

Zeitschrift: Bulletin de la Société Fribourgeoise des Sciences Naturelles = Bulletin der Naturforschenden Gesellschaft Freiburg

Herausgeber: Société Fribourgeoise des Sciences Naturelles

Band: 80 (1991)

Heft: 1-2

Artikel: Bedroht die Luftverschmutzung unser Überleben? : Ursachen, mögliche Konsequenzen

Autor: Stadelmann, Franz X.

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-308701>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 28.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Bedroht die Luftverschmutzung unser Überleben?

Ursachen – mögliche Konsequenzen

von FRANZ X. STADELmann,

Eidg. Forschungsanstalt für Agrikulturchemie und Umwelthygiene (FAC),
Sektion Lufthygiene und Pflanzenökologie, CH-3097 Liebefeld-Bern

1. Einleitung

Die Luft ist wie der Boden und das Wasser ein lebensnotwendiger Umweltbereich. Ohne Luft, ohne Sauerstoff (O_2), können keine aeroben Lebewesen, zu denen die Menschen, Tiere, Pflanzen und meisten Mikroorganismen gehören, existieren; sie würden ersticken. Ohne Luft gibt es keine land-, forst- und wasserwirtschaftliche Produktion. Jährlich werden pro Hektar (ha) viele Tonnen (t) Stoffe wie O_2 , Kohlendioxid (CO_2), Wasser (H_2O) usw. zwischen terrestrischen sowie aquatischen Ökosystemen und der Atmosphäre ausgetauscht. Über 40 % der pflanzlichen Trockensubstanz (TS) sind luftbürtig. Forst- und landwirtschaftliche Kulturpflanzen verwerten CO_2 und andere Luftgase wie Schwefeldioxid (SO_2), Ammoniak (NH_3) sowie Stickoxide ($NO_x = NO_2$ – Äquivalente) wie Stickstoffmonoxid (NO) und Stickstoffdioxid (NO_2), indem sie diese über die Spaltöffnungen der Blätter aufnehmen und in körpereigene organische Verbindungen wie Stärke, Zellulose und Eiweiße um- und einbauen.

Die Luft hat sich im Laufe der Erdgeschichte als eine ungefähr 10 km mächtige Hülle (Troposphäre) um die Erde gebildet. Natürliche Reinluft enthält folgende Bestandteile: 78,10 Vol.-% Stickstoff (N), 20,90 Vol.-% O_2 , 0,94 Vol.-% Edelgase, 0,03 Vol.-% CO_2 , 0,01 Vol.-% Wasserstoff (H_2), daneben Spuren von Kohlenmonoxid (CO), Ozon (O_3), NH_3 , NO_x , Methan (CH_4) sowie weitere organische und anorganische Stoffe. An der Zusammensetzung der Lufthülle hat sich während Jahrtausenden kaum etwas geändert.

Seit Beginn des Industriealters im letzten Jahrhundert aber hat der Mensch die Luftzusammensetzung massiv zu verändern begonnen. Die Luftverschmutzung ist in den letzten Jahrzehnten Tatsache und in den letzten Jahren ein Politikum geworden. Der Wintersmog mit den Leitsubstanzen SO_2 , NO_2 und Staubpartikeln sowie der Sommersmog mit der Leitsubstanz O_3 haben die Frage aufgeworfen, ob unser Leben, die Gesundheit von Mensch, Tier und Pflanze (Stichwort «Waldsterben»), ob unsere Lebensgrundlagen bedroht sind. Spätestens mit dem Kernkraftwerkunfall von Tschernobyl im Jahre 1986 wird registriert, daß die Luftverschmutzung (a) nicht nur ein lokales Problem ist, sondern daß wir international mit dem Luftpool verbunden sind und (b) wirtschaftliche Konsequenzen haben kann (NAEF, 1991).

Im folgenden wird übersichtsartig versucht

- Herkunft, Entstehung und Charakteristik der wichtigsten ökologisch und biologisch relevanten Luftsabdstoffe darzustellen,
- die Auswirkungen der Luftverschmutzung auf aquatische und terrestrische Ökosysteme zu erläutern,
- eine Bewertung der Luftverschmutzung vorzunehmen, Maßnahmen zu diskutieren und daraus einige Schlußfolgerungen zu ziehen.

Die gewählten Beispiele stammen primär aus der landwirtschaftlichen und phytotoxikologischen Forschung sowie aus dem Verkehrsbereich.

2. Herkunft, Entstehung und Charakteristik der ökologisch und biologisch relevanten Luftsabdstoffe

Industrialisierung, Bevölkerungswachstum und Konsumverhalten haben die Luftverschmutzung verursacht. Stoffe, die über dem natürlichen Gehalt der Luft (Reinluft) liegen, werden als Luftverunreinigungen oder Luftverschmutzungen bezeichnet. In

Luftinhaltsstoff (Schadstoff)	Primär/ Sekundär	Form	Herkunft
Ozon (O_3)	Sekundär	Gas	Atmosphärische Umwandlung (Folgeprodukt von Autoabgasen)
Schwefeldioxid (SO_2)	Primär	Gas	Fossile Brennstoffe (Hausbrand, Industrie)
Stickstoffmonoxid (NO)	Primär	Gas	Verbrennung, Autoabgas, natürliche Produktion
Stickstoffdioxid (NO_2)	Primär und sekundär	Gas	Hochtemperatur-Verbrennung (z. B. Automotor) oder Folgeprodukt von NO-Emission, Industrie, Düngerherstellung
Fluorwasserstoff (HF)	Primär	Gas oder Partikel	Superphosphat, Aluminiumindustrie
Äthylen (C_2H_4)	Primär	Gas	Verbrennung, Autoabgas, natürliche Produktion
Peroxyacetyl Nitrat (PAN)	Sekundär	Gas	Atmosphärische Umwandlung (Folgeprodukt von NO_2 und Kohlenwasserstoffen aus Autoabgasen)
Chlorwasserstoff (HCl)	Primär	Gas	Verbrennung von Kunststoffen
Schwermetalle (Cadmium, Blei, Zink usw.)	Primär	Partikel/ Niederschlag	Verbrennung, industrielle Prozesse
Ammoniak (NH_3)	Primär	Gas	Landwirtschaft, natürliche Produktion
Sulfat (SO_4^{2-})	Sekundär	Aerosol/ Niederschlag	Atmosphärische Umwandlung aus SO_2
Nitrat (NO_3^-)	Sekundär	Aerosol/ Niederschlag	Atmosphärische Umwandlung aus NO_2
Kohlendioxid (CO_2)	Primär	Gas	Verbrennung, natürliche Produktion

Tab. 1: Wichtigste pflanzenwirksame und/oder ökologisch relevante Luftinhaltsstoffe bzw. Luftsabdstoffe (nach HECK, 1982, und STADELmann, 1988).

Tab. 1 sind einige dieser Stoffe, welche pflanzenwirksam und/oder ökologisch relevant sind, aufgeführt. Die Luftverschmutzung kann natürlichen (Vulkanausbruch, Blitz, biologische Abbauprozesse) oder anthropogenen Ursprungs sein. Die meisten Luftverunreinigungen in der Schweiz sind auf menschliche Tätigkeiten zurückzuführen. Die wichtigsten Emissionsquellen sind der Automobil- und Lastwagenverkehr, die Industrie und das Gewerbe sowie die Haushalte: Tab. 2. Das Verbrennen von fossilen Brennstoffen (Erdölprodukten, Kohle usw.) in Verkehr, Haushalt und Industrie, das Verbrennen von Industrie- und Haushaltabfällen in Kehrichtverbrennungsanlagen sowie der Ausstoß von Schadstoffen bei industriellen Prozessen haben insbesondere seit den fünfziger Jahren zu einer deutlichen Zunahme der Luftverschmutzung geführt: Abb. 1. So hat beispielsweise die anthropogene NO_x -Emission durch den Automobilverkehr in der Schweiz von rund 2900 t N (9600 t NO_x) im Jahre 1950 auf 38 000 t N (125 000 t NO_x) im Jahre 1990 zugenommen. Außerdem gelangen beträchtliche Mengen umweltbedeutsamer Stoffe aus der Landwirtschaft in die Luft: Tab. 2.

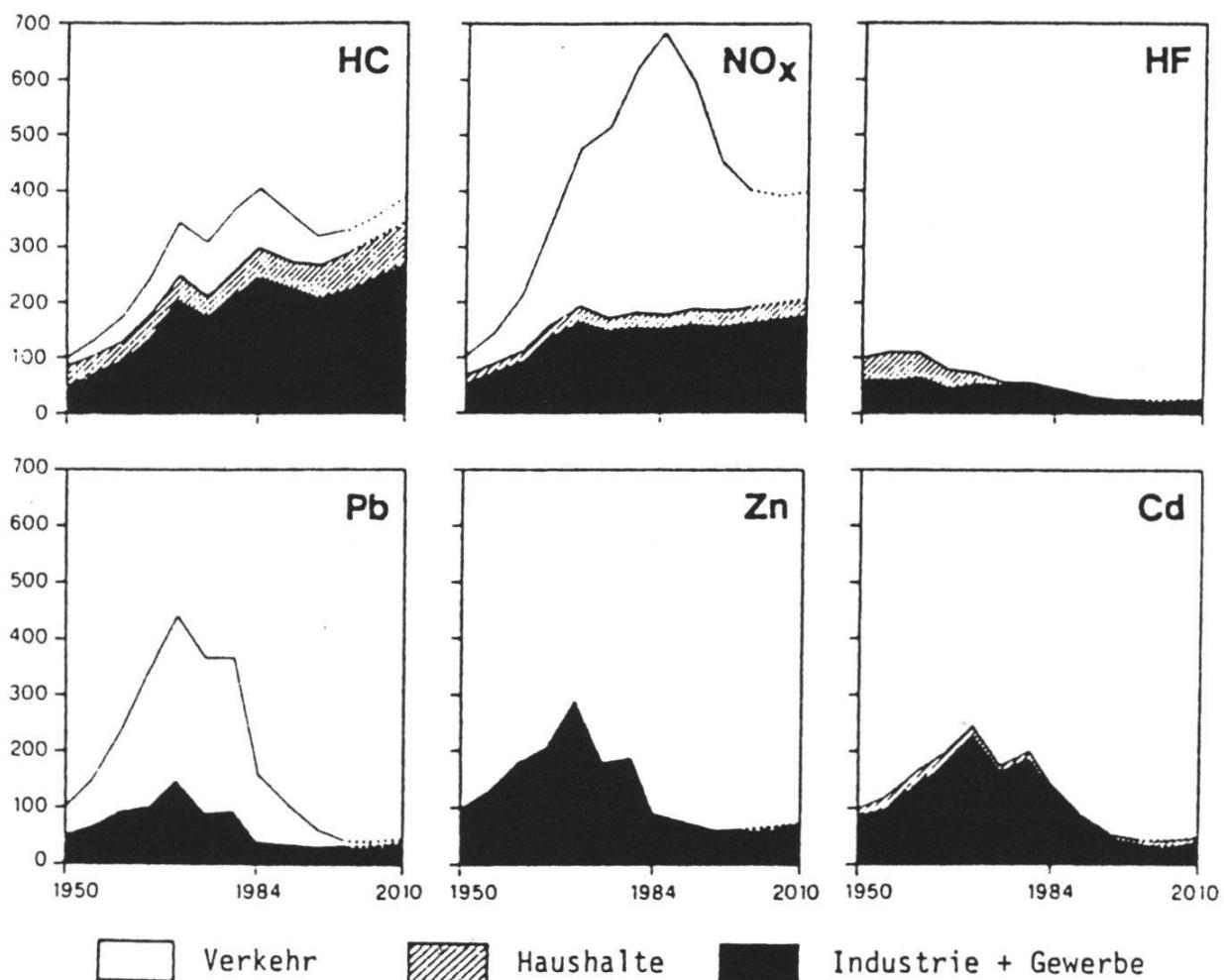


Abb. 1: Relative Entwicklung der Luftschaadstoff-Emissionen 1950–2010 in der Schweiz (nach BUS, 1987b inkl. Nachtrag Sept. 1988).

Luftschadstoff	Emission in t/Jahr			%ualer Anteil einzelner Quellengruppen an Gesamtemission				
	Gesamt	Natürlich	Anthropogen	Natür-lich	Ver-kehr	Haus-halt	Industrie/Gewerbe*	Land-wirtschaft
CO	431'450	1'050	430'400	<1	63	23	12	2
SO ₂	62'620	20	62'600	<1	7	23	70	<1
NO _x	192'800	9'000	183'800	5	65	5	22	3
VOC's (HC)**	347'000	50'000	297'000	14	19	13	54	<1
CH ₄	303'500	70'000	233'500	23	-	-	25	52
NH ₃	63'900	2'500	61'400	4	-	-	8	88
HCl	4'400	-	4'400	-	-	1	99	-
HF	160	-	160	-	-	4	96	-
Pb	440	-	440	-	65	1	33	1
Zn	530	-	530	-	<1	1	99	-
Cd	3	-	3	-	<1	12	88	-

* inkl. Abfallentsorgung; ** exkl. CH₄

Tab. 2: Geschätzte Emission einiger ökologisch und biologisch relevanter Luftschadstoffe in der Schweiz im Jahre 1990, nach Quellengruppen gegliedert (nach BUS 1987a, BUS 1987b und STAELMANN, 1990).

Der Ort, an dem ein Luftschadstoff ausgestoßen wird, heißt Emissionsquelle, der Ort, an dem er abgelagert wird, Depositionsort (Ablagerungsort). Die Einwirkung der deponierten Luftschadstoffe auf Pflanzen, Tiere, Böden usw. wird Immission genannt. Ein Stoff, der in der gleichen Form, in der er emittiert wurde, auch wieder deponiert wird (z.B. SO₂, HF = Fluorwasserstoff), ist ein Primärschadstoff (vgl. Tab. 1). Wird ein Primärschadstoff in der Luft in einen anderen Stoff umgewandelt (transformiert), so entsteht ein Sekundär(schad)stoff. So wird z.B. aus CO das CO₂, aus SO₂ das im sauren Regen vorhandene SO₄²⁻ (Sulfat), aus NO das NO₂ und NO₃⁻ gebildet. Ebenso werden Stoffe wie O₃, die aus Vorläufersubstanzen entstehen, als Sekundärschadstoffe bezeichnet. Luftinhaltsstoffe können über weite Distanzen verfrachtet (transmittiert) und so weit vom Emissionsort entfernt deponiert werden. Luftinhaltsstoffe (Schad- und Nutzstoffe) werden naß (Regen, Nebel, Tau) oder trocken (sedimentierende Stäube, Schwebestäube, Gase) abgelagert. Auf Einzelheiten bezüglich Transformations- und Depositionsprozesse sei auf STAELMANN (1989) verwiesen. Wichtig ist vor allem das Verständnis für die Bildung von O₃. Aus NO₂ wird unter Sonnenlicht (hv) NO + O gebildet. O reagiert mit O₂ in Gegenwart eines Energieabsorbers (z.B. CO₂, O₂, H₂O, N₂) zu O₃. O₃ zerfällt in Gegenwart von NO zu NO₂ + O₂. Die O₃-Bildung wird durch Peroxyl-Radikale, welche bei der troposphärischen Oxidation von flüchtigen organischen Verbindungen (VOCs; früher auch Kohlenwasserstoffe = HC genannt) entstehen, verstärkt. Sowohl NO und NO₂ als auch die VOCs sind primär anthropogenen Ursprungs (Verkehr, Industrie/Gewerbe: Tab. 2).

Die Luftverschmutzung ist räumlich und zeitlich verschieden stark. Schwermetalle wie Blei (Pb), Cadmium (Cd) und Zink (Zn) werden vor allem lokal in der Nähe von

metallverarbeitenden Industrien, Kehrichtverbrennungsanlagen, Autobahnen usw. deponiert, die Immission von HF erfolgt vor allem regional in der Nähe von Aluminiumhütten. O_3 kann national in sehr hohen Konzentrationen, besonders auf dem Lande, auftreten. SO_2 ist im Winter in höheren Mengen in der Luft vorhanden als im Sommer, dafür sind die O_3 -Gehalte im Sommer (Sonneneinstrahlung) höher als im Winter. Die O_3 -Gehalte sind am Tage, vor allem im Mittelland, in der Regel höher als in der Nacht. Die räumlich-zeitlichen Unterschiede sind für die Risikobeurteilung äußerst wichtig.

3. Auswirkungen der Luftverschmutzung

3.1. Auswirkungen auf aquatische Ökosysteme

Regenwasser, Schnee und Nebel enthalten eine Vielzahl von Schadstoffen wie Schwermetalle, organische Schadstoffe (z.B. nitrierte Phenole, Pyrene, Fluoranthrene, Phenanthren, n-Alkane), Säuren (HNO_3 , H_2SO_4) und säurebildende Stoffe (z.B. NH_4^+), z.T. in sehr hohen Konzentrationen (GIGER, 1986; STUMM, 1986; WANNER, 1988; HERTZ et al., 1988). Typisch schweizerisches Regenwasser (ohne alpine Gebiete) hat einen pH-Wert von 4,3. Ein lediglich mit CO_2 der Atmosphäre im Gleichgewicht stehendes Regenwasser müßte eine etwa 20mal geringere Konzentration an freien H-Ionen aufweisen ($pH \approx 5,6$). Trotzdem sind die Folgen saurer Niederschläge auf Böden und aquatische Ökosysteme in der Schweiz im Vergleich zu Skandinavien gering, da unsere Böden und Sedimente fast überall hohe Anteile an Karbonaten (Kalk) enthalten, die die überschüssige Säure neutralisieren. Eine Ausnahme bilden gewisse saure Bergseen im Tessin, die in kristallinen bzw. kalkfreien Gebieten liegen. Die Verwitterung von Granit, Gneis und Glimmerschiefer bzw. die Reaktion von Säureionen mit diesen Gesteinen erfolgt viel langsamer als die Auflösung von Karbonaten. Nach SCHNOOR et al. (1983) weisen etwa 20 Tessiner Bergseen pH-Werte < 6 auf (tiefster pH-Wert 4,6). Erhöhte Wasserstoffionen- und Schwermetall-Konzentrationen können in Gewässern das Aussterben ganzer Lebensgemeinschaften (vom Einzeller bis zum Fisch) verursachen. Liegen im Einzugsgebiet von Gewässern (Seen, Flüsse, Grundwasser) Böden mit schlechter Pufferkapazität, die aufgrund der Depositionen versauern, können vermehrt Schwermetallionen und andere Kationen in die Gewässer gelangen. Zudem können überschüssige N- und S-Depositionen als NO_3^- bzw. SO_4^{2-} aus dem Boden ausgewaschen werden.

3.2. Auswirkungen auf terrestrische Ökosysteme

3.2.1. Wege, Orte, Formen und Faktoren der Wirkung (Übersicht)

Die Wirkung von Luftschaadstoffen auf Böden und Vegetation, auf terrestrische Ökosysteme wie Agrar-, Forst- und naturnahe Ökosysteme (z.B. Moore, Magerwiesen) ist äußerst komplex und hängt von einer Vielzahl von Faktoren ab (STADELmann, 1989).

LUFTVERSCHMUTZUNG

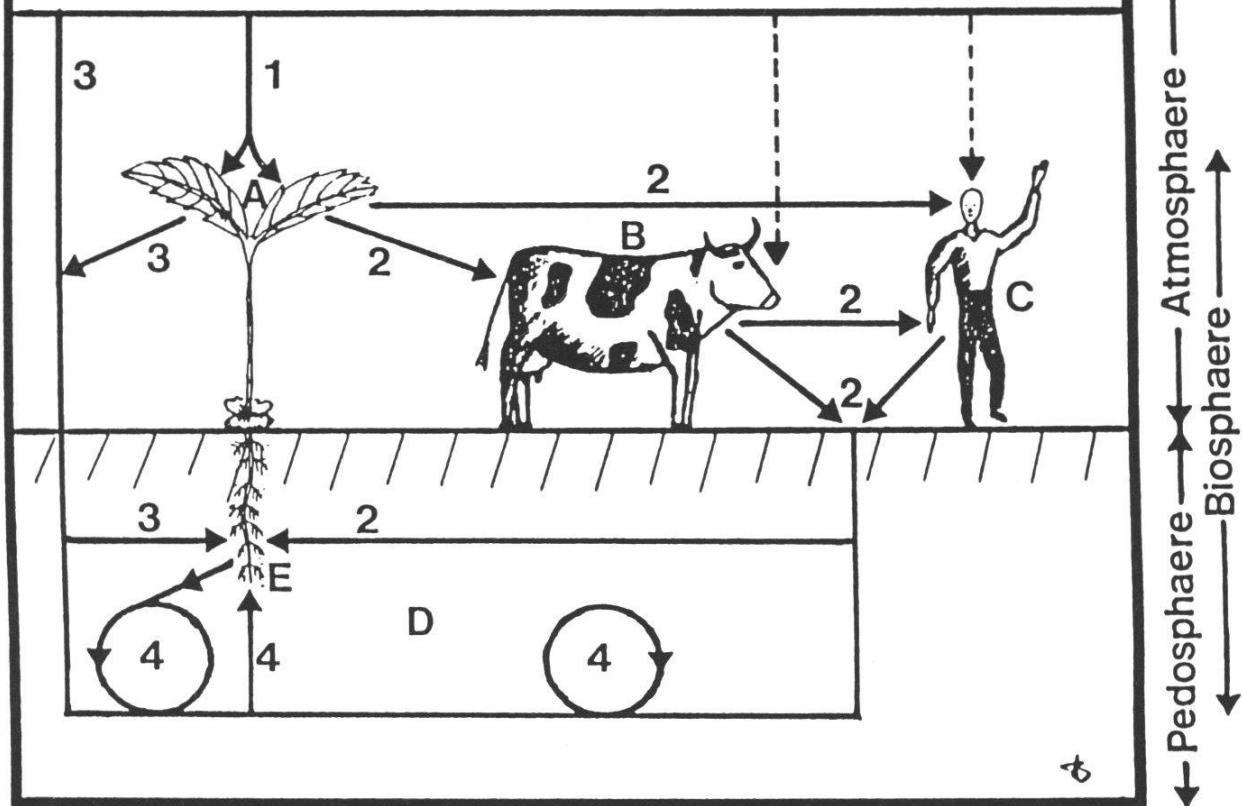


Abb. 2: Einfluß der Luftverschmutzung auf die Vegetation, illustriert am Beispiel der landwirtschaftlichen Pflanzenproduktion: Wirkungswege (1–4) und Wirkungsorte (A–E). 1–4 = Wirkungswege (Erklärung im Text). A = Sproß (oberirdische Pflanzenorgane, Blätter); B = Tier; C = Mensch; D = Boden; E = Unterirdische Pflanzenorgane (Wurzeln). Gestrichelte Linien: Direktwirkung der Luftverschmutzung auf Mensch und Tier (nach STADELmann und FUHRER, 1986).

In Abb. 2 werden Wirkungsorte und Wirkungswege der Luftschadstoffe auf die Vegetation am Beispiel der landwirtschaftlichen Pflanzenproduktion illustriert: Ge-wisse Schadstoffe wie Pb oder Cd können Nahrungs- und Futterpflanzen kontaminieren, ohne daß die Pflanzen dabei physiologisch beeinträchtigt werden; diese Schadstoffe können aber über die Pflanzen in die Nahrungskette gelangen und erst beim Konsumenten (Mensch, Tier) ihre Wirkung entfalten. Über die tierischen und menschlichen Ausscheidungen gelangen diese Stoffe in Form von Hofdüngern (Mist, Gülle) und Klärschlamm in den Boden. Die eigentliche Wirkung der Luftschadstoffe auf die Pflanzen kann direkt oder indirekt, primär oder sekundär sein. Die direkte Wirkung erfolgt über die oberirdischen Pflanzenorgane, über den Blatt-Sproß-Pfad, die indirekte Wirkung über die unterirdischen Pflanzenorgane, den Boden-Wurzel-Pfad.

Für die Pflanze ist die direkte Schadstoffwirkung in der Regel kurzfristig, die indirekte längerfristig bedeutsam. Luftschatdstoffe wie Zn und Cd können sich im Boden in so hohen Konzentrationen anreichern, daß sie die Funktionstüchtigkeit der Wurzeln und der Mykorrhiza beeinträchtigen. Schadstoffe wie HNO_3 und H_2SO_4 können zur Bodenversauerung und Schwermetallmobilisierung, welche sich ungünstig auf die Vegetation auswirken, beitragen. Direkte primäre Wirkungen von Streß- bzw. Belastungsfaktoren wie O_3 , PAN oder NO_2 können sich in morphologisch-anatomischen, biochemischen und physiologischen Veränderungen äußern oder sich als Störungen von Wachstum, Ertrag, Qualität und Lebensdauer von Pflanzen zeigen. Sekundäre Wirkungen sind z.B. veränderte Frost- und Trockenresistenz sowie Krankheitserreger- und Parasitenresistenz (STADELmann, 1989).

Luftschatdstoffe können bei der Vegetation auf verschiedenen Organisationsstufen, die von der molekular-subzellulären Stufe (z.B. Enzymreaktion) über die zelluläre Stufe, die Organe (z.B. Blatt, Blüte), das Individuum = Einzelpflanze (z.B. Wachstum, Ertrag), eine Population (z.B. Konkurrenz, Selektion), eine Artengemeinschaft (Pflanzengesellschaft) bis zu einem Ökosystem reichen kann, einwirken. Längerfristig ist sicher die destabilisierende Wirkung von Schadstoffdepositionen auf Pflanzengesellschaften (KUHN et al., 1987) und terrestrische Ökosysteme (MURACH and ULRICH, 1988) als am bedeutsamsten zu gewichten.

Die Reaktion der Pflanzen auf Luftschatdstoffe kann reversibel oder irreversibel sein (STADELmann, 1989). Ist die Widerstandskraft einer Pflanze, welche z.B. auf Entgiftungsreaktionen beruhen kann, überfordert, so kommt es zu einer Schädigung. Die Schädigung kann akut, chronisch oder latent sein. Akute Schädigungen treten vornehmlich nach Einwirkungen hoher Schadstoffkonzentrationen während kurzer Zeit in Form von Blatt-Nekrosen als sichtbares Symptom auf. Es kommt zu Gewebezerstörungen (z.B. Palisadenparenchym der Blätter) und zum Absterben von Blüten, Pflanzenorganen oder ganzen Pflanzen. Daneben treten bei empfindlichen Pflanzenarten und -sorten in der Regel punktförmige Nekrosen auf den Blättern auf. Chlorosen (Blattvergilbungen) treten als Symptome chronischer Schädigungen über längere Zeitspannen auf. Chronische Schädigungen können sich bei Waldbäumen auch in Form einer Verminderung der Blattmasse und des Wuchses zeigen. Latente Schädigungen sind äußerlich nicht feststellbare, unsichtbare Wirkungen im biochemisch-physiologischen Bereich, die mit Wachstums- und Ertragsminderungen, gestörten Symbiosen, veränderter Anfälligkeit gegenüber Krankheitserregern und Schädlingen, verminderter Trocken- und Frostresistenz oder vorzeitiger Alterung (Seneszenz) verbunden sein können.

Bei hohen Schadstoffkonzentrationen, z.B. O_3 -Konzentrationen, wie sie heute an Sommertagen auftreten, sind aus Labor- und Feldversuchen folgende Reaktionen an landwirtschaftlichen und/oder forstwirtschaftlichen Pflanzen bekannt (STADELmann, 1989): Wachskristallveränderungen an der Blatt- bzw. Nadeloberfläche, Verminderung der CO_2 -Assimilation (Photosynthese), Bildung von toxischen Zwischenprodukten (z.B. Peroxiden) in Blättern, Bildung und Aktivitätssteigerung von Enzymen (z.B. Katalase, Peroxidase), Gewebezerstörungen in Form punktförmiger Nekrosen auf den Blättern, vorzeitige Alterung und Fall von Blättern, verminderter Transport von Assimilaten in die Wurzel, reduziertes Verhältnis von Wurzel- zu Sproßmasse, verringerte Mykorrhizierung von Baumwurzeln verbunden mit reduzierter Wasser- und Nähr-

stoffversorgung aus dem Boden, veränderter Schädlings- und Pathogenbefall, veränderte Pflanzenqualität (FUHRER et al., 1990), Wachstumsstörungen und Ertragseinbußen.

Art und Ausmaß der Wirkung von O_3 und anderen Luftschadstoffen hängen von der Schadstoffbelastung (Schadstoffdosis = Schadstoffkonzentration \times Expositionsduer) und von der Belastbarkeit der Pflanzen ab. Diese Belastbarkeit wird durch eine Vielzahl von äußerer (Klimafaktoren wie Temperatur, Wasserverfügbarkeit, Strahlung, Tageslänge, Luftfeuchtigkeit, Windgeschwindigkeit, gleichzeitige Präsenz anderer Schadstoffe usw.) und inneren Faktoren (Art, Sorte, Alter und Entwicklungsstadium der Pflanze) bestimmt.

3.2.2. Beispiele positiver Wirkungen auf die Vegetation

Der gleiche Luftinhaltsstoff kann je nach Bedingungen ein Nutz- oder Schadstoff sein. Entscheidend für die Wirkung sind Art und Belastungsgrad des Luftinhaltstoffs sowie Belastbarkeit der Pflanzen und Böden. Bestimmte Luftinhaltstoffs sind in jedem Fall Schadstoffe (z.B. Cd, Pb und O_3). Andere Stoffe wie Zn, NO, NO_2 , NH_3 und SO_2 sind in geringen Mengen Nutz-, in hohen Mengen Schadstoffe. So können die Gase NO, NO_2 und NH_3 sowie NH_4^+ und NO_3^- von den Pflanzen als N-Dünger, das Gas SO_2 sowie SO_4^{2-} als Schwefel-Dünger verwendet werden (Düngung aus der Luft).

Die mittleren jährlichen Pflanzennährstoffeinträge in der Landwirtschaft aus der Luft betragen schätzungsweise 10 000–30 000 kg CO_2 , 30–60 kg N (exkl. N₂-Bindung), 20–60 kg Schwefel, 10 kg Calcium, 1 kg Phosphor, 1 kg Kalium, 1–2 kg Magnesium pro ha landwirtschaftlicher Nutzfläche (STADELmann, 1988). In der Nähe von bestimmten Emittenten sind die Einträge größer. Z.B. nehmen die NO_x -Depositionen mit zunehmender Nähe zur Autobahn zu. So wurde eine jährliche N-Deposition in Form von NO und NO_2 in 30 m Entfernung zur Autobahn (N1 Kirchberg) von 30 kg N/ha landwirtschaftlicher Nutzfläche ermittelt (NEFTEL et al., 1991). Dies äußerte sich u.a. darin, daß bei gleicher Düngung die Fahnenblätter von Sommerweizen mit zunehmender Nähe zur Autobahn höhere NO_3^- -Gehalte aufwiesen. Die Einträge der Luftinhaltstoffs sind in Wäldern aufgrund der größeren Pflanzenoberfläche bzw. Interzeption i.d.R. höher als bei landwirtschaftlichen Kulturen.

3.2.3. Beispiele negativer direkter Wirkungen auf die Vegetation

Das Überschreiten der O_3 -Immissionsgrenzwerte der Luftreinhalte-Verordnung (LRV, 1985), wie dies landesweit während der letzten Jahre in den Sommermonaten beobachtet werden konnte, führt zu Schäden und Ertragseinbussen an landwirtschaftlichen Kulturen. Während und nach Perioden mehrmaligen Überschreitens des Immissionsgrenzwertes von $120 \mu\text{g O}_3/\text{m}^3$ (1-h-Mittelwert) können im Freiland akute, sichtbare Schädigungen an Weißkleeblättern (erkennbar an der feinen Punktierung) beobachtet werden (BECKER et al., 1989, Abb. 3). Akute Schädigungen (Blattflecken) können bei freilandüblichen O_3 -Dosen auch an Rotkleeblättern (LÜTHI-KRAUSE et al., 1989) und Blättern von Birkenstecklingen (MATYSSEK et al., 1991) registriert werden.

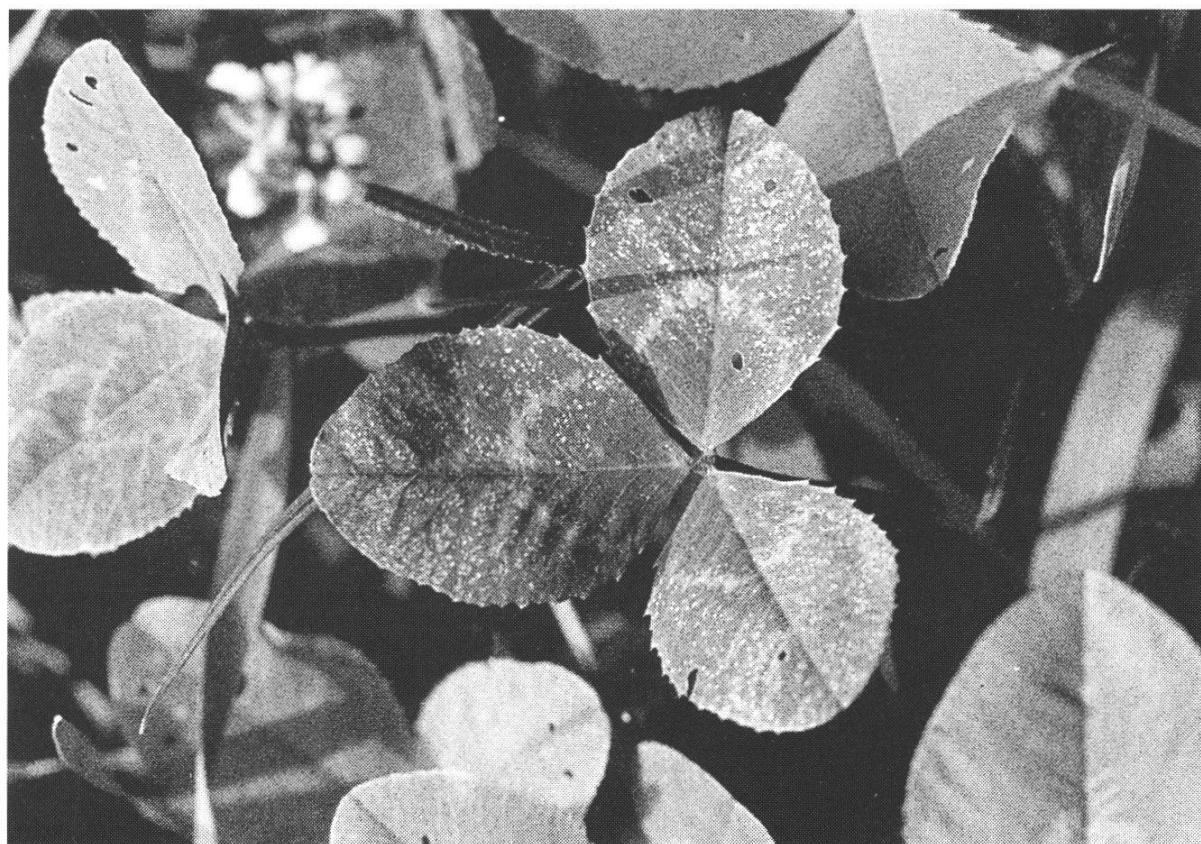


Abb. 3: Akute, sichtbare Ozonschädigungen an Weißklee (punktformige Nekrosen) im Freiland während des Sommers (Foto: J. Fuhrer).

In einem dreijährigen Feldexperiment im schweizerischen Mittelland konnte unter Verwendung der «open-top»-Begasungskammer-Technik gezeigt werden, daß der Körnertrag der Sommerweizensorte Albis im Mittel um 9 % höher liegen würde, wenn die saisonale O₃-Konzentration der Luft um die Hälfte reduziert würde (FUHRER et al., 1989a, Abb. 4).

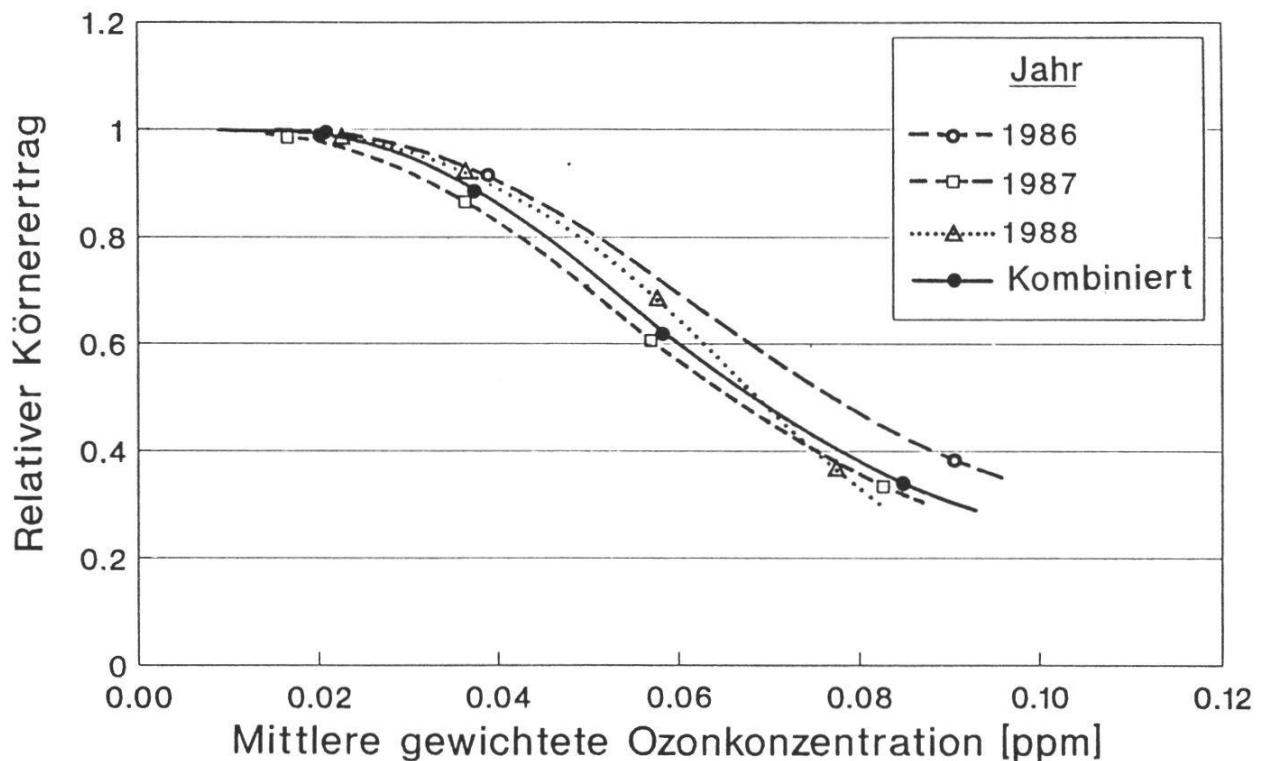


Abb. 4: Exposition-Wirkungskurven zwischen O₃-Konzentration und relativem Körnertrag von Sommerweizen (*Triticum aestivum*, cv. Albis), ermittelt in einem Feldexperiment mit Hilfe der «open-top»-Begasungskammer-Technik im schweizerischen Mittelland (Oeschberg/BE) (nach FUHRER et al., 1989a).

Modellrechnungen ergaben auf Basis der O₃-Belastung der Jahre 1987/1988 unter Berücksichtigung von 8 Regionen und 7 Kulturgruppen im Mittel kulturspezifische Gefährdungsgrade (relative Ertragsverluste) von 10,7 % bei Reben, 8,4 % bei Kulturswiesen, 5,5 % bei Rüben, 3,3 % bei Hülsenfrüchten, 1,6 % bei Weizen, 0,5 % bei Mais und 0,3 % bei Feldgemüse sowie regionale relative Flächenverluste (Flächen, welche zur Kompensation der O₃-bedingten Verluste zusätzlich angebaut werden müssten) zwischen 2,0 % (östliches Mittelland) und 8,6 % (Westschweiz): Abb. 5 (FUHRER et al., 1989b).

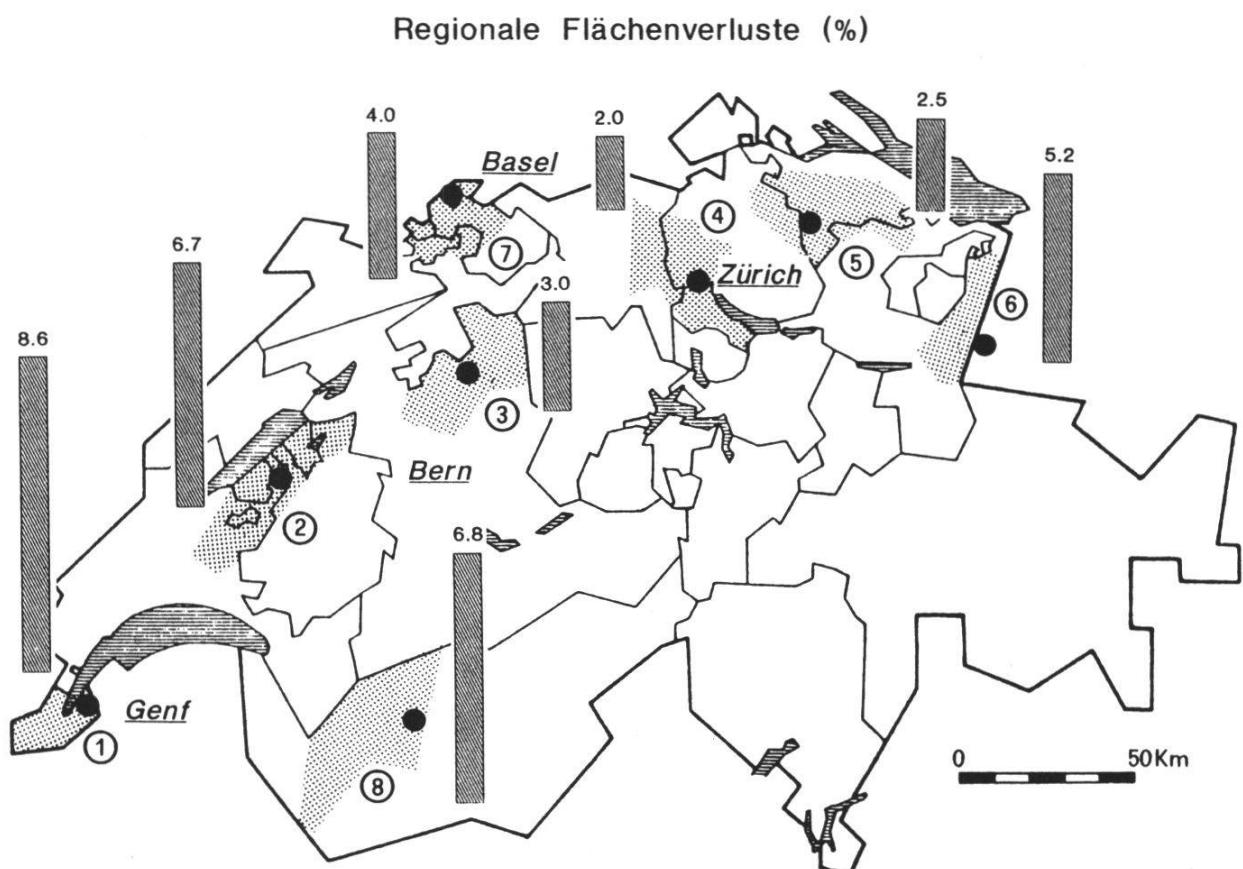


Abb. 5: Durch O₃ bedingte regionale Flächenverluste (potentielle Ertragsverluste gewichtet mit den Anbauflächen; Modellrechnung) (nach FUHRER et al., 1989b).

Wie Abb. 6 und Abb. 7 zeigen, sind die Reaktionen der Pflanzen (z.B. Nettophotosynthese, Blattschädigung) nicht nur von der O₃-Konzentration bzw. der O₃-Dosis abhängig, sondern auch sehr stark von der Pflanzengruppe und Pflanzenart, ja sogar von der Pflanzensorte. Landwirtschaftliche Kulturen reagieren empfindlicher als Laubholzarten und diese empfindlicher als Koniferen. Die Weißkleesorte Ladino Sacramento mit einer höheren Stomata-Dichte weist bei hohen O₃-Konzentrationen mehr Blätter mit Schäden auf als die Sorte Milkanova mit einer kleineren Stomata-Dichte (BECKER et al., 1989).

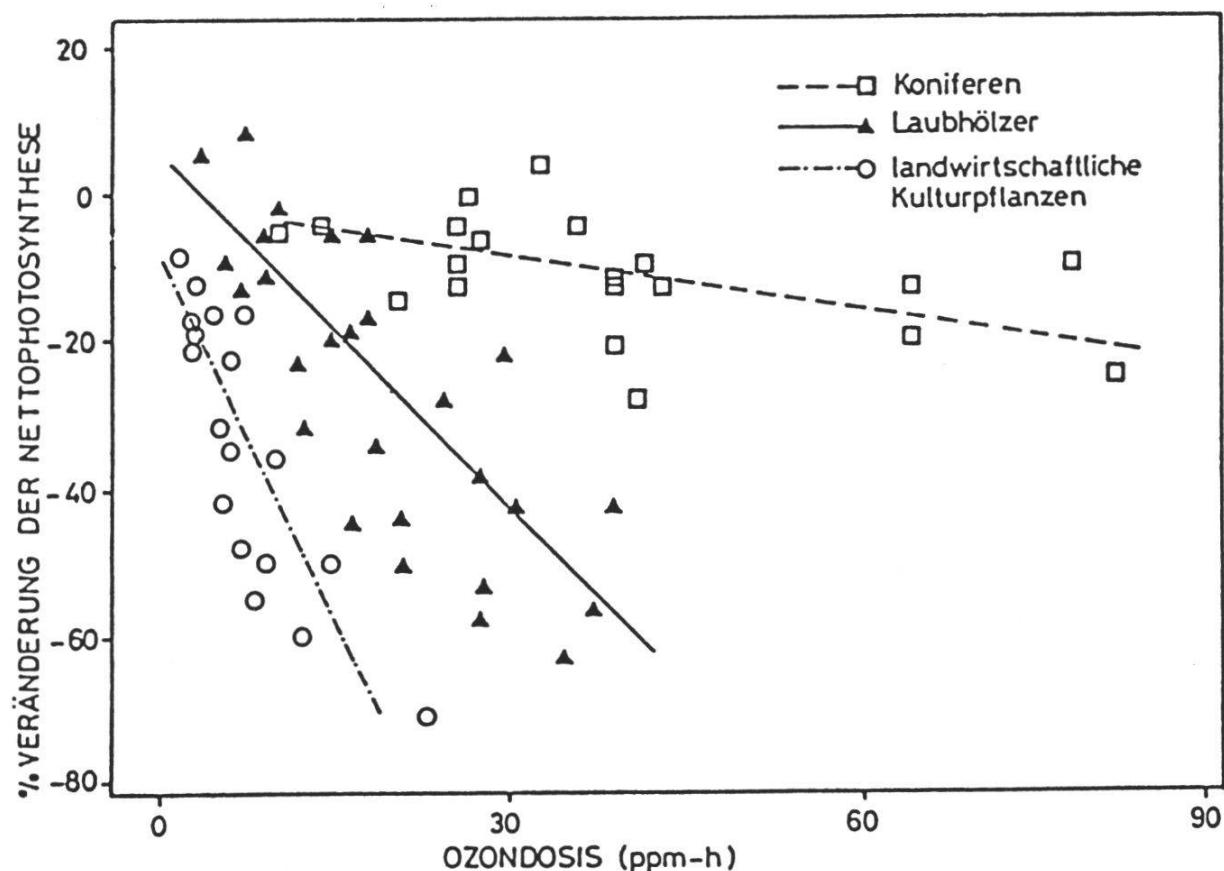


Abb. 6: Wirkungsbeziehungen zwischen O₃-Dosis und Nettophotosynthese bei verschiedenen Pflanzengruppen (nach REICH, 1987, und BUWAL, 1989).

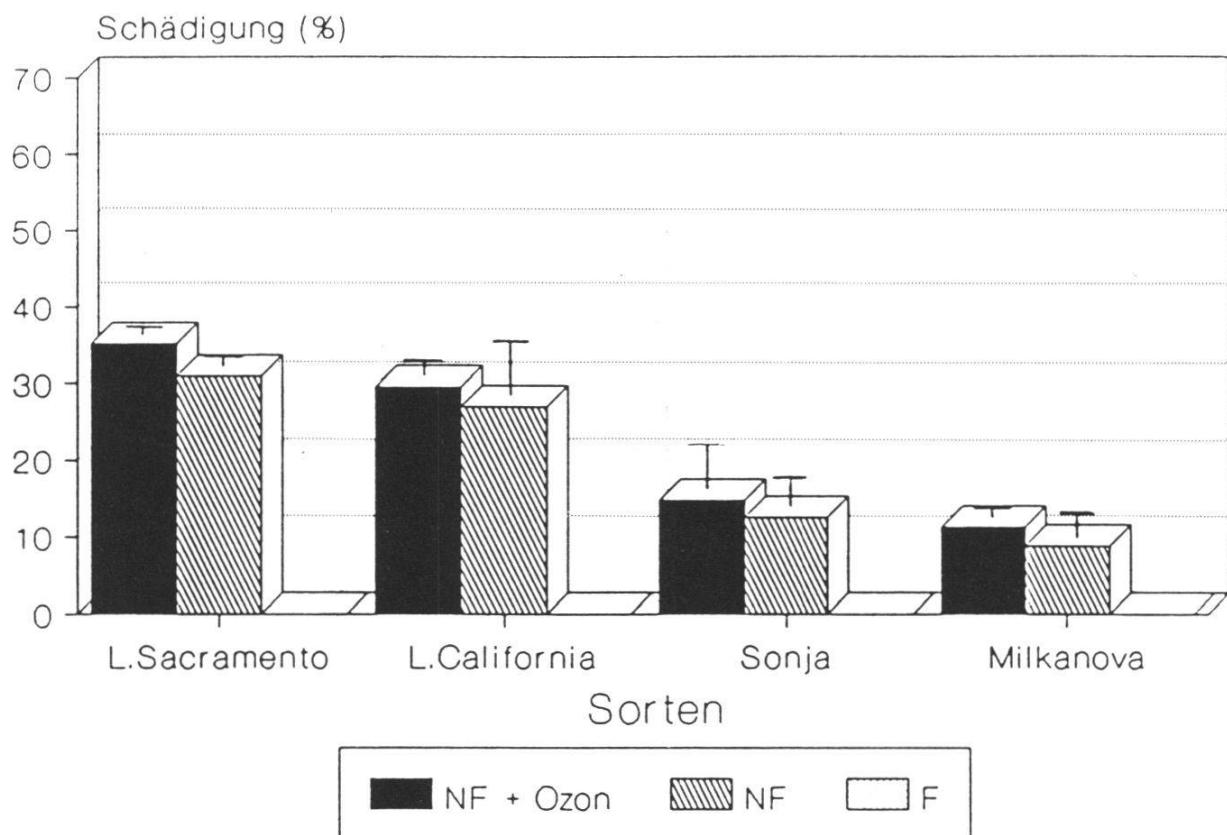


Abb. 7: Blattschädigungen (visuelle Bonitierung) von Weißkleesorten durch O₃ in «open-top»-Begasungskammern nach 28 Tagen Wachstum. NF = Unfiltrierte Luft (8 h-Mittelwert = 0,39 ppm O₃); F = Aktivkohle-gefilterte Luft (8 h-Mittelwert = 0,25 ppm O₃); NF + O₃ (8 h-Mittelwert 0,41 ppm O₃; Spitzenkonzentration 3 x 0,80 ppm O₃) (nach BECKER et al., 1989).

3.2.4. Beispiele negativer indirekter Wirkungen auf die Vegetation über die Veränderung der Bodeneigenschaften

In der näheren Umgebung von Kehrichtverbrennungsanlagen (CONTAT et al., 1989), Sondermüllanlagen, Metallverarbeitungs-, Veredelungs-, Zementindustrie-, Papier-, Karton- und Chemiebetrieben sowie National- und Kantonsstraßen enthalten Böden i.d.R. übernatürlich hohe Schwermetallgehalte (VOGEL et al., 1989). Teilweise werden in diesen Böden die Totalgehalt-Richtwerte einzelner Schwermetalle wie Zn, Cd, Quecksilber (Hg) und Pb gemäß Verordnung über Schadstoffe im Boden (VSBo, 1986), selten auch die löslichen Gehalt-Richtwerte einzelner Schwermetalle überschritten. So war z.B. 27 Jahre nach der Autobahneröffnung an der N1 in Kirchberg eine bis zu einer Distanz zwischen 6 und 18 m autobahnbedingte, distanzabhängige Pb-, Zn- und Cd-Anreicherung im Kulturboden feststellbar (NEFTEL et al., 1991). Die Totalgehalt-Richtwerte für Pb (Abb. 8), Zn und Cd waren in der Bodenschicht 0–20 cm in einer

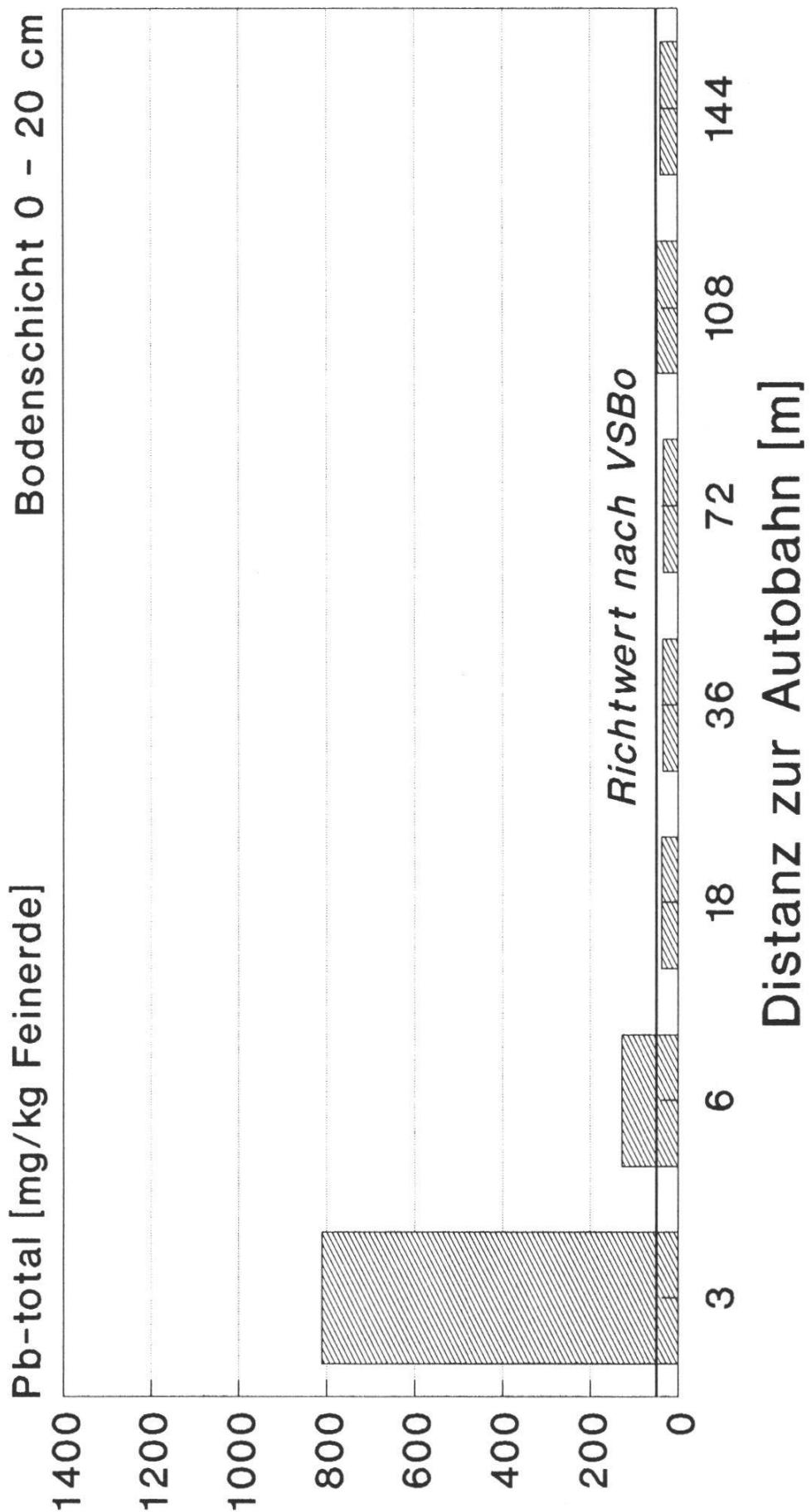


Abb. 8: Bleigehalt des Bodens in Abhängigkeit von der Distanz zur Autobahn (N1 Kirchberg/BE), nach 27jähriger Autobahnbenutzung (nach NEFTEL et al., 1991).

1950

1990

112.6

56.4

60.0

52.6

40

16.4

NH3-N NOx-N Gesamt

NH3-N NOx-N Gesamt

Natürlich

Landwirtschaft

Verkehr

Industrie/Haushalte

Industrie/Haushalte

Industrie/Haushalte

Abb. 9:

Jährliche Emission der biorelevanten N-Gase NH_3 und NO_x in die Atmosphäre aus verschiedenen Quellengruppen (Schätzung für die Schweiz). Vergleich zwischen 1950 und 1990 (nach STADELMANN, 1992).

Distanz von 3 m zur Autobahn überschritten, für Pb und z.T. Cd auch in einer Distanz von 6 m, nicht aber in einer Distanz von 18 m. Wegen der günstigen Bodeneigenschaften (hoher pH-Wert, schwer) war an diesem Untersuchungsstandort keine Richtwertüberschreitung nach VSBo (1986) der löslichen biorelevanten Pb-, Zn- und Cd-Gehalte der Böden feststellbar, auch bei einer Distanz von 3 m zur Autobahn nicht. Anders sind schwermetallkontaminierte Böden langfristig und bei ungünstigen Bodeneigenschaften (tiefer pH-Wert, leicht, humusarm) zu beurteilen. In solchen Fällen muß mit phytotoxischen Wirkungen und einer Beeinträchtigung der Bodenmikroorganismen und ihrer Leistungen gerechnet werden (STADELmann und SANTSCHI-FUHRIMANN, 1987; HAENI, 1988; GISI et al., 1990).

Die Emission der biorelevanten N-Verbindungen NH_3 und NO_x hat sich seit 1950 rund verdoppelt (STADELmann, 1990; STADELmann 1992): Abb. 9. Es muß davon ausgegangen werden, daß sich seither somit auch die in die terrestrischen Ökosysteme deponierte N-Menge rund verdoppelt hat. Meßergebnisse bestätigen diesen Trend (FLÜCKIGER, 1988). NO aus Verkehr, Industrie und Haushalt und das daraus gebildete NO_2 , HNO_2 und HNO_3 können zusammen mit NH_3 und NH_4^+ aus der Landwirtschaft zu einer Überdüngung und Versauerung der Wälder und naturnahen Ökosysteme führen. Es bestehen deutliche Indizien, daß diese N-Überdüngung und Bodenversauerung im Zusammenhang mit den neuartigen Waldschäden, dem Verschwinden von Pflanzenarten (Tab. 3) und der potentiellen Destabilisierung von Wald- und naturnahen Ökosystemen (z.B. Mooren, Magerwiesen) vermehrt beachtet werden sollten (FLÜCKIGER, 1988; STADELmann, 1989).

	Anzahl 1938	davon abge- hend	neu auf tretende Arten	Arten- zahl 1984	Artenmenge in in % von 1938	
					a)	b)
Baumarten	7,1	2,5	1,1	5,7	80,3	81,3
Straucharten	6,8	4,9	1,0	2,9	42,6	38,8
Phanerogamen + Pteridophyten	25,2	15,3	6,3	16,4	65,1	66,7
Moose und Flechten	8,0	4,8	2,5	5,7	71,2	75,1

a) = Veränderung der mittleren Artenzahl; b) = Mittelwert der prozentualen Veränderung

Tab. 3: Veränderung der Pflanzenartenzahlen in ausgewachsenen Mittelwäldern auf sauren Böden der Nordschweiz (zwischen Zürich und Schaffhausen) (Querco-Betuletum ETTER, 1943) im Zeitraum 1935/39 bis 1984. Mittelwerte aus 10 Standorten (nach KUHN et al., 1987).

3.3. Auswirkungen auf Mensch und Tier

Heute sind folgende direkte und indirekte Auswirkungen der Luftschadstoffe auf die menschliche Gesundheit bekannt (WANNER, 1988): Geruchsbelästigungen, Augen-, Nasen- und Halsreizungen, Beeinträchtigung der Atemfunktionen und der körperlichen Leistungsfähigkeit, häufigeres Auftreten von Asthma-Anfällen und chronischer

Bronchitis, erhöhte Anfälligkeit für Infektionen der Atemwege sowie erhöhte Gefährdung bei Herz- und Kreislaufkrankheiten. Bei Tieren sind zudem folgende Effekte bekannt: Schädigung der Atemwege, Verminderung der Vitalität und des Wachstums, erhöhte Sterblichkeit, starker Rückgang oder starke Förderung einzelner Tierarten infolge Veränderung der Ökosysteme (Boden, Gewässer und Futterpflanzen). Die direkte Wirkung der Luftschatdstoffe über die Atemwege scheint nach heutigen Kenntnissen viel bedeutsamer als die indirekte Wirkung über die (relativ geringe) Resorption von Luftschatdstoffen aus kontaminierten Nahrungs- und Futtermitteln zu sein (LINDT et al., 1990). Obwohl z.B. Gras mit zunehmender Nähe zur Autobahn höhere Pb-Gehalte aufweist (Abb. 10), werden die Pb-Gehalte nach heutigen toxikologischen Kenntnissen nicht als kritisch betrachtet (vgl. Tab. 4). Dasselbe gilt für Pflanzenproben aus der Umgebung von Kehrichtverbrennungsanlagen: Tab. 4.

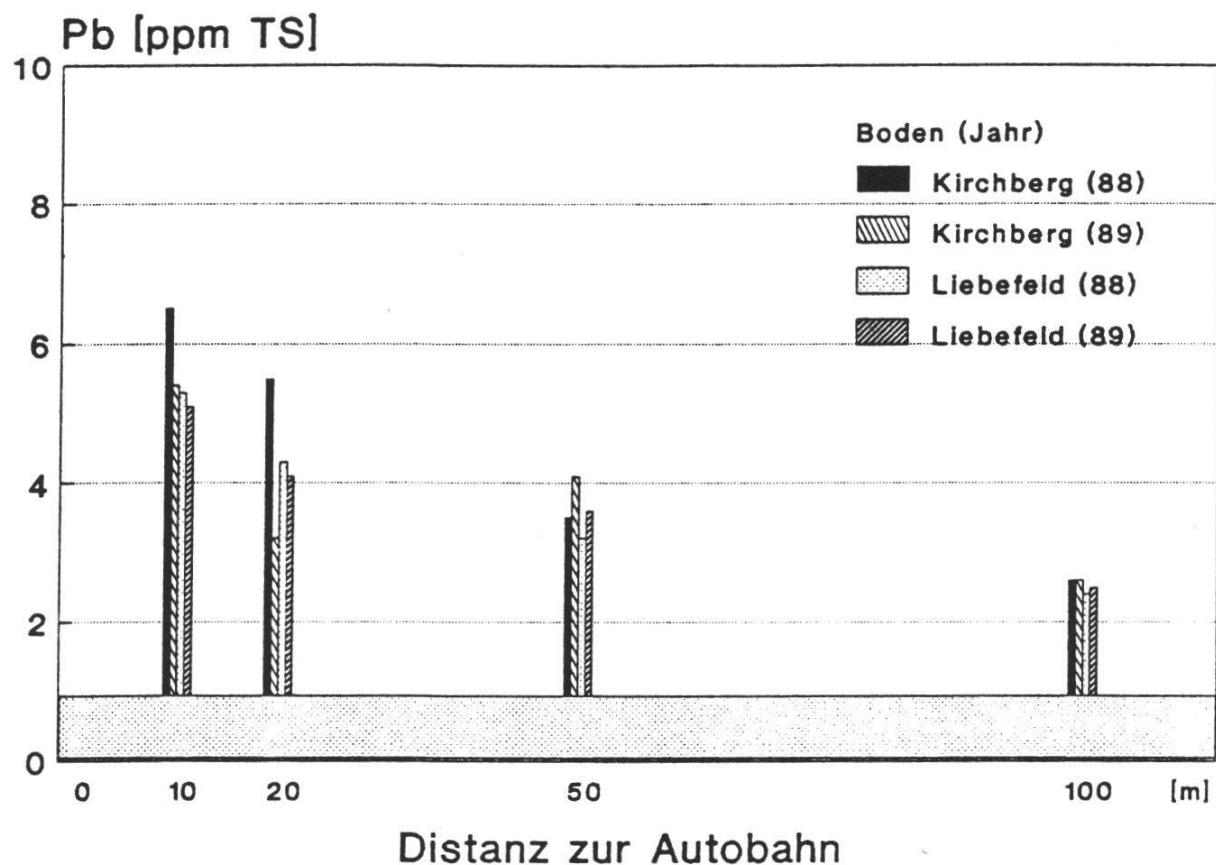


Abb. 10: Bleigehalt von Raygras, gewachsen auf autochthonem (Kirchberg) und ausgetauschtem (Liebefeld) Boden in Abhängigkeit von der Distanz zur Autobahn (N1 Kirchberg/BE). Mittelwert aller Schnitte. Punktierter Bereich (<1 ppm) stellt nach LINDT et al. (1990) den Normalbereich dar (nach NEFTEL et al., 1991).

Substanz	Mittel	Min.	Max.	% der KVA über Nor- malgehalt	Normal- gehalt	stark er- höhter Gehalt*
Pb (mg/kg)	3,47	1,70	6,38	19	5	10 - 30
Cd (mg/kg)	0,32	0,12	0,84	88	0,15	0,5 - 1
Cu (mg/kg)	13,8	10,0	25,8	100	7	100 - 200
Zn (mg/kg)	49,9	37,0	59,3	94	40	150 - 250
Mn (mg/kg)	65,5	32,5	92,5	0	100	200 - 400
Hg (µg/kg)	50,9	11,7	125	25	70	500 - 2000
F (mg/kg)	13,6	5,75	24,9	100	5	30 - 100
S (%)	0,28	0,22	0,36	100	0,2	0,3 - 0,4
Cl (%)	0,80	0,45	1,37	69	0,6	---
PCB** (µg/kg)	118	40,3	245	100	25	1000 - 3000

* Als Nahrungspflanze nicht, als Futterpflanze bedingt geeignet (nach LINDT et al., 1990)

** Werte im Jahre 1985

Tab. 4: Mittlerer Schadstoff- bzw. Elementgehalt von Grasproben in der Umgebung (Distanz 200–300 m) von 16 Kehrichtverbrennungsanlagen (KVA) im Jahre 1986 im Vergleich zu Normalgehalt und stark erhöhtem Gehalt (bezogen auf TS) (nach CONTAT et al., 1989).

4. Maßnahmen

Das Wiederherstellen von natürlicher, reiner Luft innerhalb von absehbarer Zeit ist aus wirtschaftlichen Gründen unrealistisch. Ziel muß es aber sein, die anthropogene Luftbelastung mit Schadstoffen auf ein Maß zu verringern, das für Mensch, Tier und Vegetation verantwortbar ist und die langfristige Funktionstüchtigkeit der terrestrischen und aquatischen Ökosysteme nicht gefährdet. Dazu sind technische, politische und persönliche Maßnahmen nötig.

Als technische Maßnahmen fallen u.a. in Betracht: Katalysatoren für Fahrzeuge, Filter und Entstickungseinrichtungen für Kehrichtverbrennungsanlagen, richtige Dimensionierung und Einstellung von Feuerungsanlagen, Gebäudeisolationen, Substitution von giftigen Stoffen wie Cd und Hg, Rezyklierung von giftigen Stoffen (z.B. Batterien).

Wichtige politische Schritte sind mit den Emissions- und Immissionsvorschriften (z.B. Grenzwerten) der LRV (1985), mit dem Luftreinhaltekonzep des Bundesrates (LRK, 1986) sowie anderen Ge- und Verboten eingeleitet. Diese Vorschriften gilt es zu vollziehen. Dazu sind An- und Abreizsysteme und Lenkungsabgaben zu prüfen. Mutige politische Entscheide können durchaus erfolgreich sein, wie die Beispiele von Pb, Zn, Cd und HF zeigen: Abb. 1. So hat z.B. die Pb-Deposition in der Umgebung der Autobahn in einer Distanz von 5–20 m zwischen 1978 und 1988 trotz einer 30%-igen Verkehrszunahme zwischen 66% und 77% abgenommen (vgl. Abb. 11). Dies darf als Ergebnis der bundesrätlichen Maßnahmen, den Pb-Gehalt im Normalbenzin (1978)

und Superbenzin (1982, 1986) zu senken, gewertet werden (CONTAT et al., 1991). Als wichtigste politische Maßnahme ist die Reduktion der Emission von NO_x und VOCs voranzutreiben, um die O_3 -Bildung und die N-Deposition zu senken.

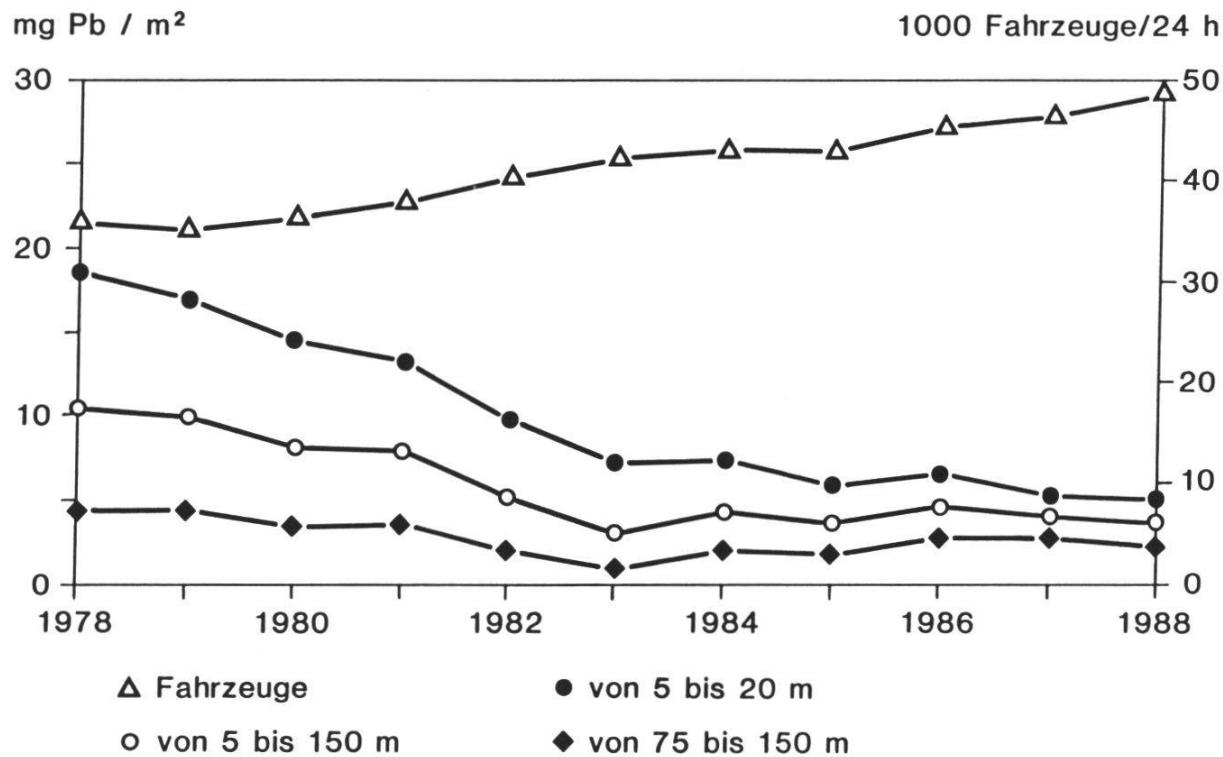


Abb. 11: Mittlere jährliche Bleideposition (mg Pb/m^2) von 1978 bis 1988 an der Autobahn (N1 Ittigen/BE) in unterschiedlicher Distanz (gegliedert nach Distanzgruppen) zur Autobahn unter Berücksichtigung des Verkehrsvolumens (1000 Fahrzeuge/24 Stunden) (nach CONTAT et al., 1991).

Technische und politische Maßnahmen allein genügen aber nicht. Ohne persönlichen Beitrag wird die Luft in nächster Zukunft keinen biologisch und ökologisch verantwortbaren Qualitätsstand erreichen. Persönliche, freiwillige Maßnahmen wie Temperatursenkung in den Gebäuden während der Heizperiode, Reduktion der Fahrgeschwindigkeit und der gefahrenen Autokilometer, Kauf von langlebigen Produkten und eine allgemeine Überprüfung des Konsumverhaltens sind entscheidend sowie unbürokratisch sofort wirksam.

5. Bewertung der Luftverschmutzung und Schlußfolgerungen

Die nassen Depositionen in Form von Regen, Schnee, Nebel usw. enthalten heute eine Menge von organischen und anorganischen Schadstoffen, Säuren, säurebildenden Substanzen und Radionukliden. Diese können Böden, Pflanzen, Gewässer und indirekt Mensch und Tier belasten. Gefährdet sind vereinzelt Kleinseen im Einzugsgebiet von kalkfreien, kristallinen Gebieten.

Die größte Gefährdung der Wälder und naturnahen terrestrischen Ökosysteme durch die Luftverschmutzung besteht im übernatürlich hohen Eintrag von N-Verbindungen kombiniert mit dem Eintrag von Säuren und säurebildenden Stoffen. Außerdem muß O₃ als Streßfaktor beachtet werden.

Die Direktwirkung gasförmiger Luftschatdstoffe ist als die mit Abstand wichtigste Gefährdung der landwirtschaftlichen Pflanzenproduktion in der Schweiz zu betrachten. Das Risiko einer negativen Indirektwirkung von Luftschatdstoffen über den Boden-Wurzel-Pfad wird zurzeit als gering beurteilt, ebenso die Gefahr einer Schwermetallmobilisierung aus Landwirtschaftsböden als Folge der depositionsbedingten Versauerung. O₃ stellt im ganzen ländlichen Gebiet der Schweiz ein Gefährdungspotential für den Pflanzenertrag dar und wird in absehbarer Zeit aus folgenden Gründen als kulturwirksamster Luftschatdstoff betrachtet: (1) die O₃-Immissionsgrenzwerte (LRV 1985), die u. a. zum Schutze der Kulturen dienen, werden trotz regionalen Unterschieden auf dem Land jedes Jahr deutlich überschritten; (2) die Schweiz gehört von den mittel- und nordeuropäischen Staaten zu den O₃ am meisten exponierten Gebieten; (3) es besteht die Tendenz eines langfristigen O₃-Anstiegs; (4) die höchsten O₃-Belastungen kommen während der Vegetationszeit, der photosynthetisch aktiven Tageszeit und auf dem Lande vor; (5) bei den heute vorkommenden O₃-Belastungen sind in Experimenten klar latente Schädigungen und Ertragseinbußen nachgewiesen; (6) zwischen der natürlichen Background-Konzentration und dem Schwellenwert für Pflanzenschäden besteht nur eine kleine Spanne (BUWAL, 1989; STADELmann, 1989).

Die Gesundheit von Mensch und Tier ist in erster Linie direkt durch Beeinträchtigung der Atemorgane und Augen aufgrund der in der Luft vorhandenen Konzentrationen der Gase CO, O₃, NO_x und SO₂ sowie Staubpartikeln betroffen. Gefährdet sind vor allem Menschen mit Atemwegbeschwerden (z. B. Asthma), Kleinkinder und Betagte. Die Kontamination von Nahrungs- und Futterpflanzen durch Luftschatdstoffe ist mit Ausnahme der F-Kontamination in der Umgebung von Aluhütten ein lokal beschränktes Problem und in den seltensten Fällen tier- und humantoxikologisch problematisch (ZIMMERLI et al., 1989; LINDT et al., 1990).

Die politischen und technischen Maßnahmen der nächsten Jahre haben sich in erster Linie auf die Reduktion der Emission von NO_x von VOCs zu konzentrieren, wovon eine Entlastung der land- und forstwirtschaftlichen Vegetation bzw. Böden von O₃ und N-Einträgen erwartet werden darf. Ebenso muß die Emission von klimawirksamen Spurengasen (CO₂, CH₄, N₂O = Lachgas, Fluorchlorkohlenwasserstoffe usw.) künftig vermindert werden. Eine allfällige Klimaveränderung hätte ohne Zweifel dramatische Auswirkungen auf unsere terrestrischen und aquatischen Ökosysteme sowie auf unsere Gesellschaft. Der Wunsch, künftig wieder vermehrt reine Luft anstelle von Abluft einzutauen, ist nur erfüllbar, wenn alle Bevölkerungskreise einen Beitrag leisten, ihr Konsumverhalten überdenken. Luftreinhaltemaßnahmen sind nicht isoliert zu betrachten. Sie sind ein Teilbereich zur Reduktion der Umweltbelastungen, zum Schutz der Gesundheit der heutigen und kommenden Generationen, der Lebensgrundlagen einer funktionsfähigen, reichhaltigen und vielfältigen Umwelt.

6. Dank

Hiermit danke ich herzlich den Herren PD Dr. J. Fuhrer und Dr. A. Grub für die Übersetzung der Zusammenfassung, den Damen M. Pineau und R. Rohr für die Reinschrift, Frau I. Knecht und Herrn P. B. Moeri für die Grafiken sowie Herrn Prof. Dr. G. Lampel für das geduldige Erwarten des spät eintreffenden Manuskripts.

7. Zusammenfassung – Résumé – Summary

Zusammenfassung

Industrialisierung, Bevölkerungswachstum und Konsumverhalten haben zur heutigen Luftverschmutzung geführt. Herkunft, Entstehung und Charakteristik der ökologisch und biologisch relevantesten Luftschaadstoffe werden erörtert. Die Auswirkungen der Luftverschmutzung auf aquatische und terrestrische Ökosysteme sowie auf die menschliche und tierische Gesundheit werden summarisch dargestellt und durch Beispiele aus dem Land-, Forst-, Vegetations- und Verkehrsbereich illustriert. Zur Herstellung einer verantwortbaren Luftqualität werden technische, politische und persönliche Maßnahmen vorgeschlagen. Die Maßnahmen haben sich künftig in erster Linie auf die Reduktion der Emission von Stickoxiden (NO_x), flüchtigen organischen Verbindungen (VOCs) sowie klimawirksamen Spurengasen wie Kohlendioxid (CO_2) und Fluor-Chlor-Kohlenwasserstoffen (FCKW) zu konzentrieren.

Résumé

L'industrialisation, la croissance démographique et le comportement de consommation ont conduit à la pollution atmosphérique actuelle. L'origine, la formation et les caractéristiques des polluants atmosphériques écologiquement et biologiquement les plus importants sont discutés. Les effets de la pollution atmosphérique sur les écosystèmes aquatiques et terrestres ainsi que sur la santé humaine et animale sont présentés de manière sommaire et illustrés d'exemples issus des domaines agricoles et sylvicoles, de la végétation et du trafic. Des mesures techniques, politiques et personnelles sont proposées pour réaliser une qualité d'air appréciable. Dorénavant les mesures devront se concentrer à réduire les émissions d'oxydes d'azote (NO_x), les composantes organiques volatiles (VOCs) ainsi que les gaz traces contribuant à l'«effet de serre» tel le dioxyde de carbone (CO_2) et les chlorofluorocarbones (CFC).

Summary

Industrialization, population growth, and the way of living have led to today's air pollution. Origin, formation and characteristics of the ecologically and biologically most relevant air pollutants are discussed. Effects of air pollution on aquatic and terrestrial ecosystems, as well as on human and animal health, are summarized and

illustrated with examples from the areas of agriculture, forestry, vegetation and traffic. Technical, political and personal measures are suggested which should help to create an acceptable level of air pollution. These future measures must concentrate upon the reduction of emissions of nitrogen oxides (NO_x) and volatile organic compounds (VOCs), as well as gases such as carbon dioxide (CO_2) and chlorofluorocarbons (CFCs) which contribute to the «hothouse effect».

8. Literatur

- BECKER, K., SAURER, M., EGGER, A., and FUHRER, J.: Sensitivity of white clover to ambient ozone in Switzerland. *New Phytol.* 112, 235–243 (1989).
- BUS: Emissionen von luftverunreinigenden Stoffen aus natürlichen Quellen in der Schweiz. Schriftenreihe Umweltschutz Nr. 75. Bundesamt für Umweltschutz: Bern 1987 a.
- : Vom Menschen verursachte Schadstoff-Emissionen in der Schweiz 1950–2010. Schriftenreihe Umweltschutz Nr. 76. Bundesamt für Umweltschutz: Bern 1987 b.
- BUWAL: Ozon in der Schweiz. Statusbericht der Eidg. Kommission für Lufthygiene. Schriftenreihe Umweltschutz Nr. 101. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft: Bern 1989.
- CONTAT, F., TSCHANNEN, W., et STAELMANN, F. X.: Teneurs en différents éléments inorganiques et en PCB des herbages et des sols. *Bulletin de l'ARPEA* 26, 77–88 (1989).
- , SHARIAT-MADARI, H., et STAELMANN, F. X.: Déposition et accumulation de plomb le long de quatre secteurs autoroutiers de 1978 à 1988. I. Evolution en fonction des années, des saisons et de la météorologie. *Recherche agronom. en Suisse* 30, 29–43 (1991).
- FLÜCKIGER, W.: Stickstoff und Stickstoffverbindungen in der Luft und ihre ökophysiologische Bedeutung. *CHIMIA* 42, 41–56 (1988).
- FUHRER, J., EGGER, A., LEHNHERR, B., GRANDJEAN, A., and TSCHANNEN, W.: Effect of ozone on the yield of spring wheat (*Triticum aestivum* L., cv. Albis) grown in open-top field chambers. *Environ. Pollut.* 60, 273–289 (1989 a).
- , LEHNHERR, B., und STAELMANN, F. X.: Luftverschmutzung und landwirtschaftliche Kulturen in der Schweiz. *Landwirtschaft Schweiz* 2, 669–673 (1989 b).
- , MOERI, P. B., TSCHANNEN, W., and SHARIAT-MADARI, H.: Effects of ozone on the grain composition of spring wheat grown in open-top field chambers. *Environ. Pollut.* 65, 181–192 (1990).
- GIGER, W.: Organische Spurenverunreinigungen in der Atmosphäre: Analytik, Herkunft und Verhalten in Regen, Schnee und Nebel. Informationsveranstaltung «Von der Forschung zur Praxis» der EAWAG vom 22.8.1986. 50 Jahre EAWAG 1936–1986, 6–9 (1986).
- GISI, U., SCHENKER, R., SCHULIN, R., STAELMANN, F. X., und STICHER, H.: Bodenökologie. Thieme: Stuttgart, New York 1990.
- HAENI, H.: Schwermetalle im Boden – eine Gefahr für die Pflanzenproduktion? *UFA-Revue* 5/88, 17–19 (1988).

- HECK, W. W.: Future directions in air pollution research. In: Effects of gaseous air pollution in agriculture and horticulture (M. H. UNSWORTH and D. F. ORMROD, Eds.), 411–435. Butterworth Scientifics: London 1982.
- HERTZ, J., BALTENSPERGER, U., und ZÜRCHER, G.: Grauer Schnee als Zeichen der Zeit? Neue Zürcher Zeitung Nr. 39 vom 17.2.1988, Seite 66.
- KUHN, N., AMIET, R., und HUFSCHEID, N.: Veränderungen in der Waldvegetation der Schweiz infolge Nährstoffanreicherung aus der Atmosphäre. Allg. Forst- u. Jagdztg. 158, 77–84 (1987).
- LINDT, T., FUHRER, J., und STADELmann, F. X.: Kriterien zur Beurteilung einiger Schadstoffgehalte von Nahrungs- und Futterpflanzen. Schriftenreihe der FAC Liebefeld Nr. 8 (1990).
- LRK: Bericht Luftreinhaltkonzept des Schweiz. Bundesrates vom 10.9.1986.
- LRV: Luftreinhalte-Verordnung des Schweiz. Bundesrates vom 16.12.1985.
- LUETHI-KRAUSE, B., BLEULER, P., and LANDOLT, W.: Poplar and red clover as bioindicators for ozone at a forest site. *Angew. Bot.* 63, 111–118 (1989).
- MATYSSEK, R., KELLER, T., und GÜNTHER-GEORG, M. S.: Holzpflanzen unter umweltrelevantem Ozonstress im Experiment. Argumente aus der Forschung. WSL, Birmensdorf, Nr. 2, Juli 1991, 9–16 (1991).
- MURACH, D., and ULRICH, B.: Destabilisation of forest ecosystems by acid deposition. *Geo Journal* 17.2, 253–260 (1988).
- NAEF, W.: Wirtschaftliche Konsequenzen der Ozonbelastung für den schweizerischen Ackerbau. *Landwirtschaft Schweiz* 4, 501–506 (1991).
- NEFTEL, A., ESTERMANN, A., STADELmann, F. X., FUHRER, J., und BONGARD, M.: Immissionsbelastung der Landwirtschaft durch den Straßenverkehr. EVED, Bundesamt für Straßenbau, Bericht Nr. 216, April 1991.
- REICH, P. B.: Quantifying plant response to ozone: a unifying theory. *Tree Physiology* 3, 63–91 (1987).
- SCHNOOR, J. L., SIGG, L., STUMM, W., und ZOBRIST, J.: Saure Niederschläge und ihr Einfluß auf die Schweizer Seen. Mitteilungen der EAWAG vom 15.2.1983.
- STADELmann, F. X.: Luftverschmutzung: ein Problem für die Landwirtschaft? *UFA-Revue* 6/88, 19–22 (1988).
- – : Die Auswirkungen der Immissionen auf die Vegetation (Landwirtschaft und Wald). *PRO AQUA-PRO VITA* Basel 11 A, 2.1–2.58 (1989).
- – : N in der Landwirtschaft: Kreislauf, Probleme, Verluste, Synthese, Schlußfolgerungen. In: Stickstoff in Landwirtschaft, Luft und Umwelt. Schriftenreihe der FAC Liebefeld Nr. 7, 141–191 (1990).
- – : Waldschäden und Luftschaadstoffe. Mögliche Wirkungen von Stickstoff aus landwirtschaftlicher Sicht. In: Forum für Wissen 1992 «Waldschadenforschung in der Schweiz: Stand der Kenntnisse». WSL Birmensdorf, 113–126 (1992).
- – , und FUHRER, J.: Der Einfluß der Luftverschmutzung auf die Pflanzenproduktion. SVIAL-Tagung «Pflanzenproduktion und Umwelt» 24./25.9.1986 Zollikofen-Bern, 1–57 (1986).
- – , und SANTSCHI-FUHRIMANN, E.: Beitrag zur Abstützung von Schwermetall-Richtwerten im Boden mit Hilfe von Bodenatmungsmessungen. Bericht FAC Liebefeld 1987.

- STUMM, W.: Wissenschaftlicher Zwischenbericht vom Projekt «Methoden der Probennahme und Messung atmosphärischer Depositionen anwendbar bei Untersuchungen meteorologischer und ökologischer Wirkungszusammenhänge» des NFP 14 vom 15.2.1986.
- VOGEL, H., DESAULES, A., und HAENI, H.: Schwermetallgehalte in den Böden der Schweiz. Bericht des Nationalen Forschungsprogramms «Boden» Nr. 40, Liebefeld-Bern (1989).
- VSBo: Verordnung über Schadstoffe im Boden des Schweiz. Bundesrates vom 9.6.1986.
- WANNER, H.-U.: Auswirkungen der Luftschadstoffe auf Mensch, Tier, Pflanzen, Boden und Wasser. PRO AQUA-PRO VITA «Umweltschutztage» vom 26.5.1988.
- ZIMMERLI, B., BOSSHARD, E., und KNUTTI, R.: Vorkommen und gesundheitliche Bewertung toxischer Spurenelemente in der Nahrung. Mitt. Gebiete Lebensm. Hyg. 80, 490–518 (1989).