Verhandlungen der Gesellschaft für Ökologie, Band 23, 1994

Messung und Modellierung der Veränderungen und Risiken für Schutzwälder als Folge anthropogener Einflüsse

Werner Nater und Werner Graber

Synopsis
Since the mid-1980's, the "new type of forest decline" has spread increasingly throughout Central Europe, including the St. Gotthard area. An interruption of the railroad and highway traffic due to avalanches, falling rock and landslides would have a devastating effect on the European domestic market. Under these ecological and economical considerations, the Paul Scherrer Institute (Air Pollution Section) and the Institute for Applied Plant Biology were commissioned to evaluate the risk that the ecosystems of these protection forests collapse.
To this end, selected sections of forest were intensively investigated in a cross section to the above mentioned transit axis. The area of investigations is northward of the Alpine ridge in the Reuss valley at 4 different elevation levels, from the valley floor (500 m.a.s.l.) to the timber line (1800 m.a.s.l). Many data on soil physics and biotic factors of several individual trees and tree groups were gathered. In addition, atmospheric physical and air chemical parameters (ozone, NO_2, NO_x, dry, gaseous and wet depositions) were collected. During summer anticyclonic situations intensive observation periods (IOP) were carried out to track the fluxes of O_3, NO_2, NO_x, CO_2 and H_2O between the ground layers of the atmosphere and a forest stand. A motor-glider plane was equipped with collection and measuring instruments for the determination of the air mass regime and air composition along the length of the valley and at different altitudes.
This comprehensive data set represents the actual state at the time of measurement. By means of appropriate parameterization and simple mathematical models, it is possible to calculate the course of anthropogenic gaseous pollution of the forests since industrialization (ca. 1900 in this valley community).
A detailed synthesis of all determining factors, natural as well as anthropogenic, was carried out for the evaluation of the overall risk. A mapping of the total potential risk for the forests of the upper Reuss valley will be done in the near future.

Risiko, Schutzwald, Stressoren, Ökosystem.
Forest decline, Deposition, Airpollution, Föhn.

1. Problemstellung

Die 80er Jahre waren vom Schlagwort "Waldsterben" geprägt. Aufgrund des politischen Druckes und aus Interesse an der Sache wurde in der Schweiz das Nationale Forschungsprogramm 14 + (NFP14+) durchgeführt mit der Absicht, die Ursachen der neuartigen Waldschäden zu begründen (ROTH & al. 1992). Damit wurden unter anderem einmal mehr zwei fundamentale Erkenntnisse bestätigt:

1. Eine analytische Vorgehensweise zur Erarbeitung eines einfachen Wirkungsmechanismus läßt sich nicht herleiten, da Ökosysteme a priori zu komplex sind.
2. Die lebendigen Organismen zeichnen sich dadurch aus, daß sie sich, physikalisch gesehen, weit ab vom thermodynamischen Gleichgewicht befinden.

Konsequenterweise müssen Risikoabschätzungen aus einer anderen Perspektive angegangen werden, um die Wechselwirkung einer Pflanze oder einer ganzen Pflanzengemeinschaft mit der Umwelt zu betrachten.
Eine andere ernüchternde Erkenntnis aus dem NFP 14+ ist die Tatsache, daß zwar die verschiedenen Disziplinen von Mykorrhizen bis Schadstofftransport von ca. 20 verschiedenen Forschungsinstituten angegangen wurden und jede für sich gute Resultate hervor brachte, aber infolge mangelnder Kommunikation keine interdisziplinäre Diskussion stattfand, geschweige denn eine entsprechende Schlußfolgerung gezogen worden wäre (STARK 1991).
Als Fortsetzung des NFP14+ in kleinerem Rahmen wurde eine interdisziplinäre Arbeitsgruppe mit Mitarbeitern des Institut für angewandte Pflanzenbiologie (IAP) und des Paul Scherrer Institut (PSI) im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL) mit dem Problem der Waldschäden an Schutzwäldern konfrontiert. Aufgrund der speziellen Lage wurde das eng begrenzte Gebiet des Urner Reusstales als Versuchsgebiet ausgewählt, da ein Zusammenbrechen des Ökosystems Schutzwald längs des Gotthard Transektes droht, was nicht nur ökologisch sondern auch ökonomisch fatale Folgen hätte. Abbildung 1 zeigt einen dieser Schutz-

wälder, welcher durch Windeinwirkung flächenhaft umgeworfen wurden. Es besteht ein hohes Risiko, daß in diesem Bereich Lawinen bis in die Talsohle vorstoßen können.

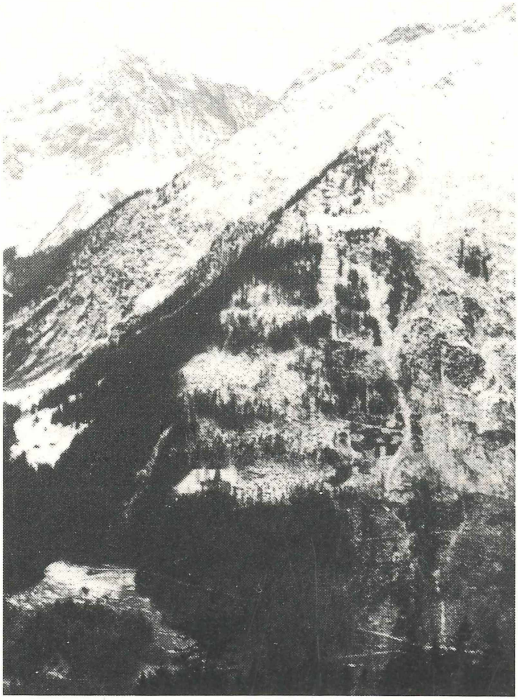

Abb. 1: Ausschnitt der Problemwälder im Urner Reusstal. Der ursprünliche homogene Schutzwald (Kuppenförmiger Hangbereich in Bildmitte) wurde durch Sturmwinde flächenhaft weggefegt, so daß jegliche Schutzfunktion gegen Lawinen entfällt.

Fig. 1: A typical example of a forest in the Urner Reuss Valley. The original homogeneous protection forest (rounded slope in the centre of the figure) has been completely blown away by heavy storms. Therefore the protection against avalanches has been dropped.

2. Methode

Die angestrebte Bewertung des Risikos für ein Zusammenbrechen des Ökosystems der Schutzwälder - hier Schutzwälder gegen Lawinen, Steinschlag und Erosion - stützt sich vor allem auf die Beobachtung von Trends in den bio-geochemischen Zyklen. Genügend lange Meßreihen der Atmosphäre und der Biosphäre sowie die notwendige Erfahrung erlauben eine gezielte Analyse. Als erstes gilt es, die Schwierigkeit der räumlichen und zeitlichen Variabilität der Meßreihen im Vergleich zur großen "Langzeitstabilität" der Natur d. h. die Adaptation der Natur an die sich langsam verändernden Umweltbedingungen in Beziehung zu bringen. Die Variabilität läßt sich aus dem Prozeßverständnis mit Leichtigkeit herleiten, die Langzeitstabilität dagegen ist und bleibt ein Geheimnis der Natur. Die Regelkreise für die Einzelprozesse sind zwar mit dynamischen Modellen - z. B. die luftchemischen Reaktionsabläufe - erklärbar und Prognosen sind mit solchen Modellen für Sekunden bis wenige Stunden möglich, jedoch sind diese für Langzeitaussagen unbrauchbar. Ein Zusammenbringen einzelner Teilmodelle für die Risikoabschätzung wie z. B. das TREGRO-Modell von Weinstein (WEINSTEIN & al. 1992) führt ebenfalls zu keinem Ziel, auch wenn z. B. die Daten für den Stickstoffhaushalt aus luftchemischen Modellen stammen. Es muß daher eine neue Form der Modellierung mittels geeigneter Parameterisierung für die Trends und damit eine Simulation von Szenarien gefunden werden. Eine solche Vorgehensweise betrachtet vermehrt die Gesamtheit und Begriffe wie "Prozeß" und "Kausalität" treten in den Hintergrund. Dies soll an einigen einfachen Beispielen demonstriert werden.

Für die Beurteilung der anthropogenen und natürlichen Einflüsse auf die Vegetation müssen Zeitreihen unterschiedlichster Skalen bio-geochemischer Kreisläufe untersucht werden. Zunächst sollen zwei verschiedene

Kompartimente betrachtet werden: oberirdische und unterirdische Pflanzenteile. Die oberirdischen sind der Atmosphäre ausgesetzt und der hier wirkende Risikopfad hat typische Zeitkonstanten von Sekunden bis Stunden, während die unterirdischen, also der Wurzelbereich mit dem langzeitspeichernden Boden, Zeitkonstanten von Tagen bis Jahren aufweist. Mittels Experimenten muß die Wechselwirkung und die Eintragsbilanz mit den "critical loads" inventarisiert werden, dies sowohl für die Vergangenheit und mit entsprechenden Ansätzen auch für die Zukunft. In einem 2. Schritt wird unter Zuhilfenahme von ökologischen Kriterien für jede, mögliche Schäden verursachende Komponente (Stressoren) das Risiko abgeschätzt und 3. werden diese Stressoren mit einem Gewichtsfaktor unter Einbezug einer Wertung gegenüber den "critical loads" versetzt. 4. wird die Summe aller natürlichen und anthropogenen Stressoren zu einem Gesamtrisiko gebündelt. Aufgrund von Langzeitveränderungen können aus den historischen Daten (hier seit 1900) durch geeignete Parameterwahl entsprechende Szenarien hochgerechnet werden.
Diese aufgezeigte Methode wird für ein solches Gebiet erstmalig eingesetzt und entsprechend müssen auch Erfahrungen gesammelt werden. Daher kann zu diesem Zeitpunkt noch kein abschließendes "mapping of the total potential risk" für die Schutzwälder im Urner Reusstal gegeben werden, da die Auswertungen und Diskussionen noch nicht abgeschlossen sind. Es werden daher im Folgenden nur einige Stress erzeugende atmosphärenphysikalische Prozesse anhand von Beispielen vorgestellt.

3. Feldexperimente und Datenerhebungen

Für die Erhebung des Ist-Zustandes des Waldes auf vier ausgewählten Versuchsflächen wurden vom Sommer 1991 bis Ende 1992 verschiedene Feldversuche durchgeführt:
Das Institut für angewandte Pflanzenbiologie konzentrierte sich schwerpunktmäßig auf die biologischen und standortspezifischen Parameter (siehe Tab. 1) während das Paul Scherrer Institut sich mit den meteorologischen und luftchemischen Größen befaßte. Die Tabelle 1 gibt einen groben Überblick über die durchgeführten Feldmessungen. Die ausgewählten Versuchsflächen befinden sich auf verschiedenen Höhenstufen in einem Querschnitt durch das Urner Reusstal bei Amsteg (siehe Abb. 2) Es wurde versucht, möglichst für die Gegend repräsentative Waldflächen zu untersuchen. Die am tiefsten liegende Versuchsfläche befindet sich am Rand des Talbodens auf 630 m ü. M., die am höchsten gelegene nahe der Waldgrenze auf 1740 m ü. M. Dazwischen liegen zwei weitere Flächen auf 930 bzw 1220 m ü. M. Zwei zusätzliche Waldfächen am Taleingang und am Talende wurden im Hinblick auf biologische Vergleichsfaktoren hin untersucht.
Der geologische Untergrund besteht aus Gneis. Einzig über ca. 2000 m ü. M. ist eine Schicht von Quinterkalk vorhanden. Daraus haben sich im geologischen Zeitraum einige Schuttbrocken gelöst, welche vereinzelt in den Waldböden nachgewiesen werden konnten. Damit ist der Untergrund wenig kalkhaltig und der darüberliegende sehr flachgründige Boden podsolig. Details über die Bodenzusammensetzung (Chemie und Physik) und die Pflanzengesellschaften werden in einem Bericht des BUWAL (BUWAL 1994) publiziert.

Tab. 1: Durchgeführte Feldexperimente und Erhebungen im Projekt Schutzwald.

Tab. 1: Performed field experiments and observations in the project "Protection forests".

IAP:
- ☆ Bodenprofile (Chemie, Physik, Nährstoffe, Temperatur)
- ☆ Pflanzensoziologie
- ☆ Forstzustand und -wirtschaft
- ☆ 35-40 Fichten pro Fläche für Bonitierung (Nadelverlust, Triebwachstum, Parasiten, Pilze, Nährstoffe, Frosthärte)
- ☆ Deposition (Trocken- und Nass-, Bulk-, Freiland-, Kronentraufe)
- ☆ Ozonflussmessungen mit Branch Exposure Chamber (BEC)

PSI:
- ☆ 4 Meteo-Bodenstationen (Temperatur, Bodentemperatur, Feuchte, Wind, Strahlung, Blattnässe, Ozon)
- ☆ GasT (Meteo, O_3, H_2O, CO_2, NO, NO_2) für Flussmessungen
- ☆ 9 NO_2-Passivsammler
- ☆ 1 Aktive NO_2-Messung
- ☆ Zeitraffervideo (1 Bild/5 min)
- ☆ Nebelfänger
- ☆ Instrumentierter Motorsegler (Temp., Feuchte, Wind, Höhe, NO_2, O_3, H_2O_2)

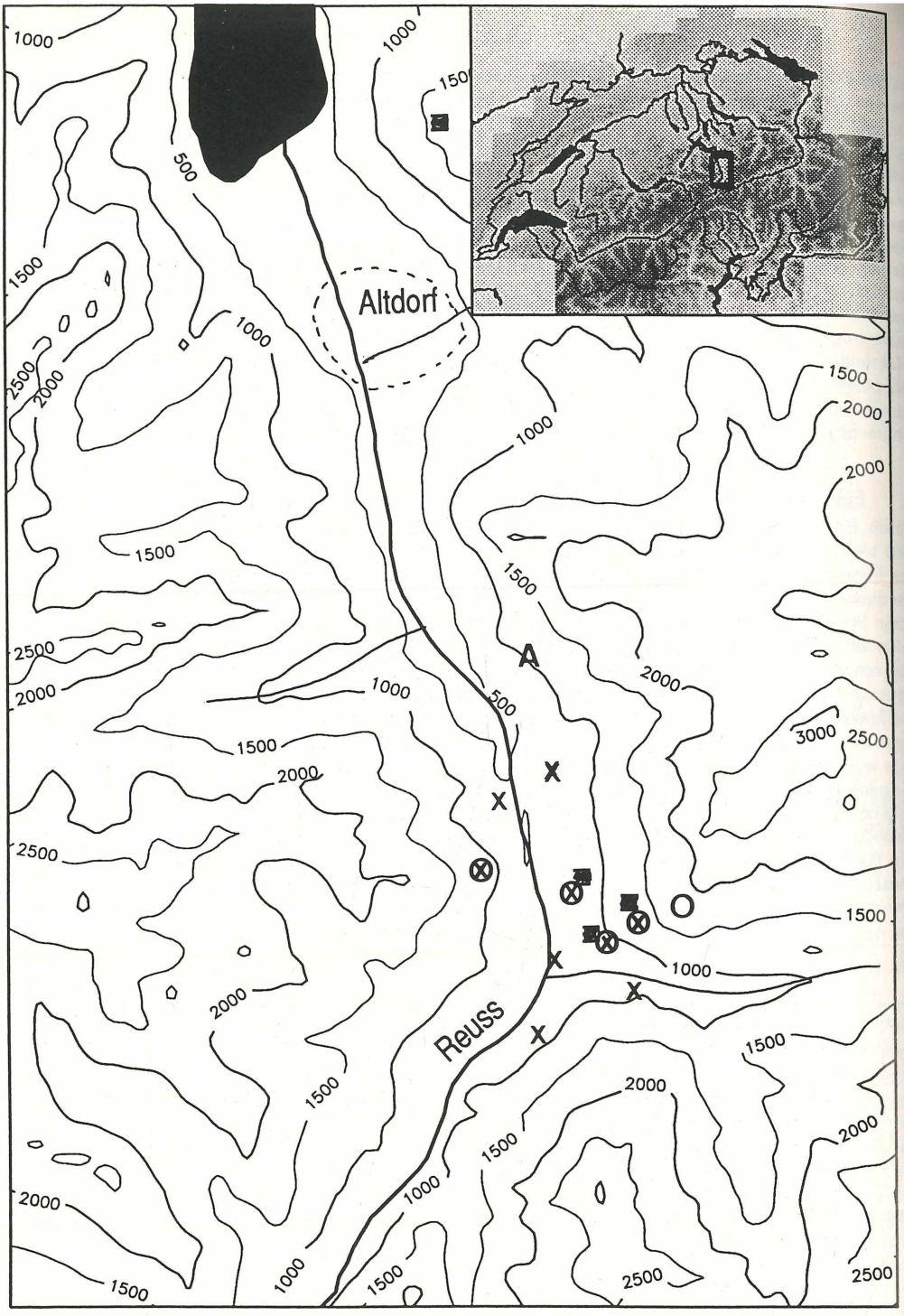

Abb. 2: Kartenausschnitt des Versuchgebietes. In Bildmitte oben der südlichste Teil des Vierwaldstättersees.
■ = Versuchsflächen, ❍ = Meteostation, x = NO_2-Sammler, A = Video.

Fig. 2: Map of the study area. In the top centre is a part of the Lake of Lucerne.
■ = Field sites, ❍ = Meteorological surface station, x = NO_2-collector, A = Video camera.

Mit Hilfe der meteorologischen Bodenstationen in unmittelbarer Nähe der Versuchsflächen wurden die während der Untersuchungsperioden herrschenden Wetterbedingungen aufgezeichnet. Zudem konnten die Strömungsverhältnisse und die Ozonprozesse für den Bereich der Schutzwälder aufgedeckt werden. Ein Vergleich der Meßwerte mit denjenigen der seit 1900 betriebenen Klimameßtation in Altdorf (Talgrund) erlaubte es, mittels Korrelationsrechnungen die Witterungsbedingungen an den Standorten der Versuchsflächen bis 1900 zurück zu simulieren. Damit ließen sich natürliche Stressphasen wie z. B. Trockenheit, Frost etc. ermitteln. Um den Einfluß der linearen NO_2-Quelle (Autobahn) zu untersuchen, wurde an verschiedenen zusätzlichen Standorten die NO_2-Konzentration passiv in wöchentlichen Intervallen bestimmt. Mittels eines 30 m hohen Meßturmes (GasT), ausgerüstet mit 7 instrumentierten Niveaus, erlaubte es den Fluß diverser gasförmiger Substanzen in die verschiedenen Waldkomparimente hinein abzuschätzen (siehe JOSS & GRABER 1994). Sporadisch wurde mit einem Nebelfänger Wasser der Hangwolken eingesammelt und chemisch analysiert. Mit einer Videozeitrafferkamera konnte das ganze Tal im Bereich der Versuchsflächen überwacht werden. Daraus ließen sich meteorologische Ereignisse (Wolkenbildung, Inversionsauflösung etc.) festhalten und statistisch auswerten. Die Luftmassenverteilung und die Luftschadstoffdynamik wurde durch Meßflüge mit einem instrumentierten Motorsegler erfaßt. Damit ließen sich Erkenntnisse über Transportphänomene lokal im Tal wie auch als Export/Import bezüglich des Tales gewinnen.
Weitere Daten wurden vom Amt für Umwelt (NO, NO_2, O_3, SO_2) und der Forstwirtschaft des Kanton Uri (Wirtschaftspläne, Schadenmeldungen) sowie dem schweizerischen Landesforstinventar (Waldzustand, Baumartenverteilung, Mischungsgrad) zur Verfügung gestellt. Die Standorte der einzelnen Feldexperimente sind aus Abb. 2 ersichtlich.

4. Ausgewählte Beispiele

Anhand von wenigen Beispielen soll gezeigt werden, wie bestimmte Stressoren parameterisiert werden können, um damit die Stressentwicklung seit 1900 z. B. für den Eintrag von Säure aufzuzeigen.

4.1 Mittlerer NO_2-Eintrag

Je nach Wetterlage werden von der Autobahn in Abhängigkeit der Verkehrsfrequenzen die ausgestoßenen in NO_2 umgewandelten Gase im Talkessel verteilt oder bei entsprechender Dynamik weggetragen.
Mit den Passivsammlern (PALMES & GUNNISON 1976) läßt sich das Integral über eine Woche der auf die jeweiligen Standorte eingetragenen NO_2-Konzentrationen bestimmen.
Für die Interpretation der Daten wurden der Emissionskataster und die Verkehrsstatistik herangezogen. Die Verkehrsfrequenzen weisen einen typischen Wochengang auf. Deutlich treten die Hauptreisezeiten (Osterverkehr und Sommerferien) in Erscheinung (siehe Abb. 3). Die aus dem Verkehr für eine lineare Quelle errechneten NO_2-Emissionen nach BUWAL (1986) ergeben bei der Autobahn mittlere Tageswerte von 20 bis 140 kg NO_2 pro km (siehe Abb. 4). Mit dieser Quelldichte und den aus den Video/Meteostationen ermittelten Inversionshöhen wurde mittels eines einfachen Boxmodells die NO_2-Konzentration in der Box gerechnet. Die Box hat einen rechteckigen Querschnitt mit einer Breite von 1,5 km und einer der Inversion entsprechenden Höhe. Für die Berechnungen wurde eine 95 prozentige Persistenz der Mischschicht für Schwachwindlagen (Windgeschwindigkeit < 1 m/s) während den jeweiligen Expositionsintervallen der NO_2-Sammler vorausgesetzt. Diese Bedingung traf infolge der häufigen Föhnlagen und den katabatischen Windsystemen nur selten zu. Einzig die Periode von der 3. bis zur 7. Woche erfüllte die Vorgaben. Entsprechend nehmen während dieser andauernden winterlichen Hochdrucklage infolge einer Kummulation des NO_2 unterhalb der Inversion die Wochenmittelwerte aller NO_2-Meßstellen die höchsten Werte des Jahres 1992 an. Die Werte des Boxmodells (siehe Abb. 4) stimmen für diese Periode recht gut mit den gemessenen Werten überein.
Für die gleiche Periode wurde die Depositionsgeschwindigkeit auf den Boden unter Berücksichtigung der Quellstärke, den gemessenen NO_2-Konzentrationen und der mittleren Inversionshöhe mit einem einfachen Boxmodell berechnet. Sie beträgt $0{,}7 \pm 0{,}2$ mm/s und ist damit von der gleichen Größenordnung wie sie von COE (1992) für flache Heidelandschaften bestimmt wurde.

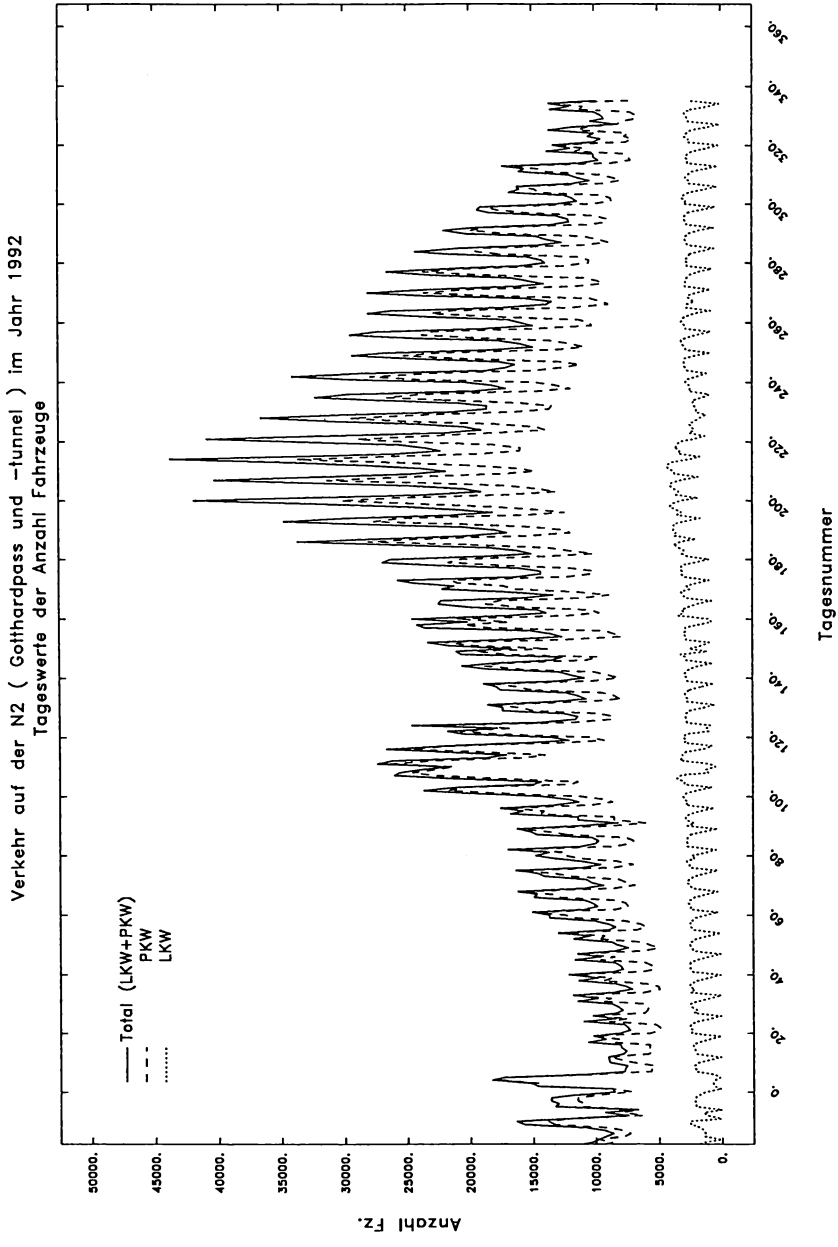

Abb. 3: Verkehr auf der Autobahn N2 und über den St. Gotthardpass aufgeschlüsselt nach Personenwagen (PKW) und Lastwagen(LKW, Masse > 3,5 t). Der Anteil des Lokalverkehrs beträgt auf der Kantonsstraße im Mittel übers Jahr 3100 Fz/Tag. Deutlich erkennbar sind die Weihnachts-, Oster- und Sommerferien.

Fig. 3: Traffic on the St. Gotthard highway N2 (sum of vehicles through the tunnel and over the pass) for passenger cars (PKW) and lorries (LKW, load > 3,5 t). The portion of the local traffic reaches 3100 vehicles per day in the average. The Christmas-, Easter- and summer holidays can be clearly identified.

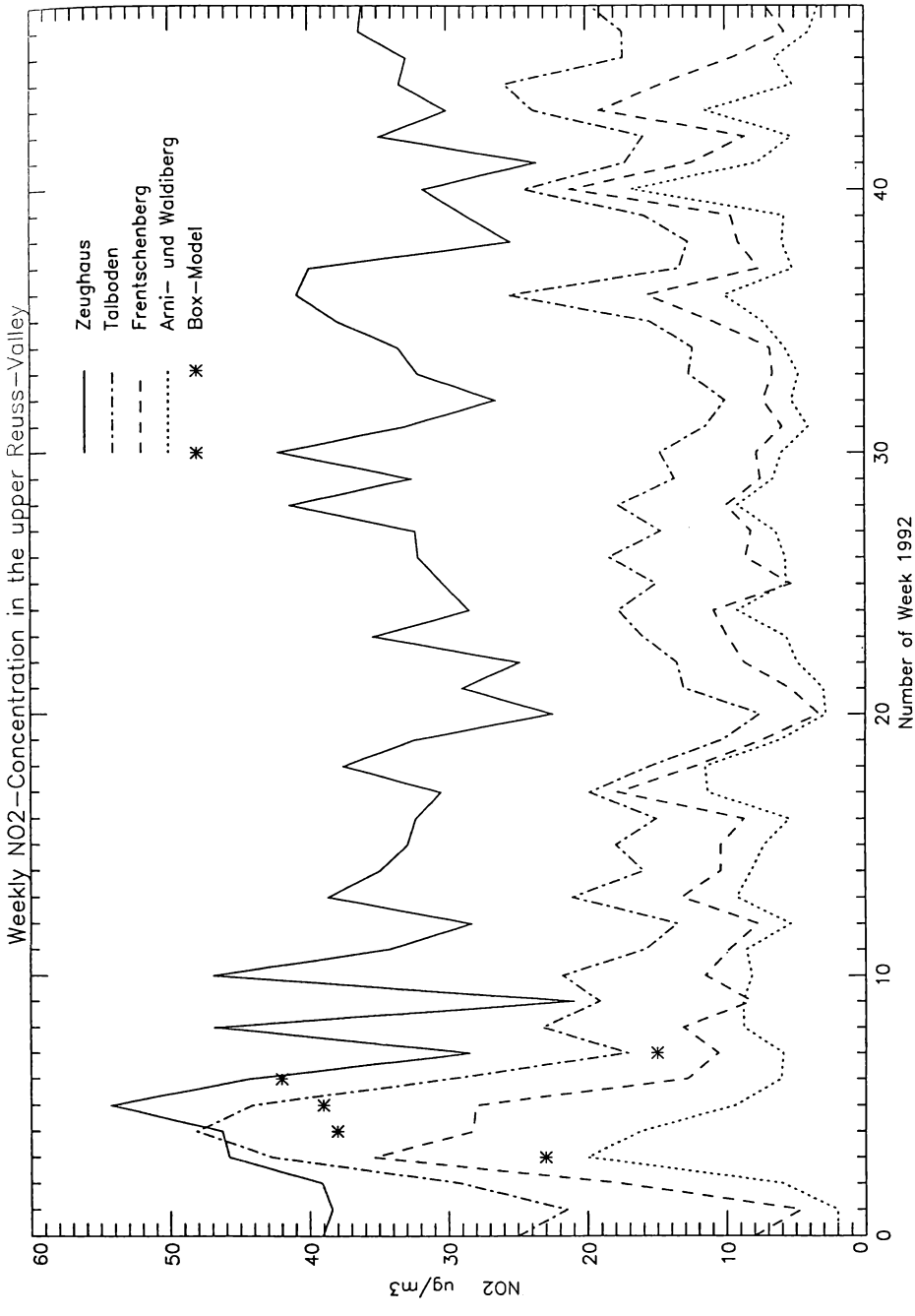

Abb. 4: Mittelwerte der wöchentliche NO_2-Konzentrationen neben der Autobahn (ausgezogene Kurve) und für die 3 Höhenstufen (620, 925 und 1250 m ü. M.) (Fehlerschranken ± 4%). Zusätzlich die mit dem Boxmodell berechneten Konzentrationen während einer winterlichen Inversionslage.

Fig. 4: Averages of the weekly N02 concentration close to the highway (solid line) and for 3 different elevations (620, 925 and 1250 m asl). The uncertainty of the measured NO2 concentration is 4%. In addition, concentrations calculated with a simple box model during persistent inversions are indicated.

4.2 Strömungsverhältnisse (O_3 + NO_2)

Vor allem bei Hochdrucklagen aber auch teilweise bei Bisen- und Staulagen wird aus dem Mittelland Luft in die Alpen verfrachtet. Ergebnisse aus der POLLUMET Kampagnie 1990 (GRABER & PORTMANN 1993) zeigen, daß großräumig katabatisch bedingt ca. 36% der Mittellandluft innerhalb von 8 h aus der Mittellandbox in die Alpen strömen, weil über den Alpen die Luft ansteigt und entsprechend aus Norden ersetzt wird. Das Einfliessen tagsüber und das Ausfließen in der Nacht wechselt in regelmäßigem Rhythmus. Der Tagesgang für Ozon und NO_2 nimmt an solchen Tagen einen charakteristischen Verlauf an, wie dies für NO_2 aus Abbildung 6 ersichtlich ist. Die NO_2-Konzentration steigt morgens unterhalb der Inversion mit aufkommendem Verkehr rasch an, geht mit einsetzendem katabatisch bedingtem Nordwind markant zurück, da die Luftmassen über dem See "gereingt" werden bzw mehr Reinluft beigemischt wird, bevor sie ins Urner Reusstal eindringen. Nach der Windumkehr abends steigt die NO_2-Konzentration erneut markannt an, da sich unter diesen Verhältnissen stark NO_2 belastete Luft ins Tal ergießt, welche aus der Belüftung des Gotthard-Straßentunnels und dem Verkehr stammt.

Die der Grundströmung im Tal überlagerten Hangwindsysteme bilden sich bei entsprechender Einstrahlung aus. Anhand der Messungen mit dem Flugzeug konnte nachgewiesen werden, daß innerhalb der Hangwindsysteme oft lokal äußerst persistente Thermikschläuche bestehen. Damit werden sehr lokal hohe Konzentrationen von Schadstoffen aus den Quellgebieten über immer die gleichen Hangpartien und somit auch über die gleichen Schutzwälder vertikal verfrachtet wie dies aus Abbildung 5 hervor geht. Die Bewegung der aufwärts strömenden Hangwinde wird durch eine Abwärtsbewegung in Talmitte kompensiert.

4.3 Föhnparametrisierung

Damit das Auftreten des in diesem Gebiet dominierenden Wetterphänomenes Föhn und die damit verbundenen Stressoren Trockenheit, Windwurf und Ozon auch bis 1900 zurück bestimmt werden konnten, mußte auf der Basis der vorhandenen Daten eine Parameterisierung erfolgen. Diese wurde anhand des 1991/92 erhobenen Datensatzes überprüft. Die Parameterisierung geht von den Wind- und Feuchtedaten in Altdorf aus. Mit RH_i, dem Stundenmittel der Feuchtigkeit zur Stunde i wird die Differenz der mittleren Feuchtigkeit 3 Stunden vor gegenüber 3 Stunden nach der laufenden Stunde bestimmt:

$$\Delta RH_i = (RH_{i+1} + RH_{i+2} + RH_{i+3})/3 - (RH_{i-1} + RH_{i-2} + RH_{i-3})/3$$

Anschließend wird die Südwindpersistenz P_i ermittelt. $P_i = 1$, wenn während mindestens 3 Stunden die Windstärke größer als 0,7 m/s ist und die Richtung zwischen 100° und 260° liegt. Föhn herrscht, wenn im Zeitintervall ± 6 Std um den Einsatzbeginn ein Feuchtesprung von mindestens -15% und entsprechend am Ende einen solcher von mindestens + 25% vorhanden ist. Mit dieser Parametrisierung konnte im Vergleich zu den beobachteten Föhnperioden eine Trefferquote von ± 95% erreicht werden.

4.4 NO_2 Entwicklung

Wie bereits oben beschrieben, unterliegt die NO_2-Konzentration einem typischen Tagesgang während Wetterlagen, bei denen sich ein Berg-/Talwindsystem ausbildet. Da sich NO_2 schnell aus NO bildet, müssen für eine Parametrisierung von NO_2 sowohl die Verkehrsentwicklung wie auch die Wetterlage mitberücksichtigt werden.

In analoger Weise wie für Föhn wurde eine Nordwindpersistenz N_{per} gebildet. Diese zeigt die während Schönwetterlagen typischen Talwinde an. Für eine multivariate Regressionsrechnung erwies sich die inverse Windgeschwindigkeit f_{inv} für Windstärken größer als 1 m/s als relevantes Maß, indem hohe Windgeschwindigkeiten die NO_2-Konzentration durch mechanische Turbulenzbildung verdünnen. Unter Einbezug der täglichen Sonnenscheindauer s (in Std) und der Inversionsintensität ΔT, (Temperatur Altdorf - Temperatur Gotthard plus 9,6°C) ergibt sich eine Funktion für die stündliche NO_2-Konzentration:

$$\{NO_2\}(h) = 9{,}8 + 0{,}25 \cdot s - 0{,}14 \cdot N_{per} - 0{,}56 \cdot \Delta T + 12 \cdot f_{inv}$$

In einem zweiten Schritt muß der charakteristische Tagesgang berücksichtigt werden. In ähnlicher Weise wird der Tagesgang des Verkehrs und die Inversionsauflösung in die Parametrisierung miteinbezogen. Die mit einer solchen Modellrechnung erhaltenen NO_2-Konzentrationen wurden mit den in der Nähe von Altdorf aktiv gemessenen NO_2-Konzentrationen für 1992 verglichen (siehe Abb. 6). Der Korrelationskoeffizient für diese beiden Zeitreihen beträgt 0,61, was für solche einfachen Modellansätze recht hoch ist. Mit diesem Modell läßt sich nun der NO_2-Eintrag seit 1900 abschätzen aufgrund der bekannten Angaben über die Industrie- und Verkehrsentwicklung Ebenso kann der Trend für die Zukunft unter bestimmten Annahmen für die Abgasentwicklung aus dem Straßenverkehr berechnet werden.

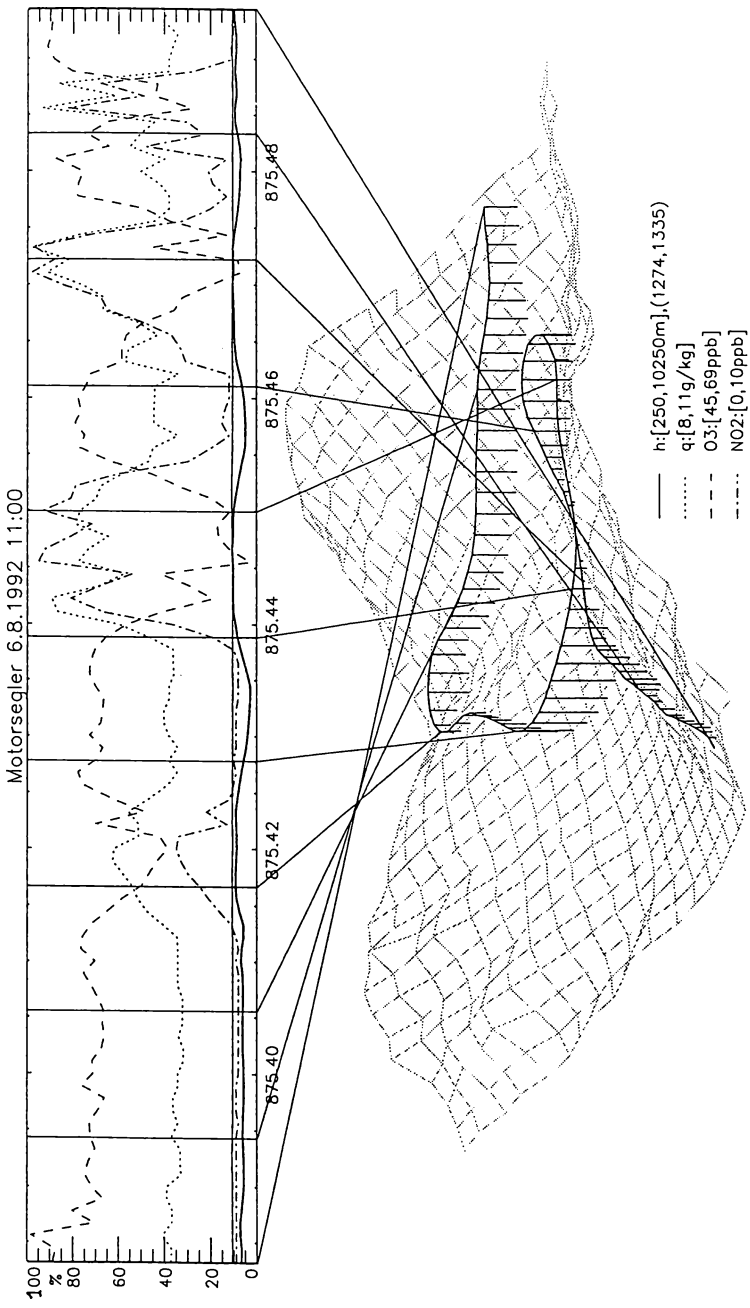

Abb. 5: Motorsegler-Flug vom 6.8.1992 mit Messungen von Wasserdampf-Mischungsverhältnis q (gepunktet, %-Skala: 8 - 11 g/kg), Ozon (strichliert, %-Skala: 45 - 69 ppb) und NO_2 (punkt-gestrichelt, %-Skala: 0 - 10 ppb). Die Topographie zeigt den Ausschnitt um Amsteg. Die Flugtrajektorie beginnt zeitlich rechts, mündet ins Maderanertal und macht eine nach Süden gerichtete Schleife.

Fig. 5: Flight path of the motor glider for the 6th August 1992 with the measurements of water vapour mixing ratio q (pointed line, %-scale: 8 - 11 g/kg), ozone (dashed line, %-scale: 45 - 69 ppb) and NO_2 (dashed-pointed line, %-scale: 0 - 10 ppb). The x axis indicates the time after take-off in minutes. The topography represents the area around Amsteg. The trajectory starts in the topography on the right hand edge.

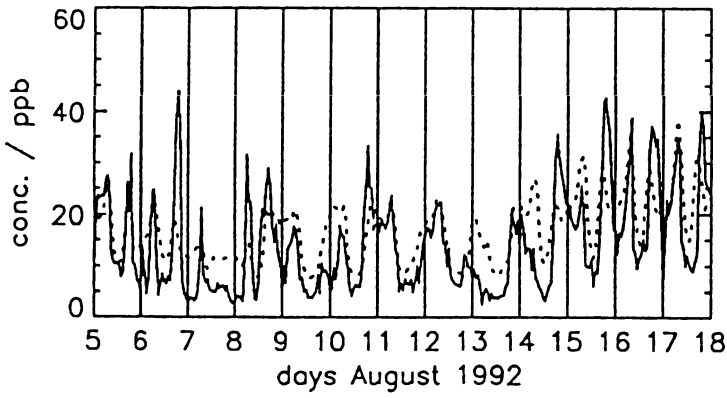

Abb. 6: Gemessene (ausgezogen) und berechnete (strichliert) NO_2-Konzentrationen im Urner Reusstal bei Altdorf.

Fig. 6: Measured (solid line) and calculated (dashed line) NO_2 concentration near Altdorf on the valley floor.

5. Risikofaktoren

Wie in den oben aufgeführten Beispielen lassen sich etliche andere Parameter modellieren, welche als anthropogene Stressfaktoren in Erscheinung treten. Die Gesamtheit aller relevanten Stressoren ist aus Tabelle 2 ersichtlich; gruppiert nach bestimmten Gemeinsamkeiten. Noch bevor eine eingehende Bewertung und Beurteilung der möglichen Risikofaktoren geschehen konnte - eine solche wird zur Zeit ausgearbeitet - lassen sich jetzt schon bestimmte Aussagen machen.

Tab. 2: Mögliche Stressoren für die Schutzwälder.

Tab. 2: Possible stressors for the protection forests.

Mechanik:	Windwurf	**Ernährung**:	Mineralisierung
	Schneelast, Rauhreif		Nährstoffverhältnisse
	Rutschgefahr		Verwitterungsraten
	Lawinen		Aluminium/Kationen
	Steinschlag		Bodensäure
	Gleit-Schnee		Nährstoffverfügbarkeit
			Basensättigung
Geo-/Pedomorphologie:	Hangexposition		
	Hangneigung	**Eintrag/Fluss**:	NO_2 Fluss oder Konzentration
	Gründigkeit		O_3-Fluss stomatär
	Bodenwasser		N-Fluss
	Lufthaushalt in Boden		$SO_2 + NO_2$ Eintrag
			Säuredeposition (bas. Kationen)
Witterung:	Temperaturanstieg (climatic change)		Wolkenwasser-Konzentration (pH)
	UV-B-Strahlung		Chlordeposition
	Temperaturstürze pro Zeitintervall		Leaching (Nährstoff-Verlust)
	Temperaturstürze absolut		Leitfähigkeit für Wasser an Blättern
	Trockenheit		
	Nässe	**Biotisch**:	Pilze
	Spätfrost		Insekten
	Frühfrost		Verbiss
	Winterfrost		
	Frosttrocknis	**Forst**:	Waldpflege
	Waldbrand		Unterwuchs (Verjüngung)
			Gleichförmigkeit vom Wald

Aus der ganzen Palette von Faktoren erwiesen sich folgende vier als die Ausschlaggebendsten: Nährstoffverfügbarkeit, Nährstoffverhältnisse, Säuredeposition und Waldpflege. Die beiden letztgenannten sind die Risikofaktoren mit dem größten Gewicht und beide haben einen anthropogen Ursprung. Speziell der Faktor Waldpflege spielt eine wichtige Rolle, denn die Schutzwälder im Reusstal wurden seit Jahrhunderten gepflegt und genutzt. Dadurch wurde sichergestellt, daß eine stetige Verjüngung stattfand. Seitdem andere Energiequellen und Baustoffe wirtschaftlicher wurden und die äußerst schwierige Holznutzung aus diesen steilen Gebirgswäldern keinen Profit mehr abwarf, wurden seit ca. 50 Jahren die Wälder sich selber überlassen. Die heute bestehenden, überalterten und über große Gebiete gleichaltrigen Monokulturen (Fichten) (MAHRER 1988) sind äusserst empfindlich gegen verschiedene Stresseinwirkungen. So kann der auslösende Stressfaktor durchaus ein natürlicher sein wie z. B. Windwurf oder Frost. Die Natur steht nun vor der Aufgabe, ehemals künstlich erzeugte Wälder wieder in die natürliche Form zurück zu transformieren, was aber offensichtlich eher über ein Zusammenbrechen des Ökosystems zu führen scheint.

6. Schlußfolgerung

Mit dieser Arbeit konnte gezeigt werden, daß mit einfachen Parametrisierungen die Schadstoffbelastung (NO_2 und O_3) für Schutzwälder im Urner Reusstal seit 1900 bestimmt werden kann. Für 1992 ließen sich die NO_2 Einträge in die verschiedenen Höhenstufen im Bereich der Schutzwälder bestimmen. Die hohen Werte für NO_2 bei Inversionslage und für O_3 bei Föhn und antizyklonalen Lagen haben einen entscheidenden Einfluß auf die Nährstoffverhältnisse, welche gemäß Untersuchungen des IAP stark gestört sind. Im Gegensatz zur Thermik über Flachlandwäldern konnte nachgewiesen werden, daß sich an den Hangflanken in Gebirgstälern häufig sehr persistente, lokale Thermikaufwindschläuche ausbilden, welche bestimmten Waldbeständen extrem viel Schadstoffe zuführen. Für diese Ökosysteme besteht lokal ein hohes Risiko eines Zusammenbruches. Die mangelnde Waldpflege und somit die nicht vorhandene Verjüngung (MAHRER 1988) der Bestände dürften sich in einigen Jahrzehnten fatal auswirken. Für die Erhaltung dieser Schutzwälder muß dafür gesorgt werden, daß sie bei minimaler Waldpflege stabil werden und sich selbständig verjüngen. Dies ist eine neue Herausforderung für die Forstwirtschaft von Gebirgswäldern und zudem muß der Säureeintrag drastisch reduziert wird.

Literatur

BUWAL (Bundesamtes für Umwelt, Wald und Landschaft), 1986: Schadstoffemissionen des privaten Strassenverkehrs 1950 - 2000. - Schriftenreihe Umweltschutz des BUWAL Nr. 55, Nachtrag 1988, Bern: 267 S.

BUWAL (Bundesamtes für Umwelt, Wald und Landschaft), 1994: Abschätzung von natürlichen und anthropogenen Risikofaktoren für Schutzwälder. - (In Druck).

COE, H. & M.W. GALLAGHER,1992: Measurements of dry deposition of NO_2 to Duch heathland using eddy-correlation technique. - Quat. J. Roy. Meteorol. Soc. 118: 767-786.

JOSS, U, & W.K. GRABER, 1994: Profiles and simulated exchange of H_2O, O_3, NO_2 between the atmosphere and the HartX Scots pine plantation. - J. of Theor. a. Appl. Climat. (in press).

PALMES, E.D. & A.F. GUNNISON, 1976: Personal Sampler for Nitrogendioxide. - J. of Am. Ind. Hyg. Ass., 10, 37.

ROTH, U., (Hrsg.), JUTZI, W., GRABER, W., HORNUNG, D. & M. STARK, 1992: LUFT. Zur Situation von Lufthaushalt, Luftverschmutzung und Waldschäden in der Schweiz. - Verlag der Fachvereine, Zürich: 176 S.

GRABER, W. & W. PORTMANN, 1993: Modelling wind field over complex terrain by superposition of scale-related processes and its application to Alpine air mass exchanges. - Meteorol. Z. N. F. 2: 153-166.

MAHRER, F., (Hrsg.), 1988: Schweizerisches Landesforstinventar, Ergebnisse der Erstaufnahme 1982 - 1986. - Eidg. Anstalt für das forstliche Versuchswesen, CH-8903 Birmensdorf, Bericht Nr 305: 375 S.

STARK, M., 1991: Arbeitsmethodik und Synthesekonzept. - In: STARK, M., (Hrsg.): Lufthaushalt, Luftverschmutzung und Waldschäden in der Schweiz, Band 5: Luftschadstoffe und Wald. - Verlag der Fachvereine, Zürich: 283 - 298.

WEINSTEIN, D.A., YANAI, R.D., BELOIN, R.M. & C.G. ZOLLWEG, 1992: The response of plants to interacting stresses: TREGRO. - Palo Alto, CA 1992.

Danksagung

Dem Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft der Schweiz, insbesondere den Herren Dr. R. Volz und Dr. B. Ackermann, sei für Ihre hilfreiche Unterstützung in gedanklicher und materieller Hinsicht herzlich gedankt. Unser Dank gilt auch den Herren R. Erne und R. Richter für die intensive Mithilfe während den Feldmessungen.

Adresse

Werner Nater, Werner Graber, Paul Scherrer Institut, Sektion Luftschadstoffe, CH-5232 Villigen.

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: Verhandlungen der Gesellschaft für Ökologie

Jahr/Year: 1994

Band/Volume: 23_1994

Autor(en)/Author(s): Graber Werner, Nater Werner

Artikel/Article: Messung und Modellierung der Veränderungen und Risiken für Schutzwälder als Folge anthropogener Einflüsse 165-176