

Zeitschrift: Jahrbuch vom Thuner- und Brienzersee
Herausgeber: Uferschutzverband Thuner- und Brienzersee
Band: - (1985)

Artikel: Lufthygienische und klimatologische Zusammenhänge mit den
Waldschäden : Vortrag der Generalversammlung vom 2. Februar 1985
Autor: Mathys, Hans
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1096759>

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: 24.03.2026

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

Hans Mathys

Lufthygienische und klimatologische Zusammenhänge mit den Waldschäden

Vortrag der Generalversammlung vom 2. Februar 1985

1.	<i>Begriffe</i>	8
2.	<i>Die natürliche Zusammensetzung der Luft und die Luftverschmutzung</i>	9
3.	<i>Die Quellen der Luftverschmutzung (Emissionen)</i>	
3.1.	Feuerungsanlagen	12
3.2.	Industrie, Gewerbe und andere Betriebe	15
3.3.	Verkehr	15
3.4.	Gesamtemission	20
4.	<i>Die Ausbreitung der Luftfremdstoffe (Transmission)</i>	
4.1.	Winde	21
4.2.	Inversionen	21
4.3.	Topographie und Bodenbeschaffenheit	24
4.4.	Chemische Umwandlung der Luftfremdstoffe während des Transportes	25
5.	<i>Immissionen</i>	
5.1.	Messung der Immissionen und Immissionsgrenzwerte	27
5.2.	Die Immissionssituation	27
5.3.	Import und Export von Luftfremdstoffen	29
6.	<i>Schlussbemerkung: Die räumliche Beziehung zwischen der Luftverschmutzung und den Waldschäden</i>	30
	Quellenhinweise	32

1. Begriffe

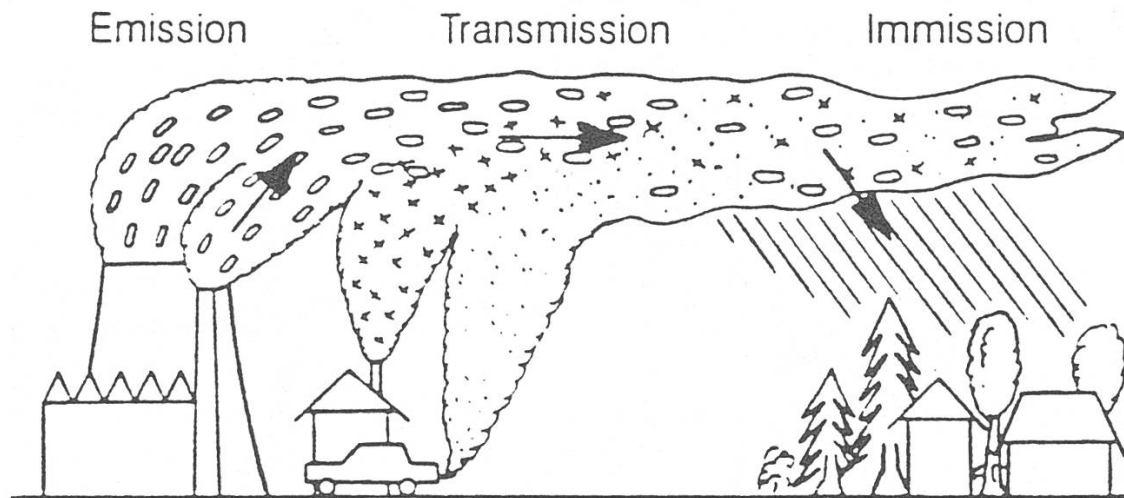


Abb. 1: Der gesamte Problemkomplex der Lufthygiene gliedert sich in drei Teilbereiche auf (1):

Emission: Damit werden die Schadstoffquellen oder der Ort, wo die Luftfremdstoffe in die Atmosphäre austreten, bezeichnet (Kamine, Auspuffrohre, aber auch diffuse Quellen). Die Luftfremdstoffe können in gasförmigem, festem, flüssigem Zustand oder in Kombination (Aerosol) auftreten.

Transmission: Die emittierten Luftfremdstoffe vermischen sich nach ihrem Austritt rasch mit der Umgebungsluft und werden dadurch verdünnt. Je nach Windrichtung und -geschwindigkeit werden sie über kleinere oder größere Distanzen verfrachtet. Während dieses Transportes können die Schadstoffe miteinander oder auch mit den natürlichen Bestandteilen der Luft reagieren; es finden chemische und physikalische Veränderungen statt.

Immission: Die nach der Transmission auf den Menschen und seine Umwelt einwirkenden Luftfremdstoffe werden als Immissionen bezeichnet. Sie sind das Resultat aus Emission und Transmission.

2. Die natürliche Zusammensetzung der Luft und die Luftverschmutzung

Nach heutiger Lehrbuchmeinung besteht reine Luft aus folgenden Hauptkomponenten:

78,09%	Stickstoff (N ₂)
20,95%	Sauerstoff (O ₂)
0,93%	Argon (Ar)
0,03%	Kohlendioxid (CO ₂)

Daneben enthält sie genau definierte Spuren der folgenden Substanzen: Helium (He), Neon (Ne), Methan (CH₄), Krypton (Kr), Distickstoffoxid (N₂O), Wasserstoff (H₂), Xenon (Xe) und Ozon (O₃). Alles, was über die angegebenen Anteile hinausgeht oder was an zusätzlichen Stoffen in der Luft vorhanden ist, müsste demzufolge als Luftverunreinigung, Luftverschmutzung oder Luftfremdstoffe bezeichnet werden.

Nun weiss man aber inzwischen, dass auch unter normalen, natürlichen Bedingungen die Luft weit mehr Substanzen enthält, als in der Aufzählung angegeben worden sind. Ebenso sind bei gewissen Stoffen, insbesondere natürlich beim Wassergehalt, Schwankungen durchaus möglich. Deshalb ist man heute dazu übergegangen, den Begriff «Luftverunreinigung» flexibler zu definieren und betrachtet alles als Verunreinigung, was über der Normalzusammensetzung der Luft liegt. Allerdings lässt sich der Begriff «normal» nicht mathematisch exakt bestimmen. So werden Luftverunreinigungen biologischen Ursprungs im Gegensatz zur Luftverschmutzung aus anthropogener Tätigkeit kaum zur eigentlichen Luftverunreinigung gezählt (z. B. Methan aus dem biotischen Abbau).

Als Hauptkomponenten der heutigen anthropogenen Luftverschmutzung gelten:

Kohlenoxide: Die Oxide des Kohlenstoffs sind leichtflüchtige Gase, bei denen man zwischen Kohlendioxid (CO₂) und Kohlenmonoxid (CO) unterscheidet. Beide sind für die Pflanzen unmittelbar nicht schädlich. Beim Verbrennen von fossilen Energieträgern (Erdöl, Erdgas, Kohle) werden grosse Mengen CO₂ freigesetzt. Kohlenmonoxid (CO) entsteht durch unvollständige Ver-

brennung organischer Verbindungen; es oxidiert in der Atmosphäre sehr leicht und rasch zu CO_2 . Als Hauptemittenten gelten der Verkehr und die Feuerungsanlagen.

Schwefeldioxid: SO_2 ist ein stechend riechendes, giftiges Gas. Es entsteht bei der Verbrennung schwefelhaltiger Energieträger (Erdöl, Kohle). Deshalb ist im Emissionsverlauf ein ausgeprägter Jahresgang festzustellen. Daneben sind Vulkane und Ozeane als natürliche Quelle von Schwefel zu bezeichnen. Letztere emittieren grosse Mengen von Schwefel in Form von Salzpartikeln (Sulfate).

Stickoxide: Unter Stickoxiden versteht man verschiedene Verbindungen des Stickstoffes mit dem Sauerstoff. Sowohl beim Stickstoffmonoxid (NO) als auch beim Stickstoffdioxid (NO_2) handelt es sich um pflanzengiftige Gase. Sie entstehen zur Hauptsache bei Verbrennungsprozessen, die unter hohem Druck und bei Temperaturen über 1000°C stattfinden. Stickoxide sind somit nicht Verunreinigungen aus dem Brennstoff. Als Hauptemittenten gelten Verkehr, Feuerungsanlagen und industrielle Prozesse.

Organische Verbindungen: Organische Verbindungen ist eine Sammelbezeichnung für eine fast unübersehbar grosse Zahl sehr verschiedenartiger Substanzen, denen gemeinsam ist, dass sie aus einem Kohlenstoffgrundgerüst bestehen. Viele dieser Stoffe sind leichtflüchtig wie die Kohlenwasserstoffe (HC). Sie entstehen bei unvollständiger Verbrennung, aber auch durch Verdampfung. Ökologisch besonders bedenklich sind die halogenierten organischen Verbindungen. Das sind oft schwer abbaubare und damit langlebige Verbindungen, die sich in der Nahrungskette anreichern können. Wahrscheinlich erzeugen sie auch Krebs.

Photooxidantien: Als Photooxidantien werden sekundäre Luftverunreinigungen bezeichnet, welche nicht direkt emittiert werden, sondern durch Umwandlungen und durch die Einwirkung von Sonnenlicht entstehen. Typische Vertreter dieser Luftverunreinigungen sind Ozon (O₃) sowie Peroxiacetylnitrat (PAN). Aus pflanzen-toxikologischer Sicht müssen Photooxidantien als sehr bedenklich eingestuft werden. Es handelt sich um äusserst aggressive, stark oxidierende Substanzen.

Staub: Bei den Stäuben unterscheiden wir zwischen Feinstaub ($\varnothing < 10 \mu\text{m}$ = Schwebestaub) und Grobstaub ($\varnothing > 10 \mu\text{m}$ = Sedimentstaub). Entsprechend ihrer Korngrösse ist denn auch die Verweilzeit in der Atmosphäre (Feinstaub bis zu Wochen!). Ein hoher Prozentsatz des Staubes in der Luft ist natürlichen Ursprungs: Winderosion (Ackerböden usw.). Diese Stäube reagieren meist alkalisch und tragen deshalb dazu bei, saure Luftverunreinigungen zu neutralisieren. Oft enthalten die Stäube auch gefährliche Komponenten wie Schwermetalle (Cadmium, Mangan, Zink, Blei, Quecksilber usw.) und andere gesundheitsschädigende Stoffe wie beispielsweise Asbest. Ausserdem können sich an der Oberfläche der Staubkörner chlorierte Kohlenwasserstoffe anlagern, die ebenfalls gefährlich sind.

Diese «Schadstoffliste» könnte nun beliebig fortgesetzt werden. Erst in den letzten Jahren hat man mit zunehmender Verfeinerung der Analysemethoden festgestellt, dass sowohl unter natürlichen Bedingungen als auch durch die menschlichen Aktivitäten eine kaum überschaubare Anzahl Stoffe in kleinsten Konzentrationen (meist unter 1 ppm = Teilchen pro Million) in unserer Luft auftreten.

3. Die Quellen der Luftverunreinigung

Die Luftverunreinigungen aus anthropogener Aktivität stammen im wesentlichen aus drei Quellen:

- den Feuerungsanlagen
- den Industrie- und Gewerbebetrieben
- dem Motorfahrzeugverkehr

3.1. Feuerungsanlagen

Im Kanton Bern existieren zurzeit annähernd 300 000 Feuerungsanlagen. Die gesamte Wärme-, Warmwasser- und Dampferzeugung verteilt sich wie folgt auf die verschiedenen Energieträger:

- 64,2% mit Heizöl
- 24,4% mit Elektrizität
- 4,7% mit Erdgas
- 2,7% mit Kohle
- 2,0% mit Holz
- 2,0% mit Fernwärme und erneuerbarer Energie

Unter dem Aspekt der Luftverschmutzung ergibt sich bei den Energieträgern folgende Reihenfolge: Als «saubere Energien» gelten die Elektrizität sowie die erneuerbaren Energien, gefolgt von Gas, Holz, Heizöl und Kohle (letzte je nach Qualität!). Damit erhalten die ca. 90 000 ölbetriebenen Hausfeuerungsanlagen sowie die mit Schweröl oder Kohle befeuerten Industriefeuerungsanlagen im Kanton Bern einen hohen lufthygienischen Stellenwert.

Bei der Verbrennung von Heizöl entsteht neben einer Reihe von andern Luftfremdstoffen (vgl. Kap. 2) zur Hauptsache Schwefeldioxid (SO₂). Die ausgestossene Menge von Schwefeldioxid ist direkt abhängig vom Schwefelgehalt des Brennstoffes (heutige gesetzliche Vorschriften: Heizöl «extra leicht», S-Gehalt bis 0,3%; Heizöl «schwer», S-Gehalt bis 2,0% usw.). Deshalb wird das Schwefeldioxid bei uns in erster Linie als *Haupt-* oder *Leitkomponente* für die Emissionen aus Haus- und Industriefeuerungen verwendet.

Die gesamtschweizerische SO₂-Emission hat sich in den letzten Jahren wie folgt entwickelt:

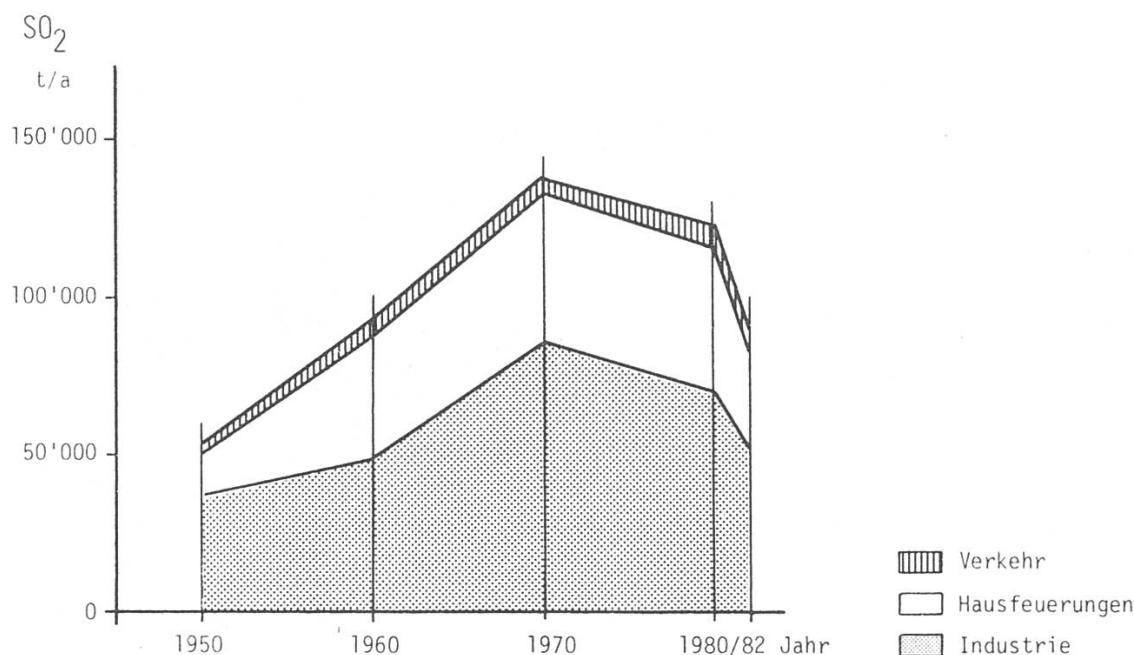
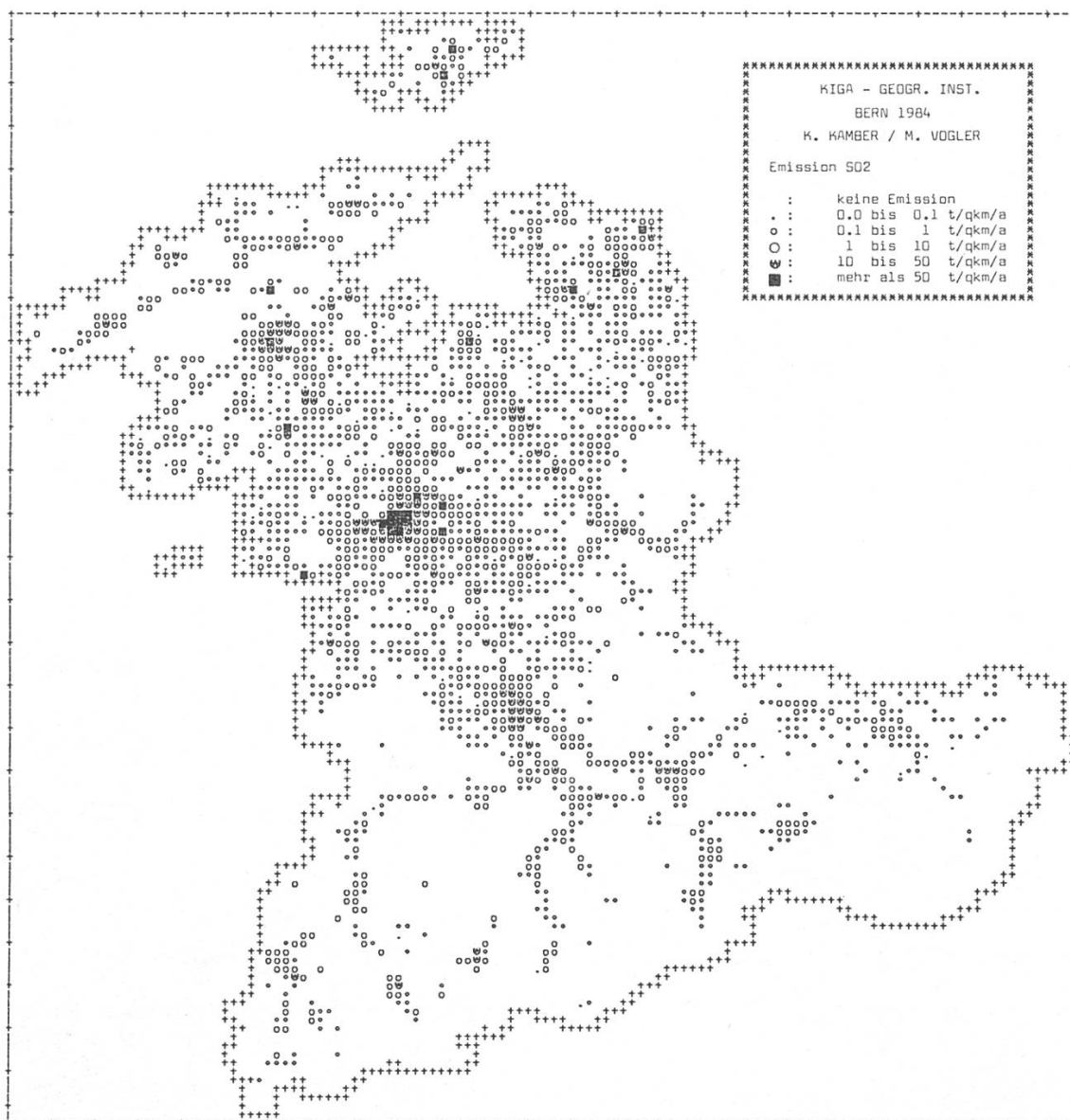


Abb. 2: Die gesamtschweizerische Entwicklung der SO₂-Emissionen 1950–1982 (2).

Die Entwicklung ist gekennzeichnet durch den absoluten Höhepunkt in den frühen siebziger Jahren. Mit der Energiekrise und dem damit verbundenen gesteigerten Energiebewusstsein (Diversifikation, Substitution usw.) setzt eine rückläufige Tendenz ein, so dass wir uns heute bereits der Emissionsrate der späten fünfziger Jahre nähern. Als Verursacher dieser Emissionen stehen die Feuerungsanlagen mit einem Anteil von 95% fest. Diese Entwicklung dürfte auch für den Kanton Bern ihre Gültigkeit haben.

Bezüglich der räumlichen Verteilung der SO₂-Emissionsquellen ergibt sich für den Kanton Bern folgendes Bild (siehe Bild Seite 14).

Aus dem SO₂-Emissionskataster des Kantons Bern (Stand 1983) ergibt sich eine getreue Projektion der Wohn- und Bevölkerungsdichte: Ballungsräume und Agglomerationen (Bern, Biel, Thun, Burgdorf, Langenthal usw.) erscheinen als potentielle Emissionsgebiete flächenhafter Natur (... bestehend aus einer Vielzahl von Einzelquellen). Ausnahmen bilden dabei gewichtige Einzelemittenten. Es ergibt sich somit eine sehr klare Gliederung des Kantons, die aber nur in sehr beschränktem Aus-



KLASSENGRENZEN:	ZAHL DER FLAECHENELEMENTE:
0	3836
0 - 0.1 t/qkm/a	94
0.1 - 1 t/qkm/a	1240
1 - 10 t/qkm/a	761
10 - 50 t/qkm/a	96
mehr als 50 t/qkm/a	22

Abb. 3: Der SO₂-Emissionskataster des Kantons Bern.

mass eine Aussage über die *effektive lufthygienische Belastung* zulässt, da die Transmission im Emissionskataster nicht berücksichtigt werden kann (man bedenke dabei, dass SO₂ bis zu 14 Tagen in der Atmosphäre verweilen kann).

3.2. Industrie, Gewerbe und andere Betriebe

Das Spektrum der hier emittierten Luftfremdstoffe ist sehr breit; d. h. je nach Art und Grösse des Betriebes können die Abgase sowie deren Zusammensetzung sehr unterschiedlich sein. Abgesehen von den industriellen und gewerblichen Feuerungsanlagen ist es deshalb unmöglich, diese Vielzahl und Vielfältigkeit von Einzelquellen zu einer einheitlichen Emissionsgruppe zusammenzufassen.

Im Kanton Bern sind derzeit 1242 Industriebetriebe sowie rund 22 000 Gewerbebetriebe (3) angesiedelt. Allerdings ist nur ein Teil dieser Betriebe lufthygienisch von Bedeutung. Soweit sich dies heute beurteilen lässt, fallen rund 60% der industriellen und ca. 30% der gewerblichen Betriebe lufthygienisch ins Gewicht.

Die geographische Verteilung der Industrie- und Gewerbezone im Kanton Bern ergibt praktisch dasselbe räumliche Verteilungsmuster der punktförmigen Einzelquellen wie der SO₂-Emissionskataster (Ballungszentren und Agglomerationen). Aufgrund dieses hohen Deckungsgrades der beiden Emittentengruppen muss im lokalen oder oftmals sogar im regionalen Bereich emissionsseitig mit einem Kumulationseffekt gerechnet werden.

3.3. Verkehr

Mehr als 90% des gesamten Kohlenmonoxids (CO), ungefähr 75% der Stickoxide (NO_x) und rund 50% der Kohlenwasserstoffe (HC) stammen aus dem Motorfahrzeugverkehr (4). Da diese Luftfremdstoffe im Gegensatz zu Haus- und Industriefeuerungen oder industriellen Abgasen in Bodennähe ausgestossen werden und demzufolge noch wenig verdünnt in den Einflussbereich des Menschen gelangen, ist das Gefährdungspotential besonders hoch. Insbesondere den Stickoxiden (NO_x) und den Kohlenwasserstoffen (HC) ist grosse Beachtung zu schenken, da diese als wichtige Vorläufersubstanzen (= primäre Schadstoffe) für die Bildung weiterer Luftfremdstoffe (z. B. Oxidantien – sekundäre Schadstoffe) gelten.

Im Gegensatz zu den SO₂-Emissionen (vgl. Kap. 3.1.) zeigt sich bei der Entwicklung der Jahresemission für die Hauptschadstoffe aus dem Motorfahrzeugverkehr gesamtschweizerisch eine ungehinderte Zunahme.

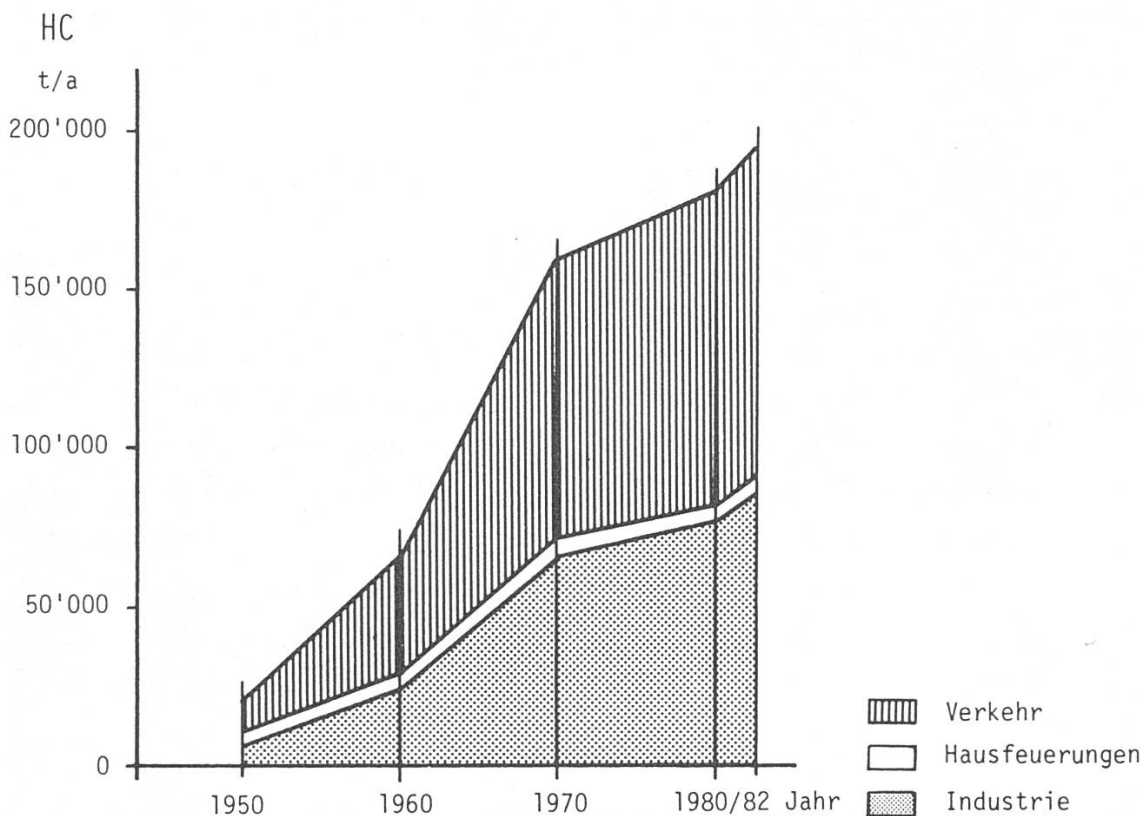
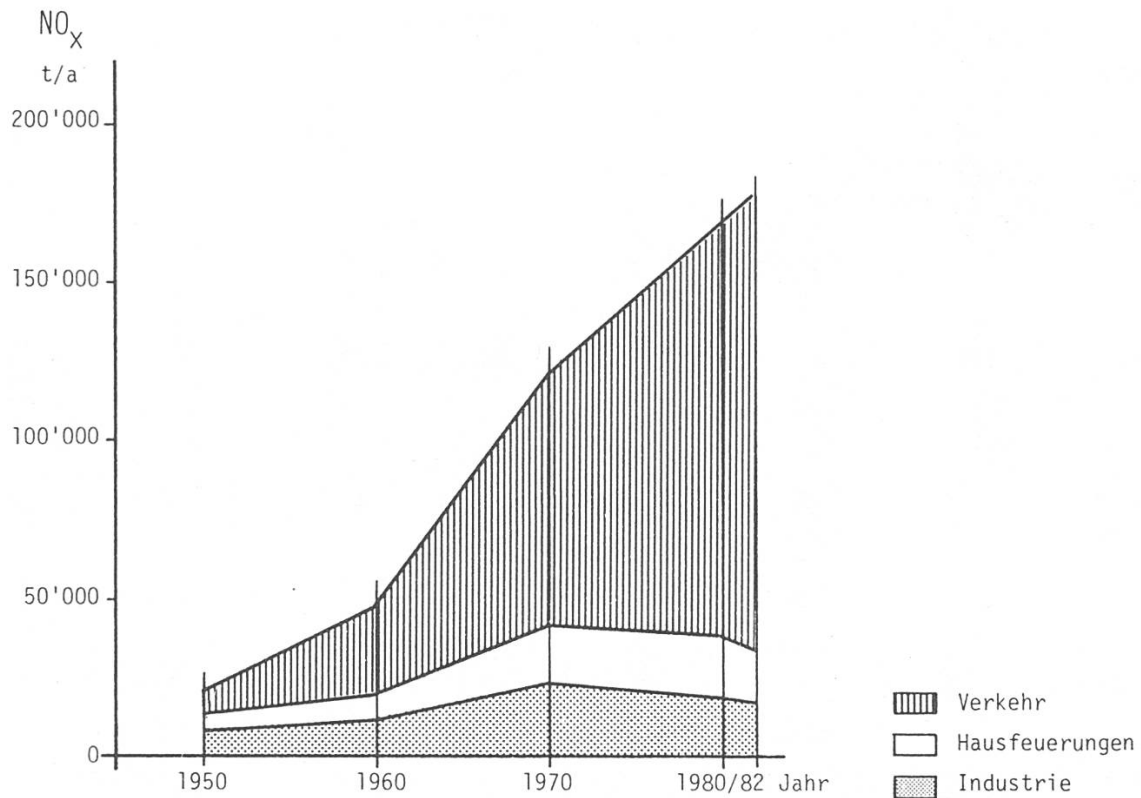


Abb. 4: Entwicklung der Jahresemission der wichtigsten Luftfremdstoffe aus dem Motorfahrzeugverkehr (2).

Zweifelsohne hat diese Entwicklung auch ihre Gültigkeit für den Kanton Bern, wenn die folgenden Zahlen in Betracht gezogen werden.

Für das Stichdatum Juli 1984 bzw. das Jahr 1950 waren im Kanton Bern folgende Motorfahrzeuge registriert:

Fahrzeugart	1950	1984
1. Personenwagen (+Lieferwagen bis 3,5 t +Kleinbusse bis 9 Plätze)	24 000	345 000
2. Lastwagen	2 560	6 000 ¹
3. Motorräder	9 750	27 000 ²
4. Mofas	keine	180 000

¹ ca. 50% Diesel / 50% Benzin

² 75% Oktober bis Mai ausser Betrieb gesetzt

Doch nicht allein die im Kanton Bern immatrikulierten Fahrzeuge sind für die lufthygienische Belastung ausschlaggebend. Weitere Faktoren wie

- Transitverkehr
- Fahrzeugfrequenzen
- Fahrgeschwindigkeit und Fahrmodus
- effektiv gefahrene Kilometer
- räumliche Verteilung

müssen berücksichtigt werden und können die Schadstoffsituation nachhaltig beeinflussen.

Die schweizerische Strassenverkehrszählung für das Jahr 1980 ergab für den Kanton Bern folgendes Bild des durchschnittlichen Tagesverkehrs der Motorfahrzeuge (siehe Karte Seite 18).

Hatten wir es bei den Emissionen aus Feuerungsanlagen hauptsächlich mit flächenhaften und bei Industrie und Gewerbe mit punktförmigen Emissionsquellen zu tun, handelt es sich bei den Verkehrsemissionen um eigentliche Linienquellen, welche sich in Ballungsräumen zu Flächenquellen verdichten können. Jedenfalls geht aus der räumlichen Darstellung des Motorfahrzeugverkehrs deutlich hervor, dass diese Linienquel-

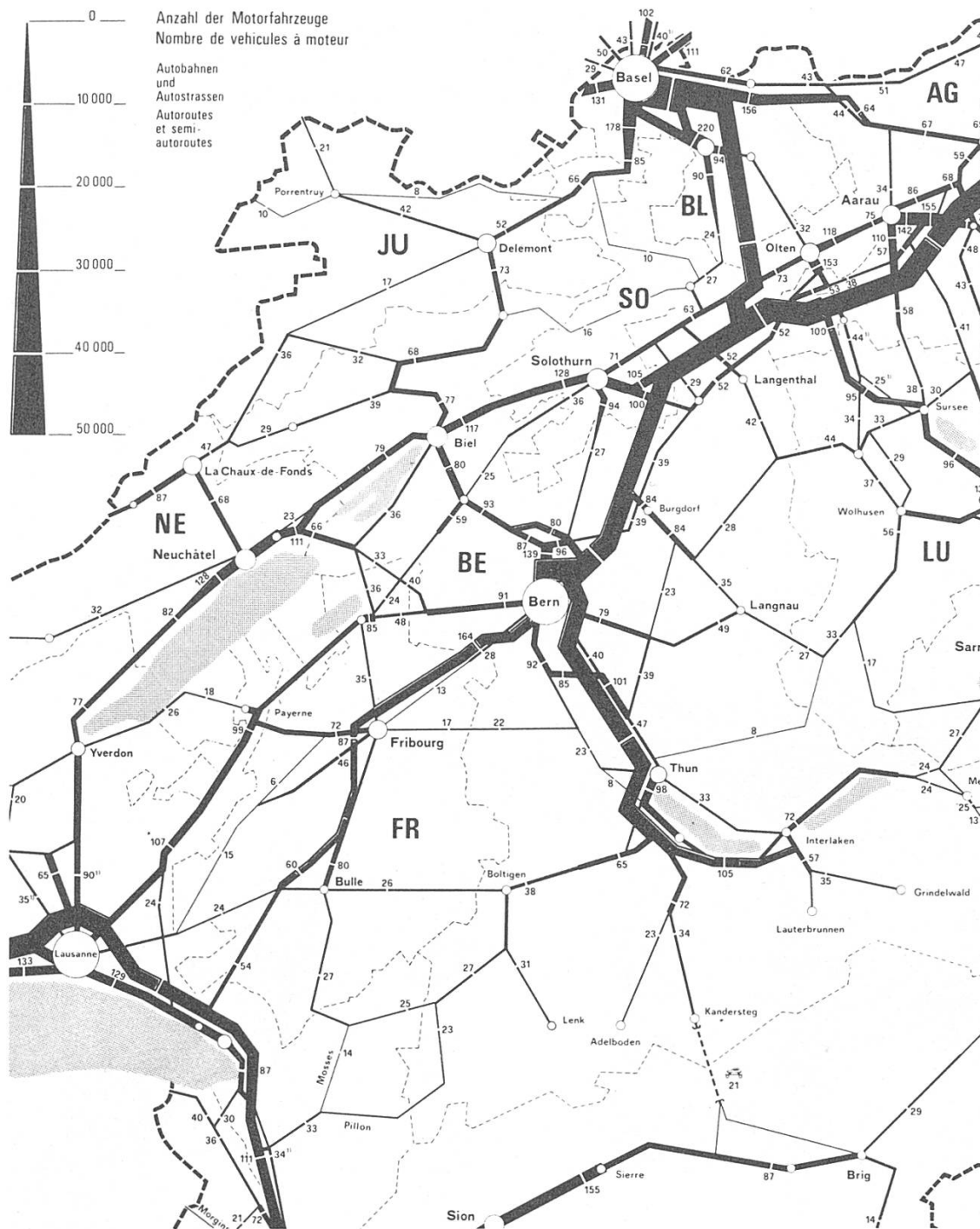


Abb. 5: Durchschnittlicher Tagesverkehr (1980). Die Zahlen in der Karte bedeuten Hunderter (Beispiel: 91 = 9100 Fahrzeuge pro Tag) (5).

len Ballungszentren und Agglomerationen im Kanton verbinden und somit im Bereich der Luftverschmutzung zu einer weiteren Kumulation führen. Damit wird auch klar, dass wir in der Regel kaum je nur einen einzelnen Schadstoff antreffen werden. Dies ist vor allem im Hinblick auf

die Transmissionsvorgänge und die Auswirkungen der Luftverunreinigungen von grosser Bedeutung.

Die drei nachfolgenden Präzisierungen zu den Verkehrsemissionen sollen dazu beitragen, gewisse Fehleinschätzungen bzw. Unklarheiten zu beseitigen:

a) Mofas und Kleinmotorräder

In der Schweiz zirkulieren heute rund 700 000 Mofas und Kleinmotorräder (Kanton Bern 180 000). Die durchschnittliche Fahrleistung beträgt rund 5000 km pro Jahr. Dies ergibt ein beträchtliches Schadstoffpotential: Ganze 15 bis 20% der Kohlenwasserstoffe (HC = Hauptemission bei den Mofas) des Verkehrs stammen aus diesen Fahrzeugen.

b) Dieselfahrzeuge

Neueste Untersuchungen (6) über das Abgasverhalten der Dieselpersonenwagen zeigen, dass bei den heute reglementierten und limitierten Schadstoffen CO, NO_x und HC niedrigere Werte erreicht werden als bei den Personenwagen, die mit Benzin betrieben werden (nach Abgasnorm CH-1982). Im Gegensatz dazu aber ist der Ausstoss von andern, viel gefährlicheren Schadstoffen wie beispielsweise der polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffe (PAH) bedeutend höher. Die oft genannte Umweltfreundlichkeit des Dieseltreibstoffes ist damit widerlegt.

Im weitem sei auch darauf hingewiesen, dass im Jahre 1982 respektable 10% der gesamtschweizerischen Fahrleistung durch Diesellastwagen erbracht wurden, obwohl diese bestandesmässig nur gerade 4 bis 5% ausmachen.

c) Ziviler Luftverkehr

Einerseits verunreinigen Flugzeuge die Atmosphäre durch Triebwerkabgase, andererseits fallen beim notfallmässigen (und heute sehr selten praktizierten) Treibstoffschnellablass Treibstoffdämpfe an. Dabei werden sowohl die bodennahen als auch die oberen Luftschichten bis in die Stratosphäre belastet.

Das in der modernen Zivilluftfahrt verwendete Flugpetrol (Kerosin) enthält im Gegensatz zum Autobenzin keine bleihaltigen Zusätze. Es ist dem Dieselöl oder Heizöl «extra-leicht» sehr ähnlich, enthält jedoch bedeutend weniger Schwefel (<0,01%). Der Anteil des Kerosins am gesamten

Verbrauch von Mineralölprodukten betrug 1982 etwa 6%, während dem Automobilverkehr rund das Siebenfache zufluss. Betrachtet man nun alle Flugbewegungen von sämtlichen Flugzeugen des Flughafens Kloten (Starts und Landungen), so ergibt sich ein jährlicher Stickoxidausstoss von rund 820 000 Kilo. Dies entspricht dem jährlichen Stickoxidausstoss von etwa 19 000 Personenwagen (zum Vergleich: 1984 waren im Kanton Bern 345 000 PW's immatrikuliert).

Von weit grösserer Bedeutung und Tragweite aber dürften die noch wenig erforschten chemischen Prozesse sein, die sich in grossen Höhen (Stratosphäre) abspielen. Dies betrifft in erster Linie den möglichen Abbau der Ozonschicht und die damit verbundene Zerstörung des natürlichen UV-Filter.

3.4. Gesamtemission

Zur Beurteilung der Gesamtemission kann im wesentlichen von den schweizerischen Zahlen ausgegangen werden. Bezüglich ihrer Herkunft kann sie wie folgt zusammengefasst werden (2):

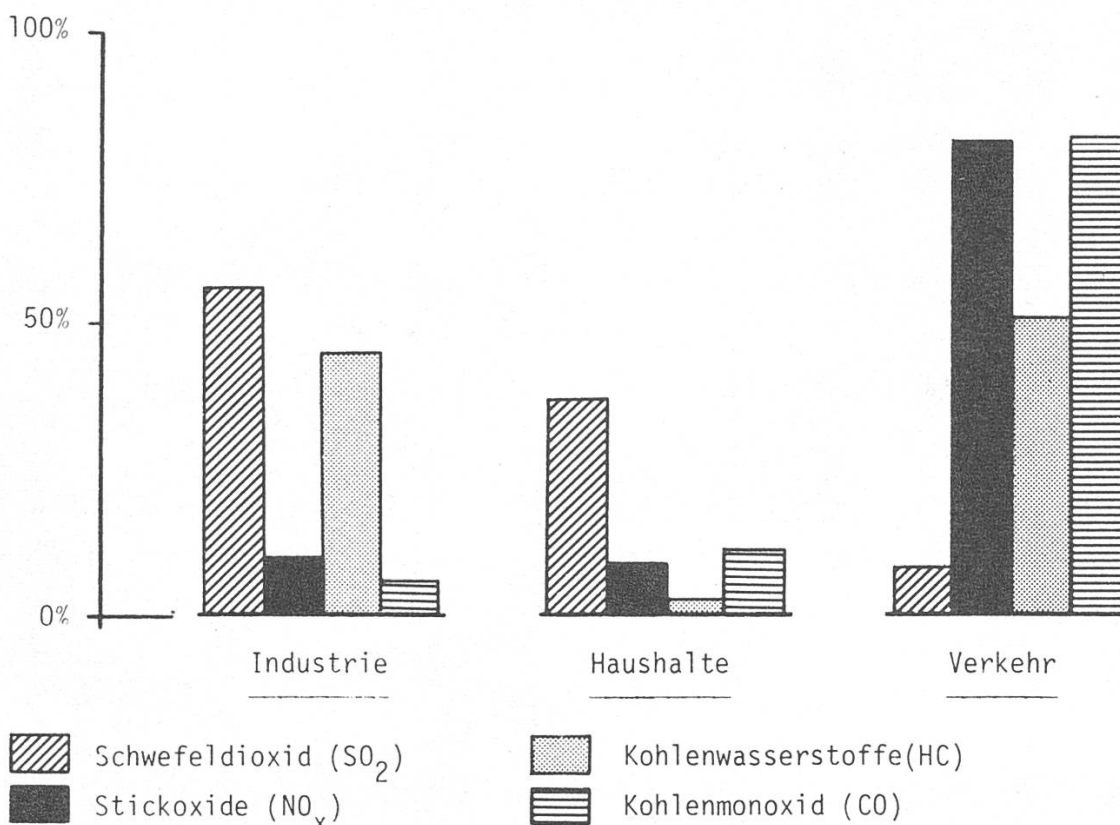


Abb. 6: Herkunft der Emissionen in der Schweiz.

Im Gegensatz zu andern europäischen Staaten stehen die Verkehrsemissionen in der Schweiz an erster Stelle. Dies dürfte auch für die Gesamtbilanz des Kantons Bern zutreffen. Dabei ist es durchaus möglich, dass lokal und z.T. auch regional Emissionen aus andern Quellengruppen überwiegen können.

4. Die Ausbreitung der Luftfremdstoffe (Transmission)

4.1. Winde

Luftschadstoffe werden dann rasch ausgebreitet und gut verdünnt, wenn ein intensiver Luftaustausch stattfindet. Dies kann sowohl horizontal als auch vertikal geschehen.

horizontal: z. B. Gradientwinde zwischen den grossräumigen Druckzentren (z. B. Westwind- oder Bisenlage).

vertikal: Normalerweise nimmt die Lufttemperatur mit zunehmender Höhe ab. Die in Bodennähe erwärmte Luft kann somit ungehindert aufsteigen und sorgt so für eine ständige Bewegung in vertikaler Richtung (Turbulenz).

Meistens treten horizontale und vertikale Windströmungen kombiniert auf. Erst in grosser Höhe über der Erdoberfläche treffen wir dann ungestörte Windverhältnisse an. Diese Effekte werden in unserem Kanton mit seinem intensiven Relief verstärkt, und deshalb spielen bei uns oft regelmässig auftretende regionale oder lokale Windsysteme für die unmittelbare Ausbreitung und Verdünnung von Luftfremdstoffen eine übergeordnete Rolle (z. B. Berg-/Talwinde, See-/Landwinde usw.).

Das Beispiel des «Windfeldes» (hier im Falle einer Bisenlage) im Aaretal zwischen Bern und Thun zeigt diesen Sachverhalt mit aller Deutlichkeit: Entsprechend den orographischen Verhältnissen werden die bodennahen Winde stark umgelenkt.

4.2. Inversionen

Bei austauscharmen Wetterlagen (z. B. flache Druckverteilung) entstehen durch die nächtliche Ausstrahlung in Mulden, Tälern und Tieflagen oft Kaltluftseen. Die Obergrenze dieser Kaltluftmassen wirkt sich wie eine Sperrschicht aus, so dass vertikale Luftbewegungen kaum mehr möglich

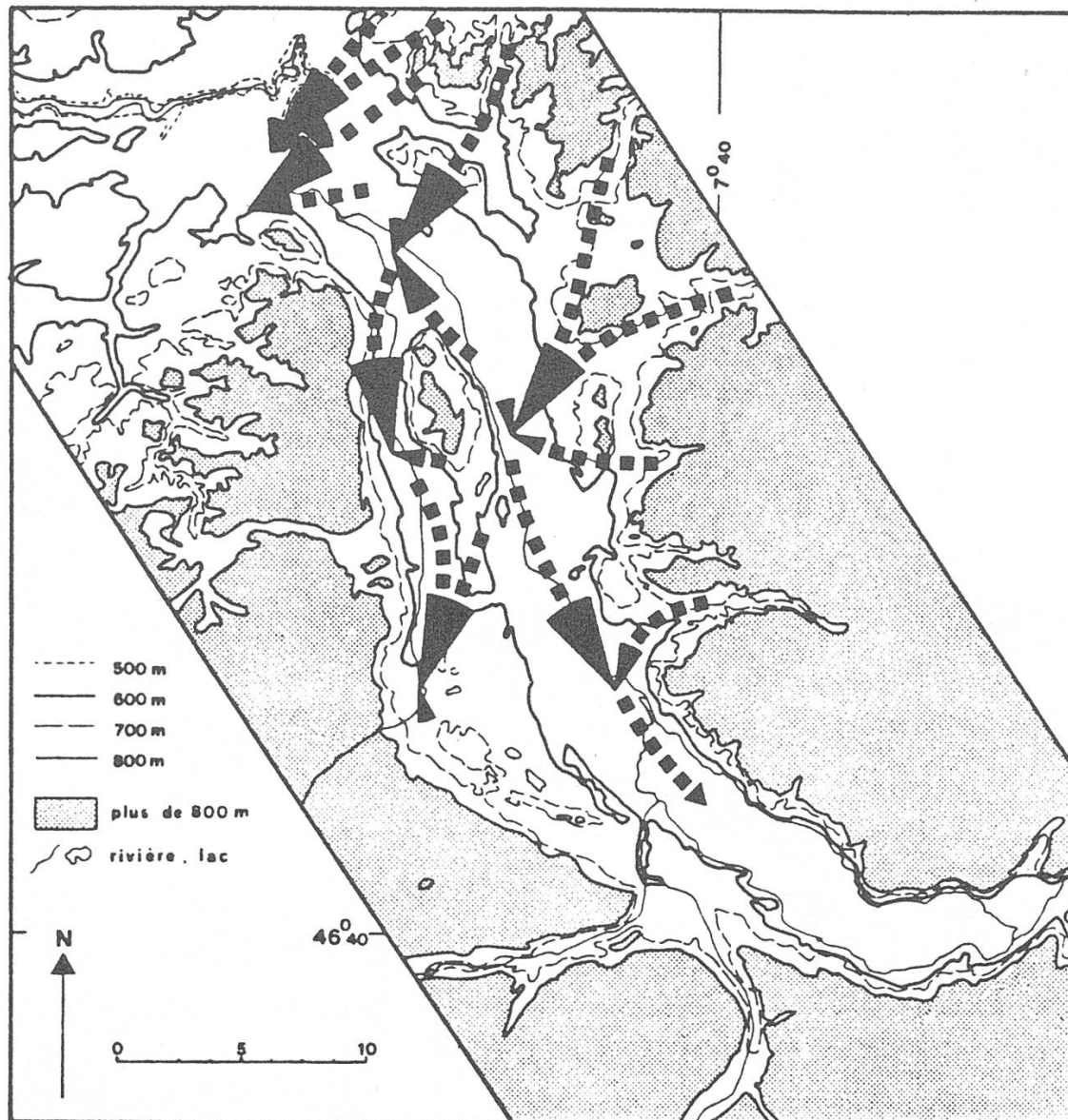
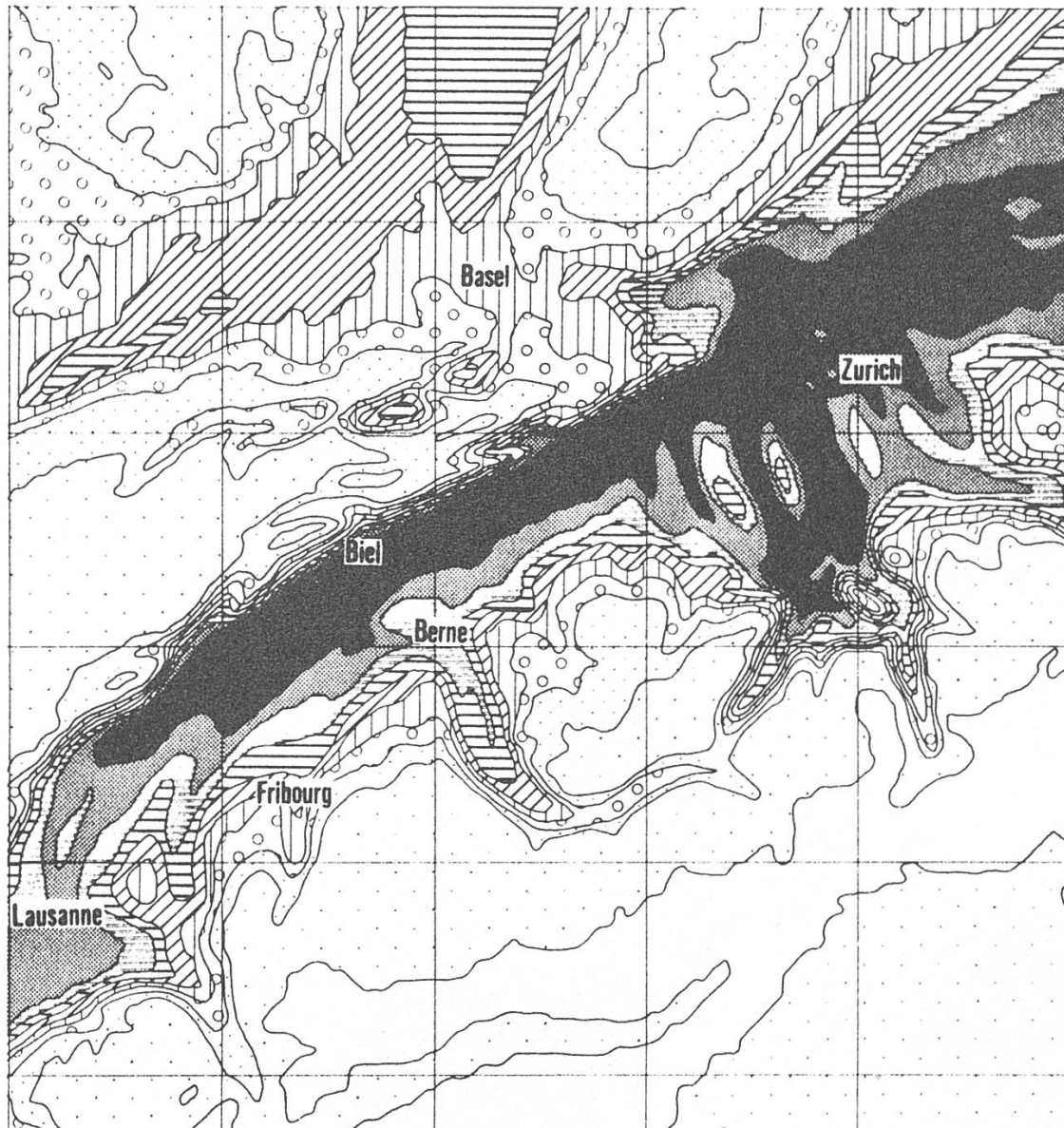


Abb. 7: Ablenkung der Winde im Aaretal zwischen Bern und Thun bei Bisenlage (7).

sind. Dauern solche Inversionen längere Zeit an, werden Luftfremdstoffe im Kaltluftsee akkumuliert; d. h. der Schadstoffpegel kann bedenklich ansteigen. Inversionen können lokal-kleinräumig, aber auch grossräumig (z. B. ganzes Mittelland-Nebelmeer) auftreten.

Im Beispiel einer Karte der Nebelhäufigkeit in den Kantonen Bern und Solothurn (8) oder in der Auswertung von Satellitenbildern während eines Winterhalbjahres (7) wird auf eindrucksvolle Weise deutlich, wie stark die «Vorlandsenken» (= Seeland – tieferes Mittelland und Täler) von

diesen Inversionslagen betroffen sind. Im langjährigen Mittel sind in diesen Gebieten an 40 bis 60 Tagen pro Jahr Inversionen mit Nebelbildung festzustellen.



Fog cover (% of all cases)

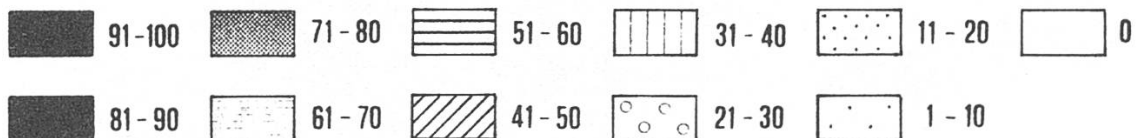


Abb. 8: Nebelhäufigkeit im Schweizerischen Mittelland (7).

4.3. Topographie und Bodenbeschaffenheit

Geländeformen wie Bergketten, Hügel, Schluchten, Täler, Engnisse usw. wirken sich stark auf die Ausbreitung der Luftfremdstoffe aus. Es entstehen Ablenkungs-, Kanalisations-, Beschleunigungs-, Abschirm- und Turbulenzeffekte. Aber auch die Bodenbeschaffenheit (=Bodenrauhigkeit) kann die Ausbreitungsmechanismen nachhaltig beeinflussen, z. B. Hecken, Wälder, Baukörper, Asphaltfläche usw.

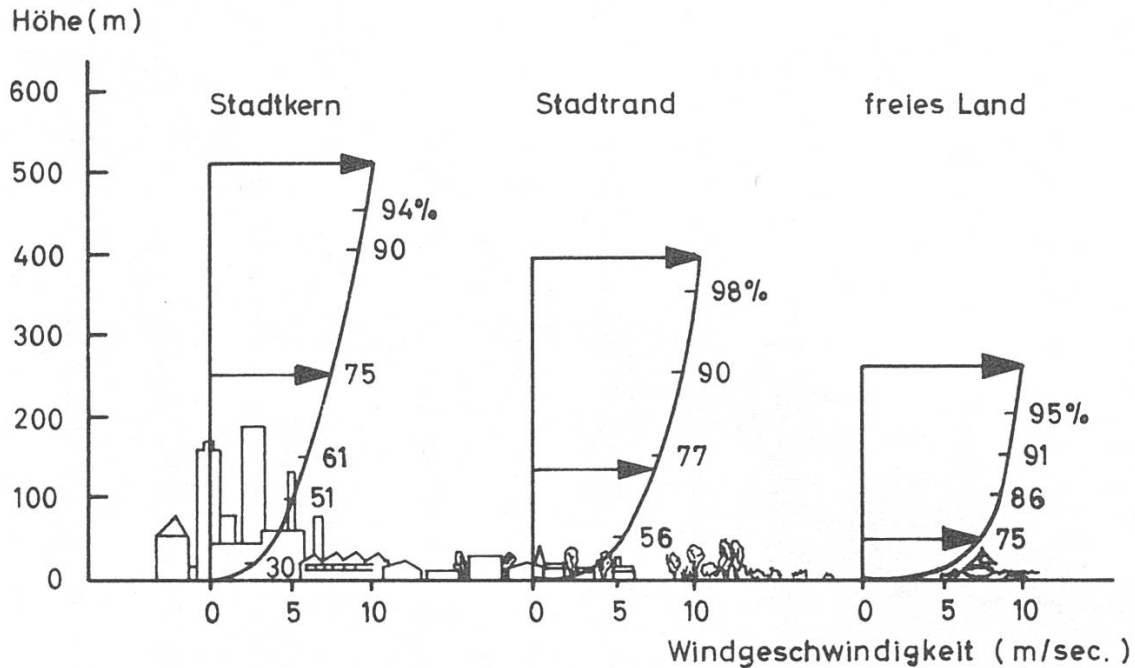


Abb. 9: Der Einfluss der Bodenrauhigkeit auf das Windfeld (9).

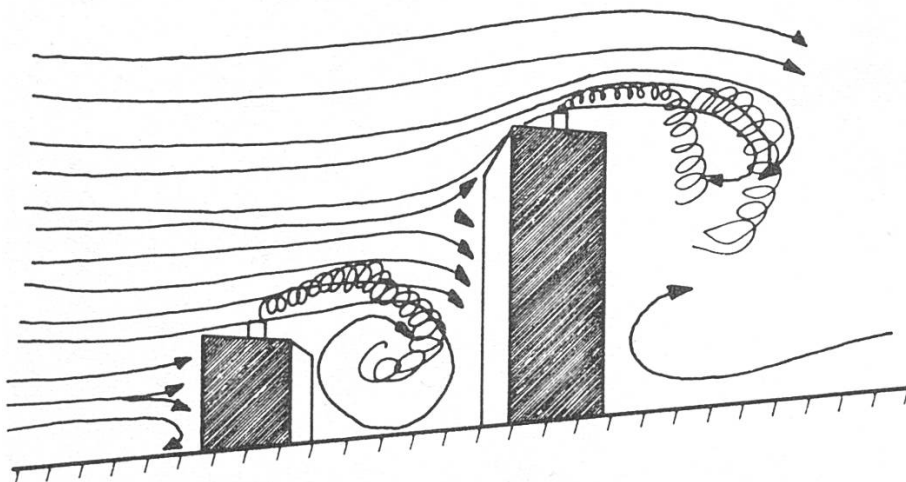


Abb.10: Das Strömungsverhalten des Windes bei grossen Baukörpern (10).

4.4. Chemische Umwandlung der Luftschadstoffe während des Transportes

Einmal emittierte Luftschadstoffe (= primäre Luftschadstoffe oder Vorläufersubstanzen) können, sobald sie in die Atmosphäre gelangen, vielfachen Veränderungen unterliegen, die zur Bildung von sekundären Luftfremdstoffen mit teilweise ganz anderen Eigenschaften und Wirkungen führen. Unter Einwirkung von Luftfeuchtigkeit, von Licht sowie durch katalytisch wirkende Substanzen oder durch Umsetzung mit weiteren Schadstoffen spielen sich komplexe Reaktionen ab, die heute im einzelnen noch wenig bekannt sind.

Bei den zwei bekanntesten Schadstoffen, dem Schwefeldioxid (SO_2) und den Stickoxiden (NO_x), weiss man, dass sie auf verschiedenen Wegen verändert werden können. Durch ihre Oxidation entstehen Sulfat und Nitrat, welche für das Auftreten der starken Säuren (Schwefelsäure H_2SO_4 und Salpetersäure HNO_3) im Regen, Schnee, Nebel usw. verantwortlich sind. Diese Säuren gelangen dann mit dem Niederschlag (z. B. «saurer Regen») auf die Erde zurück (= *nasse Deposition*). Sulfate und Nitrate können auch in feinsten Staubpartikeln oder in Aerosolen enthalten sein, welche auf die Erde abgelagert werden (= *trockene Deposition*). Die Reaktionszeiten für die Oxidationen hängen von vielen Faktoren ab; sie betragen höchstens einige Stunden bis einige Tage. Dem entsprechen Transportwege bis zu einigen hundert Kilometern. So werden z. B. Stickoxide schneller zu Salpetersäure und Nitraten umgewandelt als Schwefeldioxid in Schwefelsäure und Sulfate.

Im weiteren sei auf die Bildung von Photooxidantien, insbesondere des Ozons (O_3) hingewiesen. Dieses bildet sich, wenn ein Gemisch von Stickoxiden (NO/NO_2) und Kohlenwasserstoffen (HC) intensiver Sonnenstrahlung ausgesetzt wird (= photochemischer Smog). Bedingt durch die während der Umwandlung stattfindende Verfrachtung treten hohe Ozonkonzentrationen auch abseits der primären Schadstoff-Emissionsquellen (hauptsächlich Verkehr) auf. Das aus den Ballungsräumen in ländliche Gebiete verfrachtete Ozon kann dort über Nacht trotz fehlender Sonneneinstrahlung erhalten bleiben, während mehrerer Tage angereichert und über entsprechend weite Distanzen transportiert werden. Die Oxidantienbelastung ist damit nicht nur ein lokales, sondern ein grossräumiges Problem. Obwohl das Ozon auch in der natürlichen Zusammensetzung der Luft vorhanden ist, besteht heute kein Zweifel

mehr darüber, dass die erhöhten Konzentrationen anthropogenen Ursprungs sind. Derartige Einflüsse konnten auch im Kanton Bern nachgewiesen werden (11).

Es lassen sich heute keine einfachen oder monokausalen Gesetzmässigkeiten zwischen der Emissionsrate und der effektiven atmosphärischen Konzentration von Luftschadstoffen herleiten. Trotzdem werden derzeit grosse Anstrengungen unternommen, sowohl die physikalisch-chemischen als auch die chemischen Vorgänge zu berechnen und zu simulieren. In den physikalischen oder mathematischen Modellen geht es darum, aufgrund der heutigen Kenntnisse, lufthygienisch typische oder gefährliche Situationen (z. B. nach Wetterlagen) zu charakterisieren oder gar vorherzusagen.

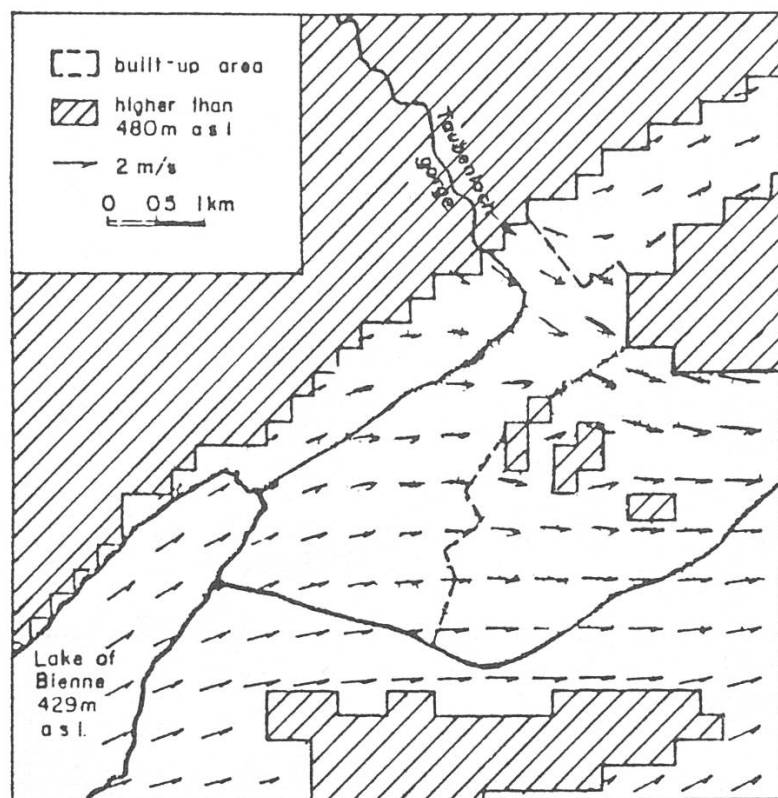


Abb. 11: Modell der Partikelausbreitung bei Südwestwind in der Region Biel (12).

Ebenso dienen Flugaufnahmen, Satellitenbilder und Filmaufnahmen (sogenannte Zeitrafferfilme) zum bessern Verständnis der Zusammenhänge. Grossräumige Modelle werden auch dazu verwendet, die grenz-

überschreitenden Schadstoffflüsse innerhalb ganzer Kontinente zu berechnen. Die Erfahrung lehrt jedoch, dass die eigentlichen Messungen dadurch nicht ersetzt werden können (Verifikation).

5. Die Immissionen

5.1. Messung der Immissionen und Immissionsgrenzwerte

Zur Beurteilung einer Immissionssituation muss eine bestimmte Anzahl von Messwerten vorliegen, die während eines Jahres am gleichen Messstandort ermittelt wird. Aus einer nach statistischen Kriterien festgelegten Mindestzahl von Einzelmessungen (Halbstunden-, Tagesmittelwerte) wird ein Langzeitwert und ein Kurzzeitwert gebildet. Diese beiden Werte werden mit den Immissionsgrenzwerten verglichen. Daneben können auch orientierende Messungen von kürzerer Zeitdauer durchgeführt werden.

Allesamt sind diese Immissionsmessungen sehr aufwendig und auch kostspielig, da die Luftschadstoffe im Immissionsbereich in sehr tiefen Konzentrationen (Mikrogrammbereich; 1 Mikrogramm = 1 Millionstel Gramm) vorhanden sind und deshalb hochempfindliche Messinstrumente eingesetzt werden müssen. Diesen Umständen ist es auch zuzuschreiben, dass systematische Immissionsmessungen erst Mitte der sechziger Jahre einsetzen.

Die massgeblichen Kriterien der vom Bundesamt für Umweltschutz 1984 aufgestellten Immissionsgrenzwerte (13) sind einerseits humantoxikologischer Art (Gesundheitsschutz des Menschen) und andererseits biologischer und pflanzenphysiologischer Art. Das Erreichen der Immissionsgrenzwerte signalisiert die Notwendigkeit, dass ohne weitere Verzögerung wirksame Massnahmen auf der Emissionsseite anzuordnen sind. In diesem Sinne sind die Immissionen als Resultat aus der Emission und der Transmission zu verstehen.

5.2. Die Immissionssituation

Das Nationale Beobachtungsnetz für Luftfremdstoffe, NABEL, das seit 1980 in Betrieb ist, dient dazu, den allgemeinen Stand und die Entwicklung der Luftverschmutzung in der Schweiz zu erfassen. Es umfasst zur-

zeit acht Messstationen. Diese lassen sich standortmässig wie folgt charakterisieren:

Dübendorf	Agglomeration
Zürich	Stadtzentrum
Basel	Stadttrand
Sion	ländlich
Payerne	ländlich
Lugano	Stadtzentrum
Tänikon	ländlich
Jungfraujoch	hochalpin

Wie aus der nachfolgenden Abbildung hervorgeht, ist die Schadstoffbelastung je nach Standort sehr unterschiedlich:

Region	Immissionskonzentrationen (Jahresmittelwerte)		
	SO ₂ µg/m ³	NO ₂ µg/m ³	O ₃ µg/m ³
Alpine Gebiete (über 2000 m ü. M.)	2– 3	2– 3	60–80
Ländliche Gebiete	8–12	20– 30	40–70
Agglomerationen	30–40	30– 50	30–50
Stadtzentren	50–70	60–140	20–30

Abb.12: Immissionssituation Schweiz (14).

Die Konzentrationen der primären Schadstoffe Schwefeldioxid (SO₂) und Stickstoffdioxid (NO₂) sind in städtischen Gebieten im allgemeinen erheblich höher als in ländlichen. Aus Gründen des Umwelt- und Gesundheitsschutzes sollte die Konzentration von Schwefeldioxid 30 Mikrogramm pro Kubikmeter, jene von Stickstoffdioxid 40 Mikrogramm pro Kubikmeter (als Jahresmittelwert) nicht übersteigen. In Stadtzentren und in städtischen Agglomerationen, in denen rund 60% der Schweizer Bevölkerung leben, werden heute somit Schadstoffkonzentrationen gemessen, die zum Teil erheblich über den Immissionsgrenzwerten liegen.

Beim Ozon (O_3), welches als sekundärer Luftschadstoff unter dem Einfluss von Sonnenlicht aus Stickoxiden (NO_x) und Kohlenwasserstoffen (HC) gebildet wird, ist die Belastung in den ländlichen Gebieten grösser als in Städten. Dafür sind die verschiedenen Umwandlungsmechanismen verantwortlich (vgl. Kap. 4.4). Hohe Ozonkonzentrationen treten nur bei Hochdruckwetterlagen zwischen Frühling und Herbst auf. Dann können Ozonbelastungen bis zu 200 Mikrogramm pro Kubikmeter während mehrerer Tage auftreten. Die Schädlichkeitsgrenze von Ozon liegt sowohl für den Menschen als auch für die Vegetation bereits beim Einwirken während weniger Stunden bei 100 bis 120 Mikrogramm pro Kubikmeter.

Obwohl sich keine der acht NABEL-Messstationen im Kanton Bern befindet, dürfte die allgemeine lufthygienische Situation, wie sie sich im NABEL-Messnetz zeigt, auch auf die Gebiete des Kantons Bern *übertragbar* sein. Selbstverständlich müssen dabei lokale Abweichungen berücksichtigt werden. Die in verschiedenen Regionen des Kantons Bern durchgeführten *orientierenden Messungen* zeigen jedenfalls diesen Sachverhalt mit aller Deutlichkeit.

5.3. Import-Export von Luftfremdstoffen

Aus Messungen und zahlreichen Modellrechnungen über den weiträumigen Transport von Schwefelverbindungen in Europa ist heute bekannt, dass in der Schweiz ein grosser Teil der *Schwefelverbindungen in den Niederschlägen* (= nasse Deposition) aus dem Ausland stammt. Daraus wird fälschlicherweise häufig geschlossen, dass dies für die Luftverschmutzung ganz allgemein gilt. Dies trifft jedoch bei weitem nicht zu. Einen ersten Hinweis dazu erhalten wir aus den Immissions-Messresultaten des NABEL-Messnetzes, denn mit zunehmender Dichte der Luftverschmutzungsquellen nimmt auch der Schadstoffgehalt durch primäre Luftfremdstoffe zu.

In unzähligen Untersuchungen ist zudem nachgewiesen worden, dass vor allem bei Windstille und bei Inversionslagen hohe Schadstoffkonzentrationen im Immissionsbereich auftreten. Diese Luftschadstoffe können daher nicht aus dem Ausland stammen, sondern werden durch unsere Heizungen und unsere Autos verursacht, wie dies das Beispiel aus der Stadt Zürich vom 31. Dezember 1984 auf eindruckliche Weise zeigt.

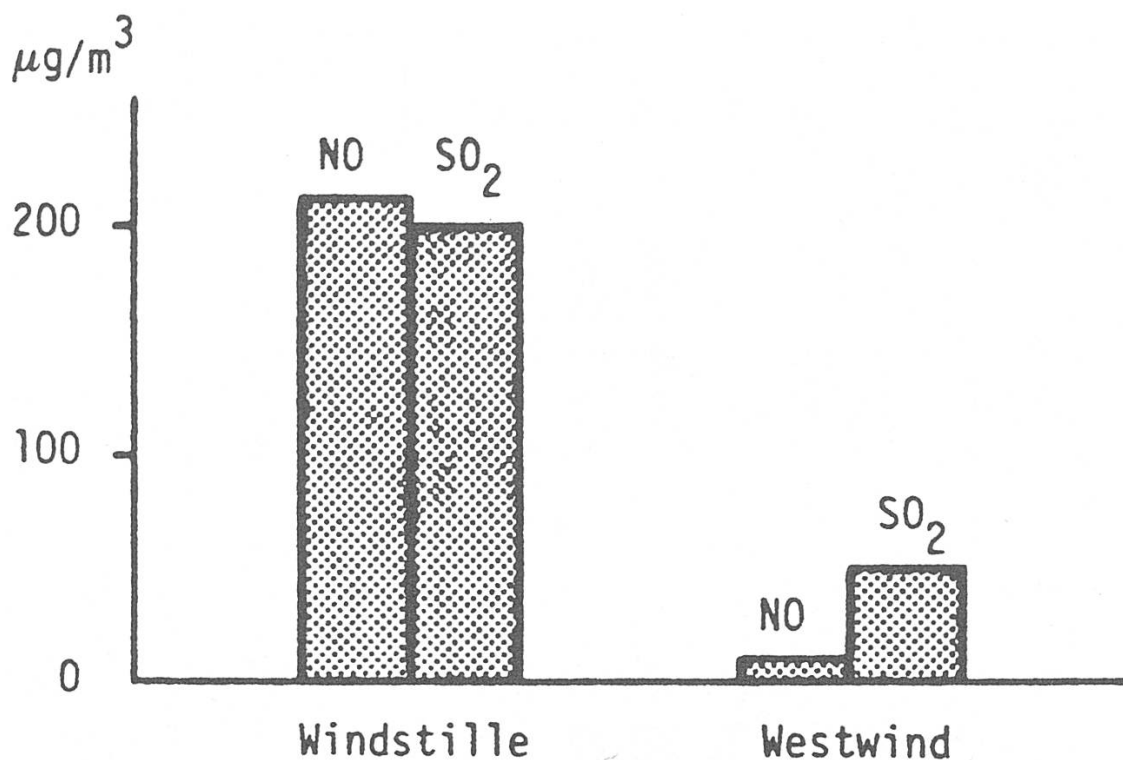


Abb.13: Schadstoff-Immissionen bei Windstille und Westwind (15)

Würde die Schadstoffbelastung unserer Luft vorwiegend durch weiträumige Verfrachtungen aus dem Ausland verursacht, so müssten in der ganzen Schweiz annähernd gleich hohe Immissionen von SO₂ und NO₂ gemessen werden. Dies ist offensichtlich nicht der Fall. Die in der Luft vorhandenen *primären Schadstoffe* stammen hauptsächlich aus lokalen und regionalen Emissionsquellen. Dagegen können die in der Luft chemisch umgewandelten, *sekundären* Schadstoffe am Ort ihres Einwirkens neben lokalen und regionalen Anteilen auch beträchtliche Schadstoffanteile aus *weiträumiger Verfrachtung* enthalten.

6. Schlussbemerkung: Die räumliche Beziehung zwischen der Luftverschmutzung und den Waldschäden

Zahlreich sind die Forschungsergebnisse, welche die vielfältigen Beziehungen zwischen der Luftverschmutzung und den Waldschäden *belegen*. Um trotzdem einen gewissen Überblick erhalten zu können, empfiehlt es sich, eine räumliche Differenzierung vorzunehmen. Für den Kanton

Bern ergibt sich eine solche Gliederung am einfachsten aufgrund der Topographie mit «Jura», «Mittelland» und «Voralpen/Alpen». Diese drei Gebiete unterscheiden sich auch bezüglich des Klimas und – teilweise als Folge davon – bezüglich der lufthygienischen Situation. Selbstverständlich kann die Abgrenzung der einzelnen Gebiete nicht scharf sein. Zusätzlich sind all diejenigen Gebiete gesondert zu betrachten, welche sich in unmittelbarer Nähe einer Emissionsquelle befinden. Das sind die «klassischen Schadengebiete». Dazu gehören städtische Gebiete, Gebietsstreifen entlang dichtbefahrener Strassen und Gebiete in unmittelbarer Nähe von Industriekomplexen.

In jedem der so umrissenen vier Gebiete treten heute Waldschäden auf. Dabei ist es selbstverständlich, dass sich in jedem Gebiet eine Vielzahl von Schadenfaktoren überlagern. Trotzdem können aus Immissionswerten, klimatischen Daten sowie Ergebnissen von Blatt- bzw. Nadelanalysen gewisse Schlüsse gezogen werden.

Ohne auf die Problematik der andern Gebiete näher einzugehen, muss der voralpine und alpine Raum in mancher Hinsicht als eigentlicher «Problemraum» bezeichnet werden. Einerseits werden die Lebensbedingungen für die Vegetation mit zunehmender Höhe schwieriger (z. B. Klima, Steilheit des Geländes usw.), und die Bewirtschaftung wird notgedrungen immer mehr vernachlässigt, andererseits ist gerade in dieser Gegend die Bedeutung der Wälder wegen ihrer natürlichen Funktionen besonders hoch (17).

Allgemein kann gesagt werden, dass die mittleren Konzentrationen primärer Schadgase wie SO_2 oder NO_2 mit zunehmender Höhe abnehmen. Dies ist mit Messungen belegt worden. Andererseits wurde beobachtet, dass in Höhenlagen zwar geringere Durchschnittswerte, dafür aber stärkere Streuungen mit zeitweilig hohen Spitzenwerten der Schadstoffe auftreten. Mit steigender Höhe nehmen die mittlere Windgeschwindigkeit und besonders die Windspitzengeschwindigkeit zu. Damit verbunden ist ein erhöhter Immissionsfluss ($\text{Schadgaskonzentration} \times \text{Windgeschwindigkeit}$), was die Schadenwirkung erheblich steigert. Die Häufung von Waldschäden in windexponierten Hanglagen, in Kammlagen oder im Bereich von Talverengungen bestätigt die Bedeutung von Wind und Windgeschwindigkeit bei der Walderkrankung (16).

Mit steigender Höhe nimmt auch die Niederschlagsmenge zu. Orographische Niederschläge sowie das verstärkte Auftreten von Wolken und

Nebel in Hanglagen können lokal erhöhte Raten der nassen Deposition bewirken.

Von besonderer Bedeutung in Höhenlagen ist aber auch das Ozon. Verschiedene Studien im In- und Ausland belegen, dass oberhalb der durchmischten Luftschicht die mittlere Ozonkonzentration höher ist als in Tieflagen. Dies beruht darauf, dass Ozon in diesen Gebieten weniger intensiv zerstört wird. In Tieflagen sind die Ozonkonzentrationen am Tag hoch und in der Nacht (wegen der Zerstörung und fehlender Bildung) gering. In Hochlagen fehlen zwar die extremen Spitzenwerte, dafür bleibt die Konzentration auch während der Nacht erhalten, was zu erhöhten Mittelwerten führt. Dies bedeutet eine Langzeit-Belastung der Vegetation, deren Konsequenzen vermehrt beachtet werden müssen.

Auch wenn heute das Hauptaugenmerk auf die Waldschäden und die damit verbundenen Auswirkungen gerichtet ist, darf nicht vergessen werden, dass dieselbe Luftverschmutzung ebenso auf den Menschen und seine gesamte Umwelt (Boden, Wasser, Landwirtschaft, Bauwerke usw.) einwirkt. Wir wissen durch Beobachtung und Experiment recht viel über diese Zusammenhänge; wir erkennen die Schäden, aber wir können heute die Dinge noch nicht quantitativ fassen, weil zu viele Faktoren zusammenspielen.

Quellenhinweise

- (1): Mathys H. (1984): Die lufthygienischen Zusammenhänge. Geographica Helvetica Nr. 2, Jahrgang 39.
- (2): Waldsterben und Luftverschmutzung. Eidg. Departement des Innern, 126 S., Bern, September 1984.
- (3): Kant. Volkswirtschaftsdirektion Bern: Jahresbericht 1983.
- (4): Infras Zürich (1984): Massnahmen gegen das Waldsterben, z.Hd. der SGV und des VCS.
- (5): Bundesamt für Statistik (1983): Schweizerische Strassenverkehrszählung 1980. Statistische Quellenhefte, Heft 700.
- (6): Bundesamt für Umweltschutz (1985): Umweltschutz in der Schweiz, Bulletin 2/85.
- (7): Wanner H. (1983): Das Projekt Durchlüftungskarte Schweiz. Informationen und Beiträge zur Klimaforschung, Nr. 18, Geographisches Institut der Universität Bern.

- (8): Wanner H. (1978): Art und Häufigkeit des Morgennebels in den Kantonen Bern und Solothurn. *Geographica Bernensia*, Heft G 7.
- (9): Franke E. (1977): Stadtklima, Beiträge zur Umweltplanung. Karl Krämer Verlag Stuttgart.
- (10): Baumüller J. (1975): Ein Beitrag der Meteorologie zur Raumplanung. *FBW-Blätter*, Folge 1 – 1975.
- (11): Fuhrer J. (1980): Der Ozongehalt der bodennahen Luftschicht in der Region Bern. *Wasser, Energie, Luft*. Heft 5/6.
- (12): Filliger P. (1984): Applied study on urban and pollution climatology. *Zürcher Geographische Schriften*. Heft Nr. 14.
- (13): Eidgenössisches Departement des Innern (1984): Luftreinhalte-Verordnung (Entwurf), Anhang 7.
- (14): Bundesamt für Umweltschutz (1984): Luftbelastung 1983. Schriftenreihe Umweltschutz Nr. 30.
- (15): Eidgenössisches Departement des Innern (1985): Stellungnahme zur Veröffentlichung zu einer britischen Würdigung von Th. von Ungern – Sternberg.
- (16): Bucher J. (1984): Bemerkungen zum Waldsterben und Umweltschutz in der Schweiz. (*Forstw. Cbl.* 103, 16–27)
- (17): Fuhrer J. (1985): Waldschäden und Luftverschmutzung im Kanton Bern. *Umweltschutzkommission des Kantons Bern*, S. 48–52.