohlmeise (<i>Parus major</i>)	306
6.5	Wechselwirkungen zwischen Böden, Baumwurzeln und Bodenlebewesen .	307
6.5.1	Das Problem der Wirkung von Aluminiumionen	307
6.5.2	Lebewesen in der Rhizosphäre	309
6.5.2.1	Mykorrhiza	309
6.5.2.2	Wurzelpathogene	312
6.5.2.3	Schädigende Mikroorganismen	313
6.5.3	Verwundbarkeit des Wurzelbereichs	314
6.6	Bedeutung einzelner Faktoren	314
6.6.1	Waldnutzung	314
6.6.2	Immissionen	315
6.6.3	Klima- und Witterungseffekte .	316
6.6.4	Biotische Faktoren	318
6.7	Zusammenwirken einzelner Faktoren bei der Schädigung von Waldökosystemen	318
6.7.1	Begriffliche Erfassung komplexer Schädigungsprozesse . . .	318
6.7.2	Welche Rolle spielen anthropogene Umweltveränderungen, insbesondere Luftschadstoffe?	320

7 Belastbarkeit von Waldökosystemen . . .	323
7.1 Grenzwerte für Spurengase (<i>Critical Levels</i>)	325
7.1.1 Schwefeldioxid	325
7.1.2 Stickstoffoxide	325
7.1.3 Ozon	326
7.2 Grenzwerte für Depositionen (<i>Critical Loads</i>)	328
7.2.1 <i>Critical Loads</i> für Säure und eutrophierenden Stickstoff . . .	329
7.2.2 Empirische <i>Critical Loads</i> für eutrophierenden Stickstoff . . .	334
7.2.3 <i>Critical Loads</i> für Schwer- metalle	335
8 Schutzmaßnahmen, abgeleitet aus den kausalanalytischen Erkenntnissen	339
8.1 Reduktion anthropogener Emissionen	339
8.2 Waldbau und Waldnutzung	340
8.3 Düngung und Kalkung	341
8.3.1 Kalklöslichkeit	342
8.3.2 Kompensations- oder Schutz- kalkungen	343
8.3.2.1 Wirkungen	344
8.3.2.2 Risiken von Kalkungs- maßnahmen	348
8.3.3 Düngung	350
8.4 Fazit	352
9 Ausblick	353
Literaturverzeichnis	355
Index	415