

Zeitschrift: Mitteilungen der Naturforschenden Gesellschaft Luzern
Herausgeber: Naturforschende Gesellschaft Luzern
Band: 31 (1990)

Artikel: Untersuchungen im Bereich der Luftreinigung durch den Kanton Luzern
Autor: Joller, Thomas / Filliger, Paul / Urech, Martin
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-523630>

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: 07.01.2026

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

Untersuchungen im Bereich der Luftreinhaltung durch den Kanton Luzern

THOMAS JOLLER

Der Grosse Rat des Kantons Luzern hat in den Jahren 1985 und 1988 zusammen rund 10 Mio. Franken für Aufgaben im Umweltschutzbereich auf Antrag des Regierungsrates bewilligt. Dabei wurden finanzielle Mittel für die Luftreinhaltung, den Lärmschutz, die Abfallbewirtschaftung, die Erhaltung der Bodenfruchtbarkeit und den Katastrophenschutz vorgesehen.

Ausgelöst wurde dieses Vorhaben durch das Umweltschutzgesetz, das Anfang 1985 in Kraft trat und durch seine Verordnungen (Luftreinhalte-Verordnung, Lärmschutz-Verordnung, Bodenschutzverordnung usw.). Diese rechtlichen Bestimmungen beauftragen die Kantone, auch in den obengenannten Umweltschutzbereichen aktiv zu werden.

Dabei galt es, vorerst die erforderlichen Kenntnisse über das Ausmass der Umweltbelastung zu erwerben und Massnahmen für die Erreichung der gestellten Ziele zu planen und zu beschliessen.

Im Bereich der Luftreinhaltung war der Kanton Luzern in vier Unterbereichen tätig. Als erstes galt es festzustellen, wo im Kanton Luzern was für Schadstoffe emittiert werden und in welchen Mengen. Der dabei erarbeitete Emissionskataster gibt Auskunft

über die verursacherbezogenen Anteile an den Schadstoffmengen (Verkehr, Feuerungen, Industrie und Gewerbe). Um feststellen zu können, in welchen, gegenüber den Emissionen verdünnten, Konzentrationen die Schadstoffe bei den Menschen, Tieren und Pflanzen vorliegen, wurde ein Messnetz zur Erfassung der Immissionen aufgebaut. Das Messnetz umfasst vierzehn Messstationen, die schwerpunktmässig in der Agglomeration Luzern angesiedelt sind. Bekanntlich werden die Schadstoffe, nach dem Ausritt z. B. aus den Kaminanlagen, durch das herrschende Windfeld verdünnt und verfrachtet. Dabei spielt auch die Schichtungsstabilität der Atmosphäre eine wichtige Rolle. Zudem sind die emittierten Stoffe in der Luft chemischen Prozessen und damit Veränderungen unterworfen. Um die gemessenen Immissionen besser verstehen zu können und um allfällige Modellrechnungen über die Ausbreitung der Schadstoffe ausführen zu können, liess der Kanton Luzern, zusammen mit den Innerschweizer Kantonen die Ausbreitungsklimatologie durch das Geographische Institut der Universität Bern erforschen. Der Artikel von P. FILLIGER in diesem Band zeigt die wichtigsten Ergebnisse dieser Untersuchungen auf.

Von grosser Bedeutung für das Verständnis der Problematik der Luftverschmutzung ist auch die Kenntnis der Wirkungen von Luftschadstoffen auf den Menschen, die Tiere, Pflanzen und Gebäude. Zu diesem Zweck hat der Kanton Luzern eine Flechtenstudie über das Gebiet des Kantons Luzern durch das Systematisch-Geobotanische Institut der Universität Bern erarbeiten lassen.

Die Flechtenstudie besteht aus einem Teil, der die Auswirkungen der Luftverschmutzung auf die Flechten flächendekkend ermittelt und aus einem, dem Vorkommen der einzelnen Flechten gewidmeten Teil. Beide Studien beruhen auf der hohen Sensibilität der Flechten im Hinblick auf ihr

Gedeihen gegenüber der Luftverschmutzung. Im vorliegenden Band der Mitteilungen vermittelt die Arbeit von M. URECH und Mitautoren «Bioindikation mit Flechten im Kanton Luzern», einen Einblick in die Methodik und Ergebnisse der Bioindikation mit Flechten.

Die beiden Arbeiten wurden von Institutionen der Universität Bern durchgeführt. Diese Institute bürgen für den wissenschaftlichen Gehalt der Arbeiten. Es ist aber Sache der Behörden des Kantons beim praktischen Vollzug des Umweltschutzgesetzes, z. B. bei der Ausarbeitung des vorgenannten Massnahmenplanes, diese Ergebnisse zu interpretieren und umzusetzen.

Dr. Thomas Joller
Amt für Umweltschutz
Klosterstrasse 31
6003 Luzern

Durchlüftungskataster Innerschweiz

PAUL FILLIGER

Zusammenfassung

Die wichtigsten Resultate einer ausgedehnten Studie über das Ausbreitungsklima der Innerschweiz werden in einem zusammenfassenden Überblick dargestellt. Ziel der Studie ist eine flächendeckende Charakterisierung der Wind- und Temperaturverhältnisse in der bodennahen Schicht der Atmosphäre im Hinblick auf die Ausbreitung von Luftschadstoffen. Die Untersuchungen basieren auf Temperaturmessungen in verschiedenen Höhen, Nebelbeobachtungen und Windmessungen an einer Vielzahl von Standorten. Messungen der Bodenoberflächentemperatur aus Satelliten werden zur Bestimmung der räumlichen Verteilung des Auftretens von Bodeninversionen herangezogen. Eine Synthese der Resultate wird in Kartenform präsentiert.

Résumé

Les résultats les plus importants d'une étude sur la climatologie de dispersion en Suisse centrale font l'objet d'un aperçu général. Le but de l'étude est de caractériser les conditions de vent et de température dans la couche limite de l'atmo-

sphère en regard de la dispersion des polluants. Les recherches se fondent sur des mesurages de température à diverses altitudes, des relevés de vent et des observations de brouillard à plusieurs stations. Une analyse des données fournies par satellites est employée pour déterminer la répartition spatiale des inversions au sol. Une synthèse des résultats est présentée sous forme de deux cartes géographiques.

Abstract

The most important results of an extended study on the dispersion conditions in Central Switzerland are represented in a condensed survey. The target of the study is a characterization of the wind and temperature conditions in the planetary boundary layer with respect to the dispersion of air pollutants. The research is based on measurements of temperature at various altitudes, of wind at numerous locations and on fog observations. Surface temperature measurements from satellites are used to determine the spatial distribution of ground-based inversions. A synthesis of the results is presented in the form of two maps.

Einleitung

Der Begriff des *Durchlüftungskatasters* wird im folgenden für eine systematische, flächendeckende Erfassung des Ausbreitungsklimas einer Region verwendet. In der meteorologisch-lufthygienischen Wirkungskette (siehe Abb.1) stellen die in der Atmosphäre ablaufenden Umwandlungs- und Ausbreitungsprozesse (*Transmission*) das Bindeglied zwischen der Schadstoff-*Emis-*

sion einerseits und der Schadstoff-*Immission* andererseits dar. Die Immission kann negative *Wirkungen* an Mensch, Tier, Pflanze oder toter Materie verursachen, welche ihrerseits zur Formulierung von *Massnahmen* führen. Diese müssen auf der Seite der Emissionen ansetzen; damit wird die Wirkungskette geschlossen. Eine massnahmenorientierte Ursache-Wirkungsanalyse in der Luftreinhaltung muss deshalb auf einen Emissions-, Durchlüftungs-, Immissions-

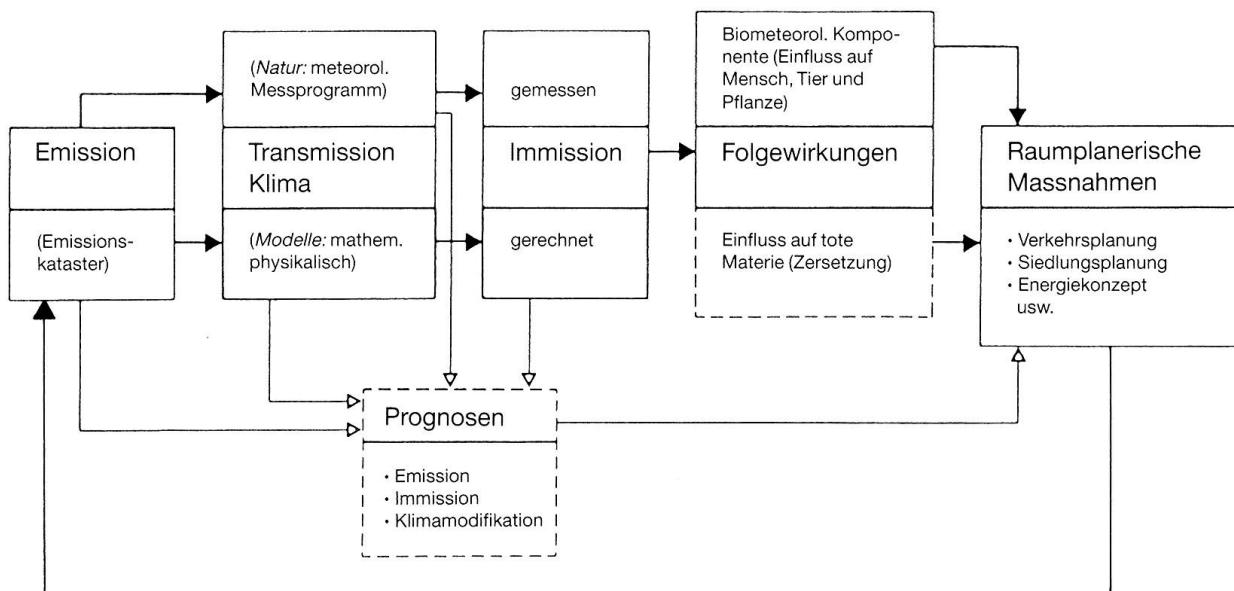


Abb.1: Die meteorologisch-lufthygienische Wirkungskette. (Nach WANNER et al. 1982.)

und Wirkungskataster zurückgreifen können. Diese Einsicht führte im Jahre 1985 auf Initiative des Amtes für Umweltschutz des Kantons Luzern zu einem Auftrag an das Geographische Institut der Universität Bern, mit dem Ziel, die Ausbreitungsverhältnisse auf dem Kantonsgebiet zu charakterisieren. Dem Projekt schlossen sich die übrigen Innerschweizer Kantone an. Es wurde innerhalb von 3 Jahren durchgeführt. Der Schlussbericht der Studie liegt vor (RICKLI et al., 1989). Im folgenden soll eine kurze Zusammenfassung der wichtigsten Resultate gegeben werden.

Der Transport und die Verdünnung von Schadstoffen in der Atmosphäre wird durch die *Wind- und Turbulenzverhältnisse* bestimmt. Ein Durchlüftungskataster hat deshalb primär diese beiden meteorologischen Elemente in ihrer zeitlichen und räumlichen Variation zu erfassen. Zwei Hauptprobleme stellen sich dabei: Erstens sind Turbulenzmessungen in der Atmosphäre ausserordentlich aufwendig, und zweitens sind alle meteorologischen Messungen grundsätzlich punktuelle Erhebungen, deren räumliche Repräsentativität untersucht werden muss.

Der zweite Aspekt ist in der komplexen Topographie der Schweiz von besonderer Bedeutung. In der Praxis behilft man sich bei einer Ausbreitungsklimatologischen Charakterisierung mit der Analyse von Typstandorten, die für ausgewählte, topografische Einheiten repräsentativ sind. Fehlende Turbulenzmessungen können teilweise durch die Analyse der vertikalen Temperaturschichtung ersetzt werden, da diese eng mit der atmosphärischen Turbulenz korreliert ist.

Temperaturschichtung

Temperaturinversionen

Das Phänomen der *Temperaturinversion* ist von grundlegender Bedeutung für die Verdünnung von Luftschaadstoffen in der Grundsicht der Atmosphäre. Steigt die Temperatur mit zunehmender Höhe an, so werden die vertikalen Durchmischungsprozesse, die zu einer guten Verdünnung von Luftschaadstoffen führen, stark reduziert oder völlig unterbunden. Als Folge davon kann die Konzentration von Luftschaadstoffen stark ansteigen und Maximalwerte errei-

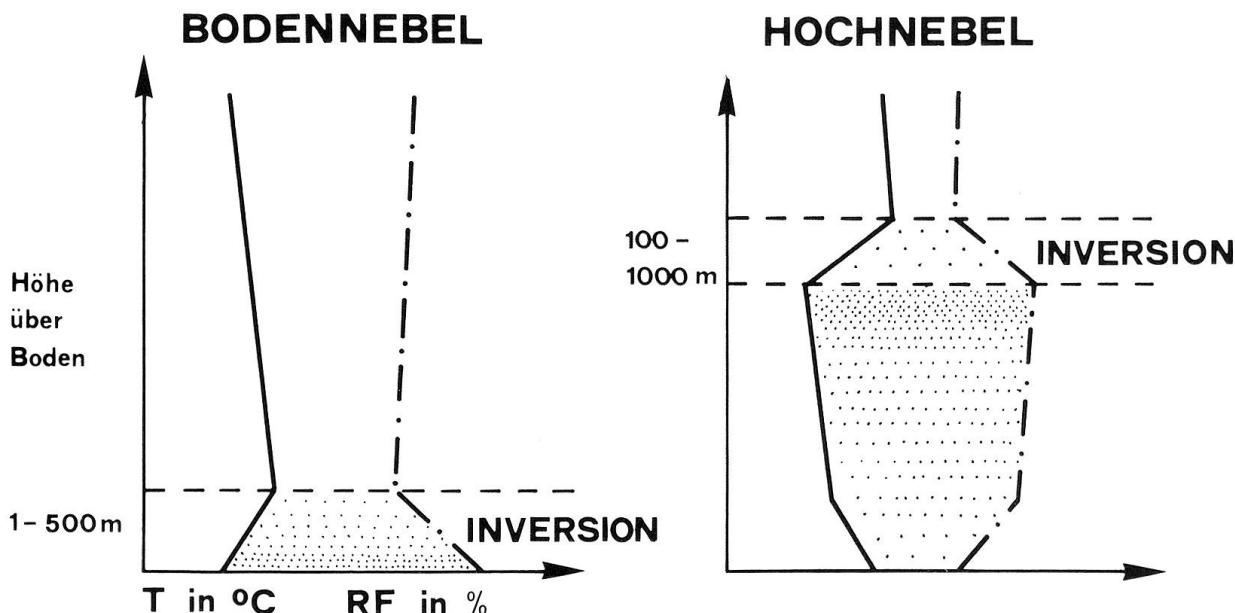


Abb. 2: Höhenverteilung von Temperatur (T) und relativer Feuchte (RF) beim Auftreten von Bodennebel resp. Hochnebel.

chen. Es werden zwei Arten von Inversionen unterschieden (Abb. 2).

Liegt die Kaltluft unmittelbar über dem Boden, so spricht man von *Bodeninversionen*. Sie sind oft nur einige 10 m mächtig und treten in jeder klaren Nacht auf, auch im Sommer. Meistens lösen sie sich während des Tages auf. Im Herbst und im Winter sind sie oft mit Bodennebel verbunden. Ihre Bildung ist von der lokalen Topographie abhängig. Bodeninversionen behindern vor allem die Ausbreitung von Schadstoffen aus bodennahen Quellen. Das Auftreten von lokalen Spitzenwerten der Schadstoffbelastung ist häufig auf das Vorhandensein hoher Emissionen in Kombination mit einer kräftigen Bodeninversion zu erklären (z. B. Morgenverkehrsspitze nach Strahlungsnacht mit Ausbildung einer kräftigen Bodeninversion).

Höheninversionen sind demgegenüber ein grossräumigeres Phänomen. Die Temperaturzunahme in der Höhe ist häufig mit einer kompakten Hochnebeldecke kombiniert, die das ganze schweizerische Mittelland bedeckt. Da Höheninversionen den vertikalen Luftaustausch weitgehend unterbinden kön-

nen, bleiben die Schadstoffe darunter gefangen. Liegt die Höheninversion nur wenige hundert Meter über Grund und bleibt sie während Tagen bestehen, so können Smoglagen mit weiträumig hohen Schadstoffbelastungen entstehen.

Um einen Überblick über die zeitliche *Dynamik des Inversionsauf- und Inversionsabbaus* zu erhalten, wurde ein Jahreskollektiv von stündlichen Temperaturdaten von 4 Stationen (Luzern 456 m ü. M., Sonnenberg 680 m ü. M., Napf 1407 m ü. M., Pilatus 2106 m ü. M.) untersucht. Für jede Stunde wurde eine Schätzung der Höhe der Inversionsbasis vorgenommen (BRUNNER 1988) und in 4 Klassen eingeteilt.

Die Abbildungen 3 bis 6 zeigen den Tagesgang der vier ausgeschiedenen Klassen für die vier Jahreszeiten. Die erste Klasse (Inversionsbasis < 240 m, dunkle Schraffur) ist ungefähr gleichzusetzen mit den Bodeninversionen. Sehr deutlich ist zu erkennen, dass im Sommer (Abb. 4) in 60 bis 70% aller Nächte Bodeninversionen auftreten, diese sich aber am Morgen sehr rasch auflösen. Im Winter (Abb. 6) ist die Häufigkeit von Bodeninversionen während der Nacht sogar

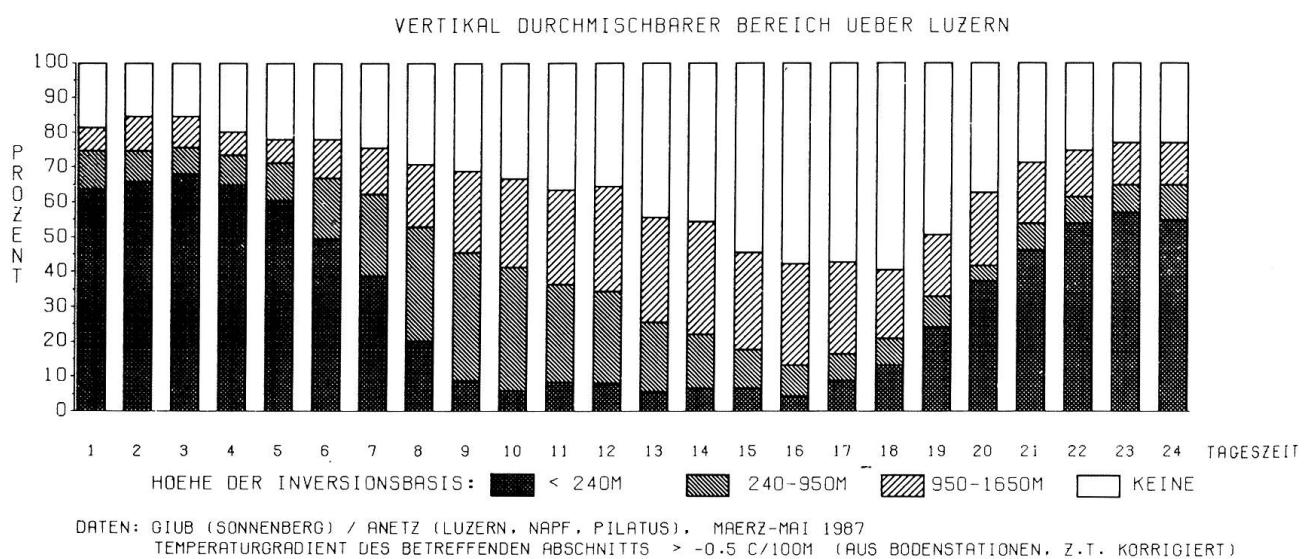


Abb. 3: Mittlerer Tagesgang der Mischungsschichthöhe im Frühling. Die Mischungsschichthöhe wird durch die Höhe der Inversionsbasis approximiert. Sie bestimmt den vertikal durchmischbaren Bereich. (Auswertung: T. BRUNNER.)

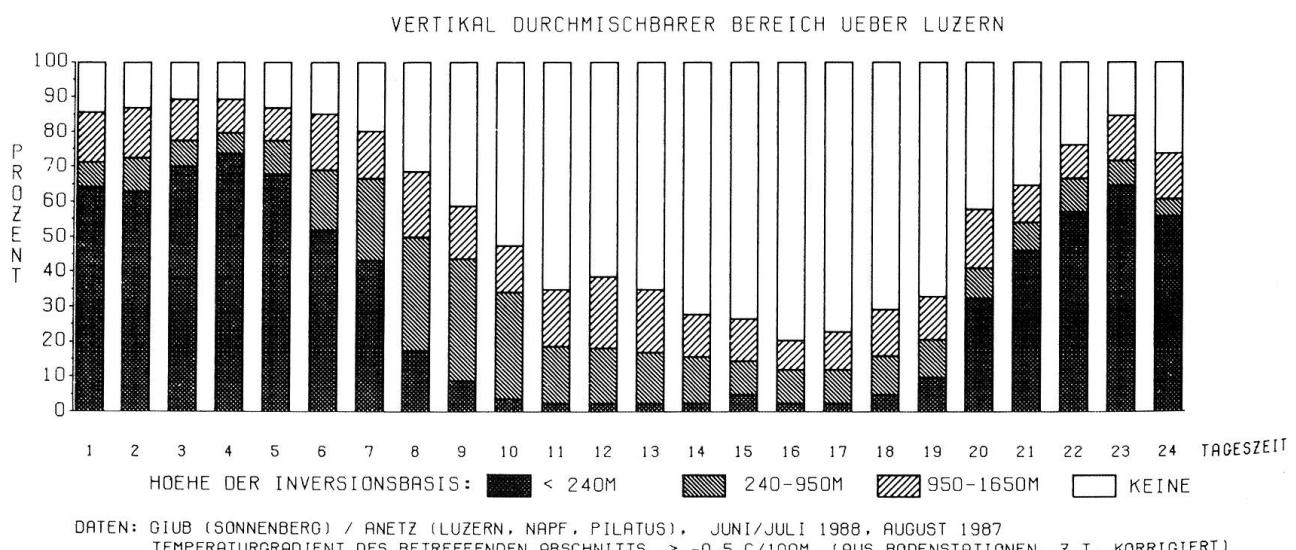


Abb. 4: Mittlerer Tagesgang der Mischungsschichthöhe im Sommer.

geringer als im Sommer, sie lösen sich jedoch am Tag nur zögernd auf. Die zweite Klasse (Inversionsbasis 240–950 m), die die typischen Hochnebellagen umfasst, tritt im Herbst (Abb. 5) am häufigsten auf. Weiter ist hervorzuheben, dass im Herbst und im Winter während der Tagesstunden in mehr als 50% aller Fälle der vertikale Ausbreitungsraum auf Werte unter 950 m be-

schränkt bleibt. Im Frühling und im Sommer betrifft dies dagegen weniger als 20% der Tage. Obwohl diese Auswertungen auf Messungen in der Region Luzern beruhen, können sie durchaus für ein grösseres Gebiet als repräsentativ angesehen werden. Eine Ausnahme bildet die Häufigkeit von Bodeninversionen, die beträchtliche räumliche Unterschiede zeigt.

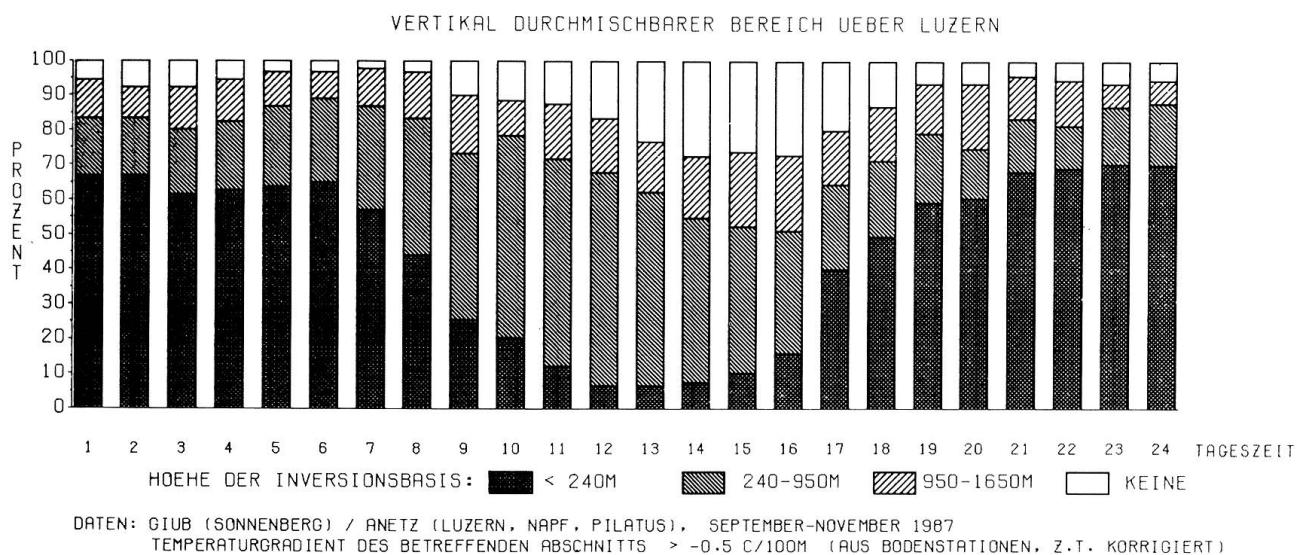


Abb.5: Mittlerer Tagesgang der Mischungsschichthöhe im Herbst.

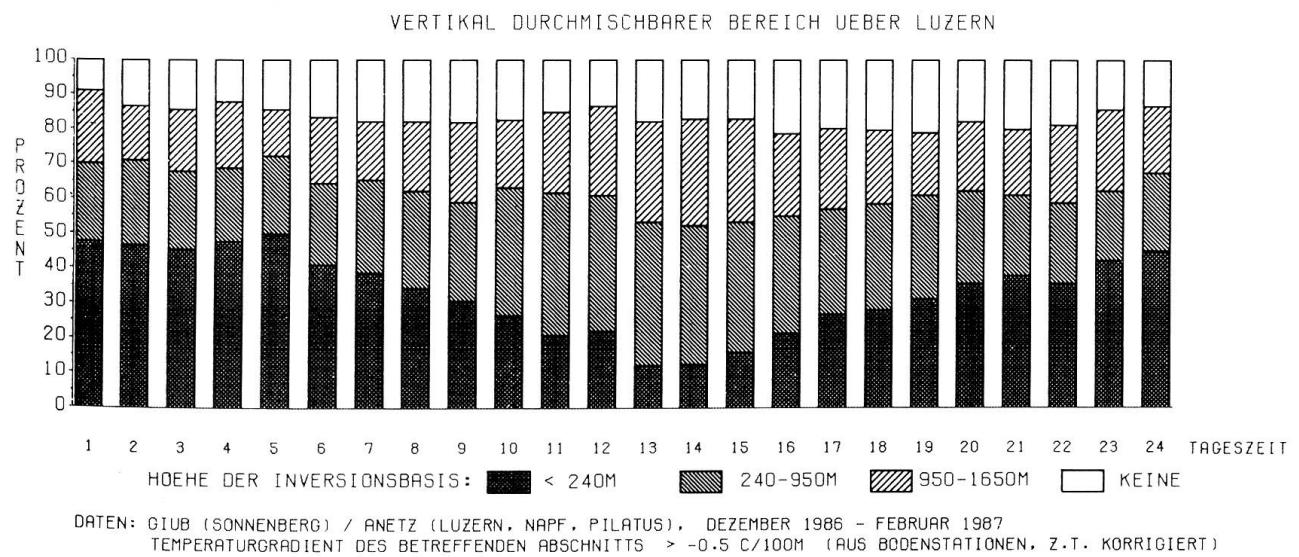


Abb.6: Mittlerer Tagesgang der Mischungsschichthöhe im Winter.

Satellitenauswertungen

Um die räumliche Variation des Auftretens von Bodeninversionen zu bestimmen, wurde aus einer Serie von 13 NOAA-Satellitenbildern eine Karte der höhenkorrigierten *Bodenoberflächentemperaturen* (Abb. 7) erstellt (Methodik siehe NEJEDLY 1986). Je dunkler die Signatur, desto tiefer ist im Mittel die Bodenoberflächentemperatur

und desto höher ist die Gefährdung durch stagnierende Kaltluft. Obwohl die Auflösung der NOAA-Satellitenbilder relativ grob ist (1 km^2), ist deren Auswertung besonders wertvoll, da nur sie flächendeckende Aussagen erlauben. Damit kann ein wichtiges Element des Ausbreitungsklimas (nächtliche Bodeninversion) in seiner räumlichen Variation bestimmt und kartiert werden. In

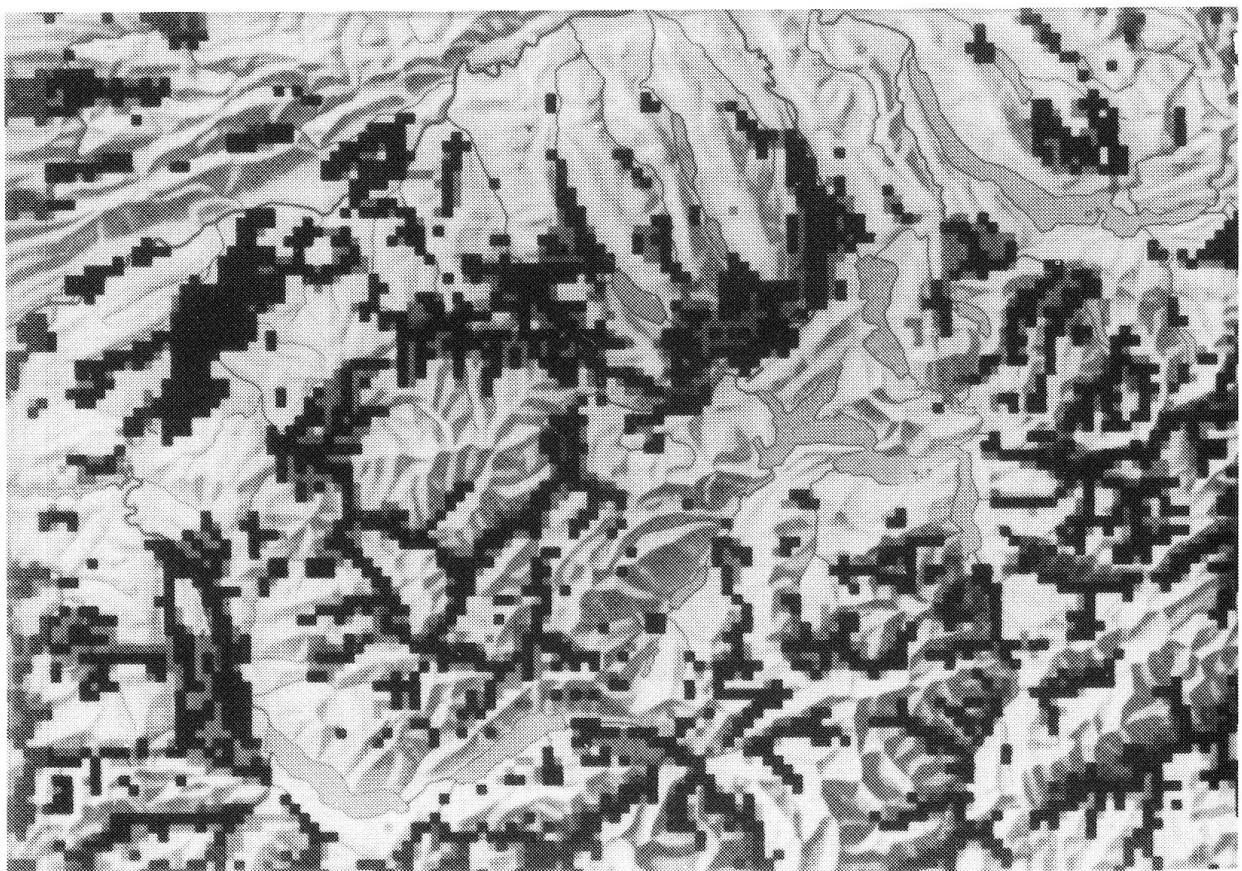


Abb. 7: Räumliche Verteilung der Bodenoberflächentemperaturen während wolkenfreien Nächten, bestimmt aus Thermalbildern des NOAA-Satelliten. (Auswertung: G. NEJEDLY.)

der Abb. 7 sind die ausgedehnten Kaltluftgebiete in den grossen Ebenen und auf verschiedenen Hochplateaus deutlich zu erkennen. Eine Beziehung zur Topographie ist zwar festzustellen, sie ist aber nicht gesetzmässig. So sind diverse Mulden zu erkennen, die keine tiefen Oberflächentemperaturen zeigen, und umgekehrt sind tiefe Temperaturen auch an Orten zu beobachten, wo man sie aufgrund der Topographie nicht erwarten würde. Die Oberflächenbedeckung und die Bodenart sind die Ursache für dieses Verhalten.

Nebeldaten

Bodennebel tritt immer zusammen mit einer Bodeninversion auf. Die systematisch durchgeföhrten Nebelbeobachtungen der Schweizerischen Meteorologischen Anstalt

(SMA) sind deshalb eine weitere, wichtige Informationsquelle. Als Nebeltage gelten Tage, an denen morgens um 07.00 Uhr die Sichtweite kleiner als 1000 m ist. Das dichte Nebel-Beobachtungsnetz der Schweiz wurde erst kürzlich ausgewertet und dargestellt (TROXLER 1987). In der Tab. 1 ist für ausgewählte Standorte in der Innerschweiz die Zahl der Nebeltage im Winterhalbjahr zusammengestellt. Grosse Unterschiede zwischen den Stationen sind zu erkennen. Der Vergleich mit Abb. 7 zeigt auch, dass einige Stationen mit geringen Nebelhäufigkeiten in Gebieten mit niedrigen Bodenoberflächentemperaturen liegen. Dies ist ein Indiz dafür, dass sich Bodeninversionen ausbilden können, ohne dass es zur Nebelbildung kommt. Dieser Umstand ist bei der Interpretation der Tab. 1 zu berücksichtigen.

Kaltluftgebietskarte

Die *Kaltluftgebietskarte* der Innerschweiz (siehe Kartenbeilage) ist eine *Synthese* aller bisher aufgeführten Auswertungen. Es wurden darin die *Satellitenbildauswertungen*, die *Temperaturmessungen*, die Informationen des *Reliefs* und der *Nebelhäufigkeit* miteinbezogen. Die ausgeschiedenen fünf Klassen machen eine Aussage über die Ausdehnung und die Temperatur der Kaltluft sowie über den Zustand der Grenzschicht (bodennahe Schicht der Atmosphäre). Je geringer die Mächtigkeit der Kaltluft und je stabiler die Grenzschicht, desto ungünstiger sind im Mittel die Ausbreitungsbedingungen für Schadstoffe aus niedrigen Quellen. Die Kaltluftgebietskarte gibt deshalb ein lufthygienisches Gefährdungspotential an. Dies besonders auch deshalb, weil sie indirekt Auskunft über die Häufigkeit schwacher Winde gibt. Die Kaltluftgebiete sind häufig von der grossräumigen Windströmung entkoppelt und weisen deshalb niedrige Windgeschwindigkeiten auf. Aus diesem Grund ist die Karte eine grundlegende Basis für die Beurteilung der Ausbreitungsbedingungen. Zusammen mit der *Windkarte* in der Beilage ist sie das Kernstück des Durchlüftungskatasters.

Ein Blick auf die Karte zeigt, dass die in bezug auf Häufigkeit und Intensität hartnäckigsten Kaltluftseen im Wauwilermoos, im Suhretal, im Reusstal ZG und in der Gegend Buholz bis Ruswil zu finden sind. Das Plateau von Menzingen und die Hochmoorregion von Rothenthurm sind weitere, typische Gebiete mit extremen Kälteseen. Die Region Luzern kann durchaus als stark inversionsgefährdetes Gebiet betrachtet werden, ebenso der Talboden des Urner Reusstales. In den Mulden und Verflachungen der Einzugsgebiete der Sarner- und Engelbergeraa bilden sich vereinzelt wenig mächtige Kaltluftseen. Sämtliche Kaltluftsammlgebiete der Seitentäler des Urner Reusstales bilden sich hinter der Reliefverengung beim Einmünden ins Haupttal. Die Kaltluft sammelt sich dahinter, auch wenn die Talachse geneigt ist. Als weniger inversionsgefährdet

Tab.1: Zahl der Nebeltage ausgewählter Stationen. Mittel der Winterhalbjahre 1970/71 bis 1974/75. (Auswertung: F.X. TROXLER.)

Alpthal	4
Altdorf	29
Andermatt	72
Beromünster	30
Bisistal	5
Cham	35
Eigenthal	19
Einsiedeln	35
Engelberg	13
Entlebuch	12
Flühli	21
Göschenen	54
Isenthal	8
Küssnacht am Rigi	39
Lungern	21
Luthern	5
Luzern	50
Marbach	9
Oberiberg	65
Sempach	29
St. Urban	57
Sarnen	57
Schwyz	14
Siebnen	50
Stans	60
Walchwil	50
Weggis	23

fallen die wärmeren Hangzonen und die höher gelegenen Hügelzüge auf. Ein Gebiet im Talgrund mit relativ schwachen Bodeninversionen befindet sich bei Arth-Goldau–Schwyz–Brunnen.

Windverhältnisse

Eine *flächendeckende Charakterisierung* der Windverhältnisse in einem grösseren Gebiet mit komplexer Topographie stellt den Bearbeiter vor grosse Probleme. Windmessungen sind grundsätzlich Punktmessungen, die

oft nur für ein sehr begrenztes Gebiet repräsentativ sind. Es ist deshalb eine Vielzahl von langfristigen Windmessungen erforderlich, um die Windverhältnisse einer Region auch nur annähernd beschreiben zu können. In der vorliegenden Studie wurde folgendes Konzept verfolgt: An über 30 Standorten, ausgewählt nach topographischen Kriterien, wurden in vier Phasen kurzzeitige Windmessungen (Perioden von 3 Monaten) durchgeführt. Mit Hilfe der kontinuierlich messenden Stationen der SMA wurde in einem zweiten Schritt versucht, die messfreien neun Monate jedes Standortes zu modellieren. Der Bezug auf ein einheitliches Referenzjahr (August 1986 bis Juli 1987) ist unabdingbar, da wegen des Jahresgangs der Windverhältnisse Kurzzeitmessungen zu verschiedenen Jahreszeiten nicht miteinander vergleichbar sind. Für die Modellierung der fehlenden Werte wurden statistische Methoden (Clusteranalyse, Regressionsanalyse, siehe RICKLI et al. 1989) eingesetzt. Eine besondere Schwierigkeit ergab sich dabei aus dem Umstand, dass der Wind eine Vektorgröße ist, definiert durch Richtung und Geschwindigkeit. Erst relativ aufwendige Modelle erlauben eine genügend genaue Schätzung fehlender Werte. Die Qualität der Schätzung ist dabei nicht nur von der Extrapolationsmethode, sondern auch vom Zeitpunkt der Messungen innerhalb des Jahres und der topographischen Lage der Station abhängig.

Mit Hilfe dieses Vorgehens konnten an mehr als 50 Standorten im Untersuchungsgebiet vergleichbare Winddaten erhalten werden, die eine detaillierte Auswertung erlauben. Als Beispiel ist in Abb. 8 die Auswertung für die Station Luzern zu finden. Gleiche Graphiken liegen für alle übrigen Stationen vor. Einen Überblick über die Windverhältnisse gibt die zweite Karte in der Beilage. Aus den darin dargestellten Windrosen kann der Tag/Nacht- und Sommer/Winter-Gegensatz herausgelesen werden. Zusätzlich ist eine Unterteilung in zwei Windgeschwindigkeitsklassen vorgenommen worden. Bei der Interpretation der

Windrosen ist zu beachten, dass die Länge der Balken proportional zur Häufigkeit der Windrichtung und die Lage der Balken die Herkunftsrichtung des Windes angibt. (Interpretationsbeispiel: In Engelberg dominierten in der Nacht Ostsüdostwinde geringer Geschwindigkeit und am Tag Westsüdwestwinde mit Geschwindigkeiten meist grösser als 1,5 m/s. Die nachmittäglichen Westwinde sind zudem im Sommer besonders ausgeprägt).

Aus ausbreitungsklimatologischer Sicht kommt der *Windgeschwindigkeit* eine besondere Bedeutung zu. In erster Näherung verhalten sich die Schadstoffkonzentrationen im quellennahen Bereich umgekehrt proportional zur Windgeschwindigkeit. Niedrige mittlere Windgeschwindigkeiten weisen demnach auf ein hohes Belastungspotential hin. In Tab. 2 sind die Jahresmittelwerte ausgewählter Stationen zu finden. Grundsätzlich kann festgehalten werden, dass die mittleren Windgeschwindigkeiten der Talstationen, die zwischen 1,0 und 2,5 m/s liegen, als relativ niedrig anzusehen sind. Diese Werte sind jedoch für schweizerische Verhältnisse durchaus typisch. Die niedrigen Windgeschwindigkeiten sind eine Folge der grossräumigen Beckenlage des schweizerischen Mittellandes. Sie ist im wesentlichen dafür verantwortlich, dass auch kleinere Schweizer Städte beträchtliche lufthygienische Probleme haben.

Betrachtet man nur Gebiete unterhalb 1000 m ü. M., so sind die besten Durchlüftungsbedingungen entlang des Jurasüdfusses und in den höheren Lagen des Luzerner Mittellandes zu finden. Die Talsohlen des Luzerner Mittellandes zeigen ebenfalls noch eine relativ gute Durchlüftung. Nur an geschützten Stellen sind die Windgeschwindigkeiten deutlich vermindert. Das Alpenrandgebiet zwischen Luzern und Zug weist demgegenüber eine deutlich reduzierte Durchlüftung auf. Betrachtet man die Alpentäler, so besitzt das Urner Reusstal wegen des häufigen Luftaustausches zwischen Alpen-nord- und Alpensüdseite die höchsten Windgeschwindigkeiten. Sie entsprechen

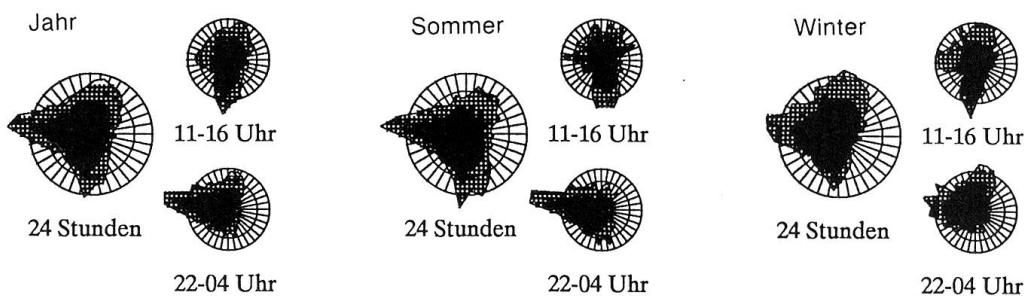
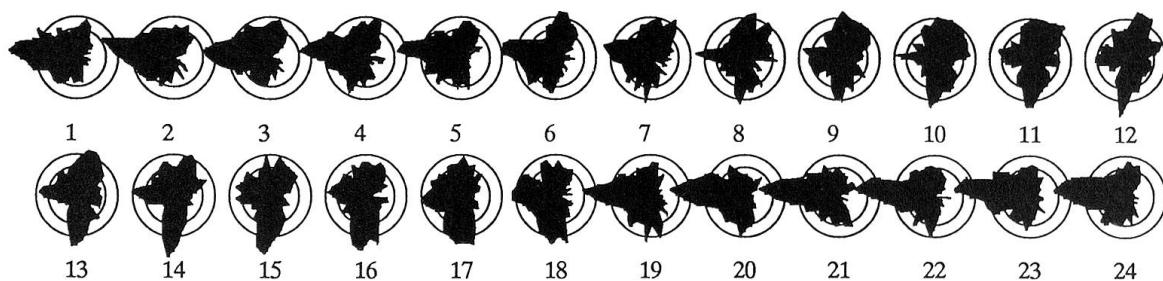
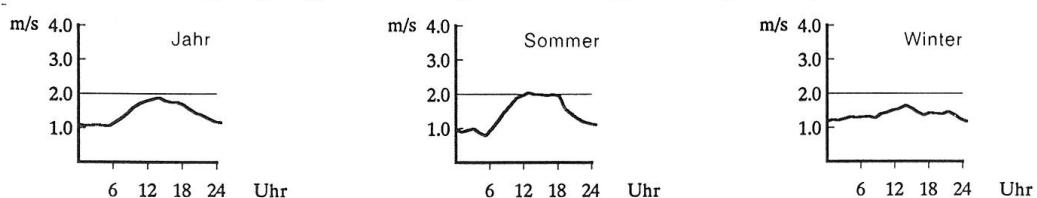
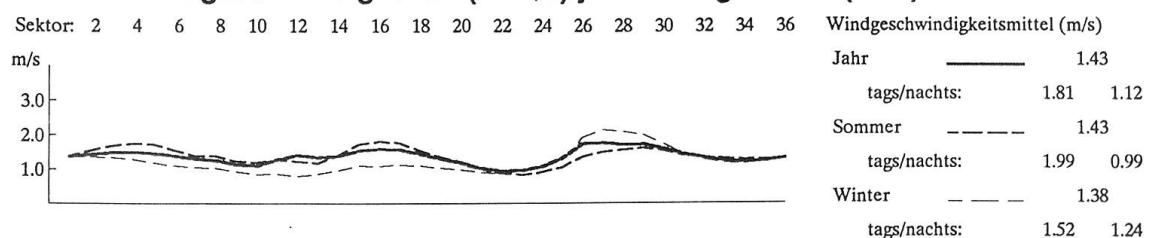
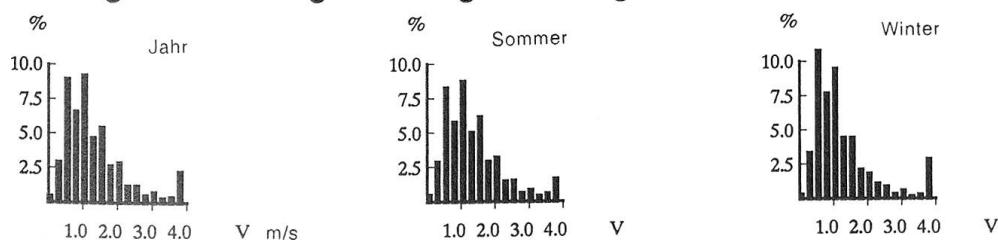
Häufigkeitsverteilung der Winde (2.5 und 5 %-Kreisskalen, 10 Grad-Sektoren)**Mittlere Häufigkeitsverteilung der Windrichtungen je Stunde****Mittlerer Tagesgang der Windgeschwindigkeiten (in m/s)****Mittlere Windgeschwindigkeiten (in m/s) je Richtungssektor (1-36)****Häufigkeitsverteilung der Windgeschwindigkeiten**

Abb. 8: Windstatistik der SMA-Station Luzern; August 1986 bis Juli 1987; Sommer = Monate Juni bis August, Winter = Monate Dezember bis Februar. (Auswertung: B. RICKLI.)

ungefähr den Werten des Luzerner Mittellandes. Das Tal der Engelbergeraa ist dem gegenüber wesentlich schwächer durchlüftet. Das offene Sarneraa-Tal liegt zwischen diesen beiden Extremen.

Ausbreitungsklassen

Windgeschwindigkeit und Temperaturaufbau in der untersten Schicht der Atmosphäre bestimmen im wesentlichen das Ausbreitungsklima einer Region. Eine Charakterisierung des *momentanen Turbulenzzustandes* der Atmosphäre kann damit aber nur indirekt erfolgen. Angaben dazu sind jedoch nötig, wenn Ausbreitungsmodelle eingesetzt werden sollen, um damit Immissionskonzentrationen von Luftschatdstoffen zu berechnen (FILLIGER 1986). Es werden deshalb sogenannte Ausbreitungsklassen definiert, die die Intensität der turbulenten Bewegungen angeben und meistens auf der Basis stündlicher Daten bestimmt werden. Die turbulenten Bewegungen in der Atmosphäre werden mechanisch oder thermisch verursacht. Die mechanische Turbulenz entsteht einerseits durch die Windgeschwindigkeit und andererseits durch die Rauhigkeit der Bodenoberfläche. Die thermische Turbulenz und damit die konvektive Aktivität der bodennahen Atmosphäre, wird durch die vertikale Temperaturschichtung bestimmt und hängt deshalb von der Sonneneinstrahlung resp. der Strahlungsbilanz ab. Die Schemata zur Bestimmung von Ausbreitungsklassen kombinieren diese beiden Effekte und definieren sechs bis sieben Klassen, die von sehr labil (hohe Turbulenzintensität, gute Verdünnung) über neutral bis sehr stabil (schlechte Verdünnung) reichen.

An allen Stationen des Untersuchungsgebiets wurden für die Stunden des Referenzjahres die Ausbreitungsklassen (Schema nach TA LUFT 1986) bestimmt und zusammenfassend dargestellt. Als Beispiel findet man in Abb. 9 die Auswertungen für die Station Luzern. Auffallend ist der hohe Anteil an stabilen Ausbreitungsbedingungen. Dies ist eine Folge der häufig schwachen Winde und des häufigen Auftretens von Bodeninversionen. Der Tag/Nacht-Gegensatz (oberstes Diagramm in Abb. 9) erstaunt nicht, sind doch die wechselnden Strah-

lungsbedingungen eines Tages verantwortlich für die Labilisierung resp. Stabilisierung

Tab. 2: Mittelwerte der Windgeschwindigkeiten ausgewählter Stationen; 10 m über Grund; August 1986 bis Juli 1987.

Alpnach	1,9
Altdorf	1,7
Amsteg	2,5
Andermatt	1,6
Beckenried	1,3
Beromünster	2,2
Bürglen	1,8
Cham	1,4
Ebikon	1,1
Eich	2,0
Einsiedeln	1,6
Engelberg	1,3
Flüelen	1,1
Goldau	1,5
Hochdorf	1,6
Holzhäusern	2,6
Horw	1,4
Huttwil	1,9
Immensee	1,6
Littau	1,4
Littauerberg	2,0
Luzern Allmend	1,4
Luzern Dietschiberg	1,9
Menzberg	2,7
Napf	3,7
Oberiberg	1,2
Pilatus	5,5
Reiden	2,1
Römerswil	1,8
Ruswilerberg	2,4
Sachseln	2,0
Sattel	2,1
Stans	1,4
Stansstad	1,9
Steinen	1,6
Sursee	1,6
Willisau	2,1
Wolfenschiessen	1,4
Wynau	1,9
Zug	1,4
Zugerberg	2,2

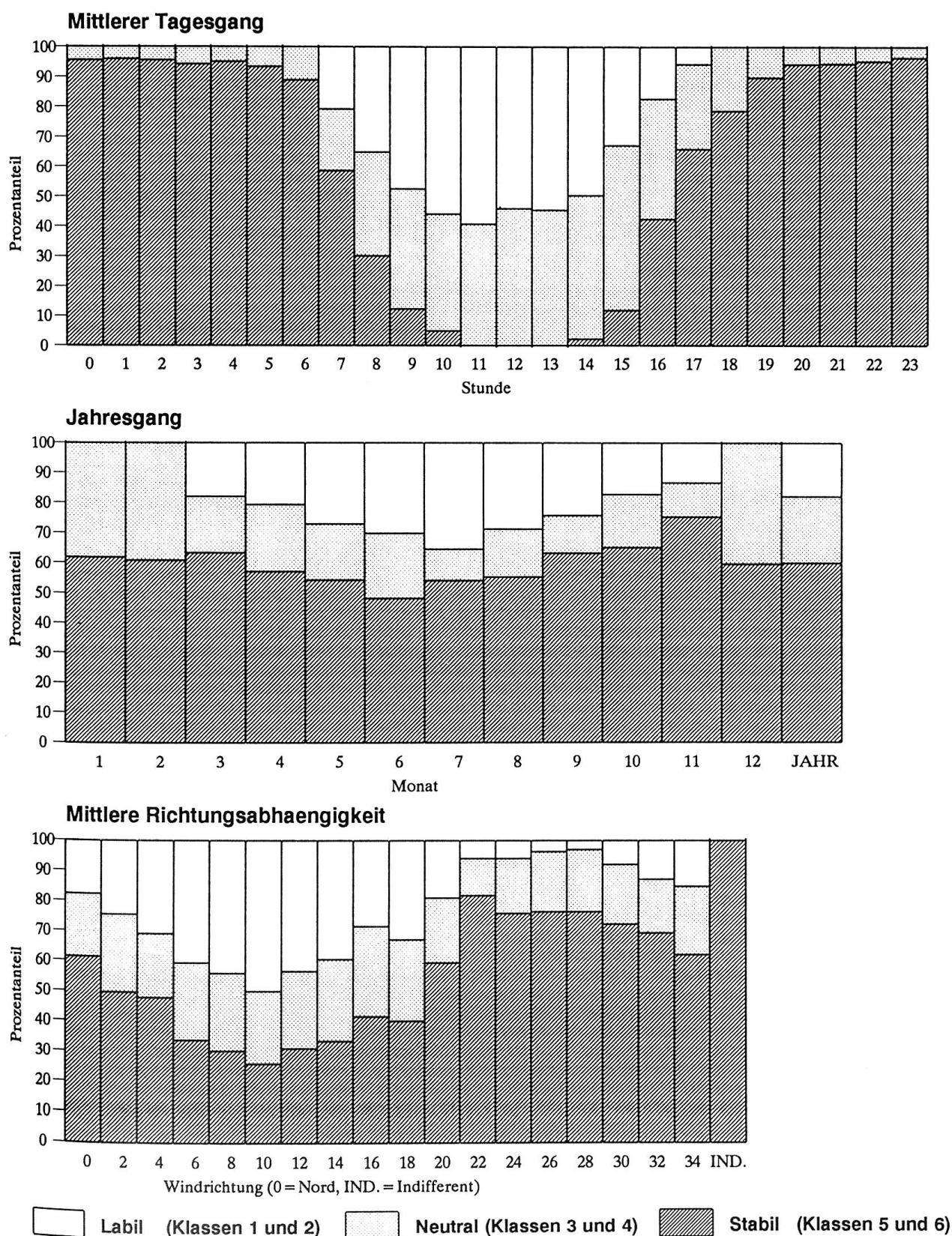


Abb. 9: Tagesgang, Jahresgang und Richtungsabhängigkeit der Ausbreitungsklassen der SMA-Station Luzern. (Auswertung: R. PFEIFER.)

der Atmosphäre. Relativ schwach ausgeprägt ist der Jahresgang, mit einer maximalen Häufigkeit stabiler Bedingungen im November. Deutlich ausgeprägt ist demgegenüber die Richtungsabhängigkeit an dieser Station (unterstes Diagramm). Die Winde aus dem Sektor West (Richtungen 22–30) weisen überdurchschnittlich hohe Anteile an stabilen Fällen auf. Ostwinde zeigen das umgekehrte Beispiel. Dieses Verhalten ist standortspezifisch. Es ist eine Folge der lokalen nächtlichen Kaltluft, die aus westlicher Richtung in das Gebiet der Luzerner Allmend einfließt, wo sich die meteorologische Station befindet.

Ausblick

Mit den vorliegenden, stationsbezogenen Auswertungen der Windgeschwindigkeit, Windrichtung und Ausbreitungsklasse und der flächendeckenden Bestimmung der Temperaturschichtung der bodennahen Atmosphäre, liegt erstmals in der Schweiz eine räumlich gut aufgelöste Charakterisierung der Ausbreitungsbedingungen für ein grösseres Gebiet vor. Die vorhandenen Auswertungen sind *praxisorientiert* und richten sich

an den Lufthygieniker oder Ingenieur, der sich z. B. im Rahmen einer Umweltverträglichkeitsprüfung mit der Schadstoffbelastung in der Umgebung einer neuen Emissionsquelle befasst. Aus wissenschaftlicher Sicht wäre eine Verfeinerung der Aussagen, insbesondere eine Windfeldmodellierung mit atmosphärischen Grenzschichtmodellen wünschenswert, um die räumlich grosse Variation der Windverhältnisse besser bestimmen zu können. Eine Fortsetzung der Studie in dieser Richtung ist geplant.

Verdankungen

Das Projekt wurde von den Kantonen Luzern, Uri, Schwyz, Nidwalden, Obwalden und Zug finanziert. Mitgearbeitet am Projekt haben: B. Rickli, F. X. Troxler, R. Pfeifer, T. Brunner, A. Estermann, E. Salvisberg, Dr. G. Nejedly, K. Flückiger, R. Kalbermatten, H. Gmünder. Das Geographische Institut der Universität Bern (Proff. B. Messerli und H. Wanner) stellte einen wesentlichen Teil der Infrastruktur zur Verfügung. Daten lieferten die SMA, EAWAG, CKW und einzelne Kantone. Allen beteiligten Personen und Institutionen sei an dieser Stelle herzlich gedankt.

LITERATURVERZEICHNIS

- BRUNNER, T. (1988): *Das Temperaturfeld von Luzern und Umgebung*. – Diplomarbeit Geogr. Institut Univ. Bern.
- FILLIGER, P. (1986): *Die Ausbreitung von Luftschaadstoffen – Modelle und ihre Anwendung in der Region Biel*. – Diss. Geogr. Inst. Univ. Bern. *Geographica Bernensia* G14.
- NEJEDLY, G. (1986): *Wettersatellitendaten in der Geländeklimatologie*. – Diss. Geogr. Inst. Univ. Bern.
- RICKLI, B., FILLIGER, P., TROXLER, F. X., PFEIFER, R., BRUNNER, T., SALVISBERG, E. (1989): *Das Ausbreitungsklima der Innerschweiz*. – Geogr. Inst. Univ. Bern. 2 Bände.
- TA LUFT (1986): *Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft*. – Heymanns Verlag, Köln.
- TROXLER, F. X. (1987): *Nebelkartierung Schweiz*. – Diplomarbeit Geogr. Inst. Univ. Bern. (Siehe auch: *Klimaatlas der Schweiz*, Karten Nr. 9.1 bis 9.3).
- WANNER, H., BERLINCOURT, B., RICKLI, R. (1982): *Klima und Lufthygiene der Region Biel – Gedanken und erste Resultate aus einer interdisziplinären Studie*. – *Geographica Helvetica*, 4, 215–224.

Dr. P. Filliger
Bundesamt für Umwelt, Wald
und Landschaft (BUWAL)
Hallwylstrasse 4
3003 Bern

Bioindikation mit Flechten im Kanton Luzern

MARTIN URECH, KATHRIN PETER, LUZIUS LIEBENDÖRFER, ROLF HERZIG,
(AGB)

Zusammenfassung

Anhand der Kalibrierten Flechtenindikationsmethode wurde in ausgewählten Gebieten des Kantons Luzern ein Wirkungs- und Gesamtimmisionskataster in Form einer Isolinienkarte erstellt. Die grösste Beeinträchtigung der Flechtenvegetation und damit die stärkste Gesamtimmisionsbelastung weisen die Stadt und Agglomeration Luzern auf. Verbreitungskarten einzelner Flechtenarten zeigen die artspezifische Reaktion von Flechten auf die Luftbelastung. Der Acidointdex ermöglicht die Ausscheidung von Gebieten mit vorwiegend sauren oder basischen Immisionen.

Résumé

Sous forme d'une carte isoligne le cadastre de la pollution atmosphérique totale pour quelques régions dans le canton de Lucerne fut établi à l'aide de la méthode calibrée d'indication biologique avec des lichens. Les dégâts les plus graves à la végétation des lichens et par conséquent la plus

grande pollution atmosphérique totale furent constatés dans la ville et l'agglomération de Lucerne. Des cartes indiquant l'expansion de certaines espèces de lichens montrent la réaction spécifique des lichens à la pollution de l'air. L'«acidointdex» rend possible la distinction des régions soumises à des immissions à prédominance acide ou basique.

Abstract

With the aid of the calibrated lichen indication method, a cadastre of biological effects and of total air pollution, in the form of an isogram chart, has been set up in certain areas of Canton Lucerne. The greatest harm to lichen vegetation has been found to exist in the city and agglomeration of Lucerne, and thereby the highest degree of total air pollution.

Range area maps of individual lichen species show the reaction of different types of lichen to pollution. The Acidointdex enables us to distinguish between areas with principally acid or principally alkaline immission.

Kalibrierte Flechtenindikationsmethode

Lebewesen, welche durch ihre Reaktion die Wirkung von Schadstoffen anzeigen, werden Bioindikatoren genannt. Flechten sind ideale Zeiger der Luftverschmutzung: Sie beziehen Nährstoffe und Wasser vorwiegend aus der Luft und nehmen gleichzeitig auch alle Schadstoffe auf, da sie über keinerlei Abwehrmechanismen verfügen. Gegenüber Luftschaadstoffen sind Flechten hoch empfindlich. Als Symbioseorganismen (Pilz und Alge in Lebensgemeinschaft) leben

Flechten in einem äusserst störungsanfälligen Gleichgewicht: Sie reagieren auf kleinste Beeinträchtigungen der Luftqualität. Im allgemeinen sind Flechten etwa zehnmal empfindlicher als höhere Pflanzen und gelten daher als Frühwarnsystem der Luftverschmutzung (z. B. LEBLANC und DESLOOVER 1970, JÜRGING 1975).

Im Rahmen des Nationalen Forschungsprogrammes 14: «Lufthaushalt und Luftverschmutzung in der Schweiz» entwickelte unser Team die *Kalibrierte Flechtenindikationsmethode* (HERZIG et al. 1987, URECH et

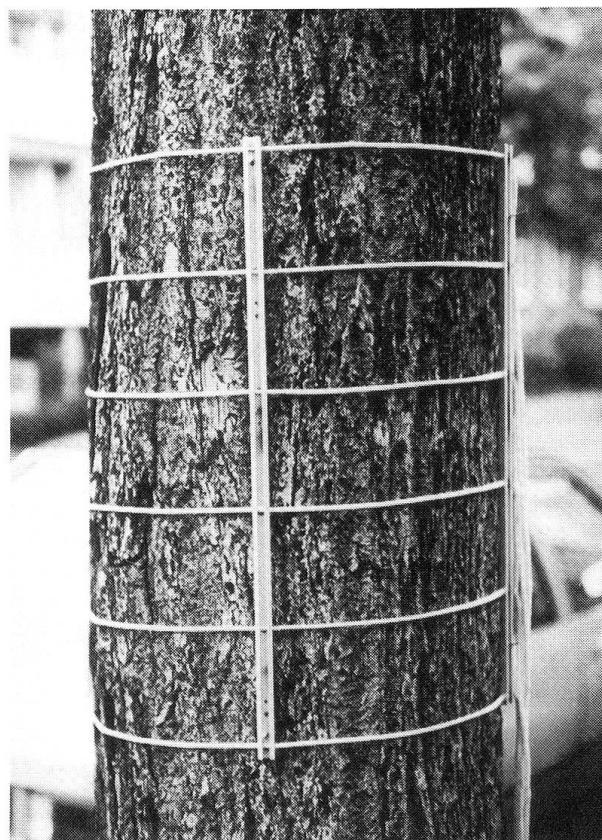


Abb.1: Baum mit Frequenzgitter in Stadtgebiet, ohne Flechtenbewuchs.

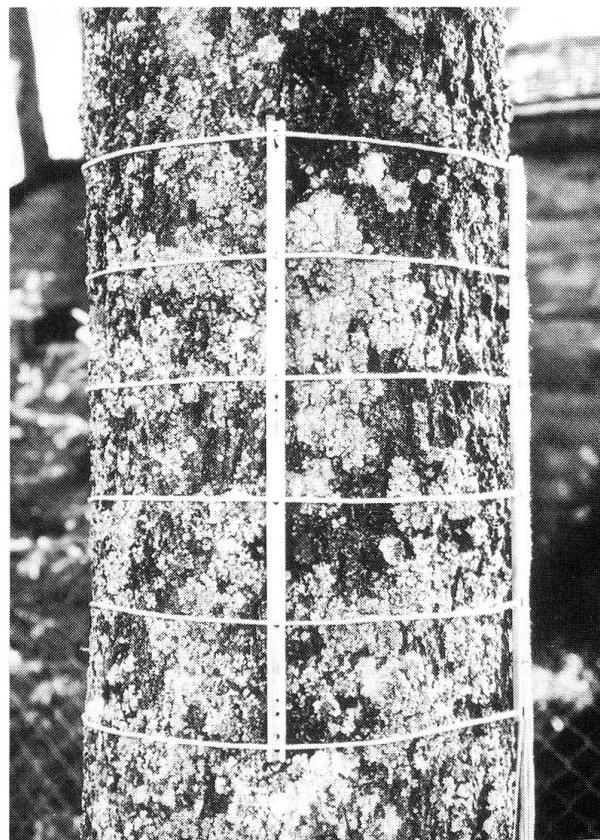


Abb.2: Baum mit Frequenzgitter in ländlichem Gebiet mit gut ausgeprägter Flechtenvegetation.

al. 1989). Sie erlaubt die flächendeckende Erfassung der Auswirkungen von Luftbelastungen auf Flechten in Gebieten des Schweizer Mittellandes (Wirkungskataster). Zudem ermöglicht sie Rückschlüsse auf die Gesamtimmissionsbelastung, da sie mit technischen Luftmessdaten kalibriert ist (Gesamtimmissionskataster).

Die Kalibrierte Flechtenindikationsmethode arbeitet mit den epiphytischen Flechten ausgewählter Laubbaumarten: An den einzelnen Bäumen wird mit Hilfe des Frequenzgitters der Gesamtbelastungsindikator IAP18 (Index of Atmospheric Purity) erhoben: Für ausgewählte Flechtenarten wird der Frequenzwert bestimmt (Anzahl Teilflächen des Frequenzgitters, in welchen die betreffende Art auftritt, vgl. Abb.1 und 2). Diese Frequenzwerte aller berücksichtigten Arten werden zum IAP18 aufsummiert.

Hohe IAP18-Werte resultieren da, wo die Luft wenig Verunreinigungen aufweist und viele Flechten vorhanden sind. Tiefe IAP18-Werte treten bei schlechter Luftqualität auf, wo wenig Flechten überleben. Der IAP18 verdeutlicht die Wirkung einer Vielzahl primärer und sekundärer Luftschadstoffe inklusive deren Kombinationswirkungen, wie sie auch für höhere Pflanzen, Tiere und Menschen repräsentativ sind.

Untersuchungen zur Luftqualität im Kanton Luzern

Der Kanton Luzern führt seit mehreren Jahren Erhebungen zur Luftqualität durch. Das Hauptziel dieser Untersuchungen ist der Vollzug der Luftreinhalte-Verordnung LRV (EDI 1986).

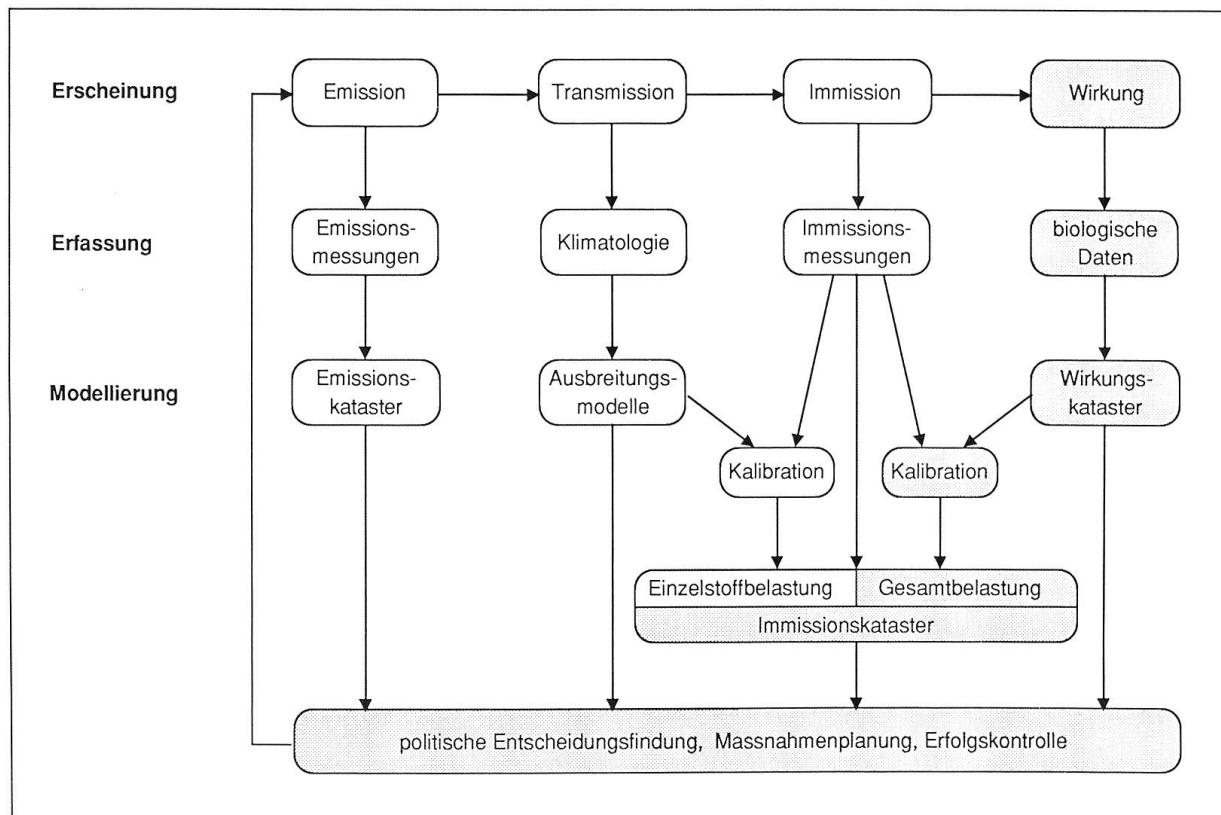


Abb. 3: Teilbereiche der Luftreinhaltung und deren gegenseitige Verknüpfung.

Die Erfassung der Luftverschmutzung erfolgt im Kanton Luzern in den vier Teilbereichen Emission, Transmission, Immission und Folgewirkung. Die Teilbereiche und deren gegenseitige Verknüpfung sind in Abb. 3 dargestellt.

Der Emissionskataster gibt Auskunft über das Ausmass und die räumliche Verteilung der Luftschatzstoff-Emission (AFU 1989). Untersuchungen zum Ausbreitungsklima geben Aufschluss über die Transportverhältnisse für Luftschatzstoffe (Transmission) und bilden Grundlage für Ausbreitungsrechnungen (GIUB 1989; vgl. auch Artikel von FILLIGER in diesem Band). Die vom Kantonalen Amt für Umweltschutz durchgeführten technischen Immissionsmessungen liefern punktuelle Angaben über das räumliche und zeitliche Auftreten von wichtigen Einzelschatzstoffen. Zur Abschätzung

der ökologischen Folgewirkungen der Luftverschmutzung werden im Kanton Luzern Flechtenuntersuchungen durchgeführt.

Die durch die Kalibrierte Flechtenindikationsmethode abgedeckten Bereiche der Luftreinhaltung sind in Abb. 3 grau hervorgehoben.

Die Folgen der Luftbelastung werden anhand biologischer Daten in einem Wirkungskataster dargestellt. Auf der Ebene der Modellierungen entsteht über den Wirkungskataster durch die Kalibration mit technischen Immissionsdaten ein Immissionskataster; im Falle der Kalibrierten Flechtenindikationsmethode handelt es sich um einen Gesamtimmisionskataster.

In den vergangenen Jahren wurde im Auftrag des Kantons Luzern (Amt für Umweltschutz) ein zweiteiliges Flechtenprojekt durchgeführt. Das Teilprojekt A hat die

Charakterisierung der Flechtenflora des Kantons zum Ziel (RUOSS und KELLER 1988). Im Teilprojekt B wurde in ausgewählten Gebieten des Luzerner Mittellandes flächen-deckend die Gesamtimmissionsbelastung mittels der Kalibrierten Flechtenindikationsmethode bestimmt (AGB 1989). Im Vordergrund stand die Erfassung potentiell belasteter Gebiete, unter anderem die Stadt und Agglomeration Luzern sowie die Regionen Dagmersellen–Sursee und Willisau–Wolhusen.

Dazu wurden in 1 km²-Rasterflächen jeweils sechs repräsentative Laubbäume auf ihren Flechtenbewuchs untersucht und der Gesamtbelastungssindikator IAP18 bestimmt. In den Jahren 1987 und 1988 wurde an insgesamt 1276 Bäumen die Flechtenvegetation untersucht. Auf dieser Datenbasis wurden der Wirkungs- und Gesamtimmisionskataster erstellt sowie weitere Auswertungen zu einzelnen Flechtenarten (Verbreitungskarten, Acidointex) vorgenommen.

Wirkungs- und Gesamtimmisionskataster

Anhand der IAP18-Werte wurde ein Wirkungs- und Gesamtimmisionskataster in Form einer Isolinienkarte (Abb. 4 – als Beilage) erstellt. Die Isolinien unterteilen die untersuchten Gebiete in fünf Zonen unterschiedlicher Flechtenbeeinträchtigung resp. Gesamtimmisionsbelastung. Die Isolinien entstanden durch lineare Interpolation zwischen IAP18-Mittelwerten, welche für geographisch homogene Raumeinheiten gebildet wurden.

In den untersuchten Gebieten des Kantons konnten sämtliche fünf Zonen des Wirkungs- und Gesamtimmisionskatasters gefunden werden.

Die Zone «Flechtenwüste» mit der stärksten Flechtenbeeinträchtigung finden wir im Kanton Luzern nur in der Stadt und Agglomeration Luzern, und zwar entlang den Achsen Horw, Kriens, Luzern, Emmen und Luzern, Ebikon, Dierikon, Root. In diesen Gebieten fehlt die baumbewohnende Flech-

tenvegetation ganz oder ist nur noch sehr rudimentär ausgebildet; entsprechend muss die Gesamtimmisionsbelastung in diesen Gebieten als kritisch bezeichnet werden. Insgesamt ist die Stadt und Agglomeration Luzern grossflächig mittel, stark und kritisch belastet.

In der Agglomeration Luzern finden sich auch einzelne Gebiete mit einer recht gut ausgebildeten Flechtenvegetation (Übergangs- und Normalzone); entsprechend wird die Gesamtimmisionsbelastung als gering resp. sehr gering bezeichnet. Dies sind vorwiegend gut durchlüftete Gebiete wie Höhenlagen und Gebiete in Seenähe. Auch in diesen Zonen können aber einzelne Schadstoffe, insbesondere der Sekundärschadstoff Ozon, in hoher Konzentration vorliegen.

Obwohl die Flechtenvegetation in der Normalzone artenreich ist und auch seltene Arten aufweist, stellt sie noch kein Optimum dar: Frühere Verbreitungsstudien und Herbarbelege zeigen (z. B. FREY 1960), dass auch aus der heutigen Normalzone schon verschiedene Flechtenarten verschwunden sind und andere deutlich weniger häufig auftreten. Die Belastung mit Luftschatzstoffen, in ländlichen Gebieten vor allem mit Ozon, scheint heute so hoch, dass sich keine sehr empfindliche Flechtenvegetation ausprägen kann.

In den übrigen untersuchten Regionen des Kantons weist neben Dagmersellen noch Wolhusen eine lokal stark beeinträchtigte Flechtenvegetation auf (Innere Kampfzone). Aber auch in den Städten Willisau und Sursee sowie im Dorf Menznau wurde eine gegenüber ihrer näheren Umgebung reduzierte Flechtenvegetation festgestellt. Dies lässt auf eine erhöhte Gesamtimmisionsbelastung der Siedlungen schliessen. Im Gegensatz dazu sind die weniger dicht besiedelten Gebiete des Luzerner Mittellandes nur gering oder sehr gering belastet.

Bei den drei technischen Immissions-Messstationen Sedel, Kriens und Horw kam die Kalibrierte Flechtenindikationsmethode ebenfalls zur Anwendung. Dazu wurden zehn Bäume in der näheren Umgebung der

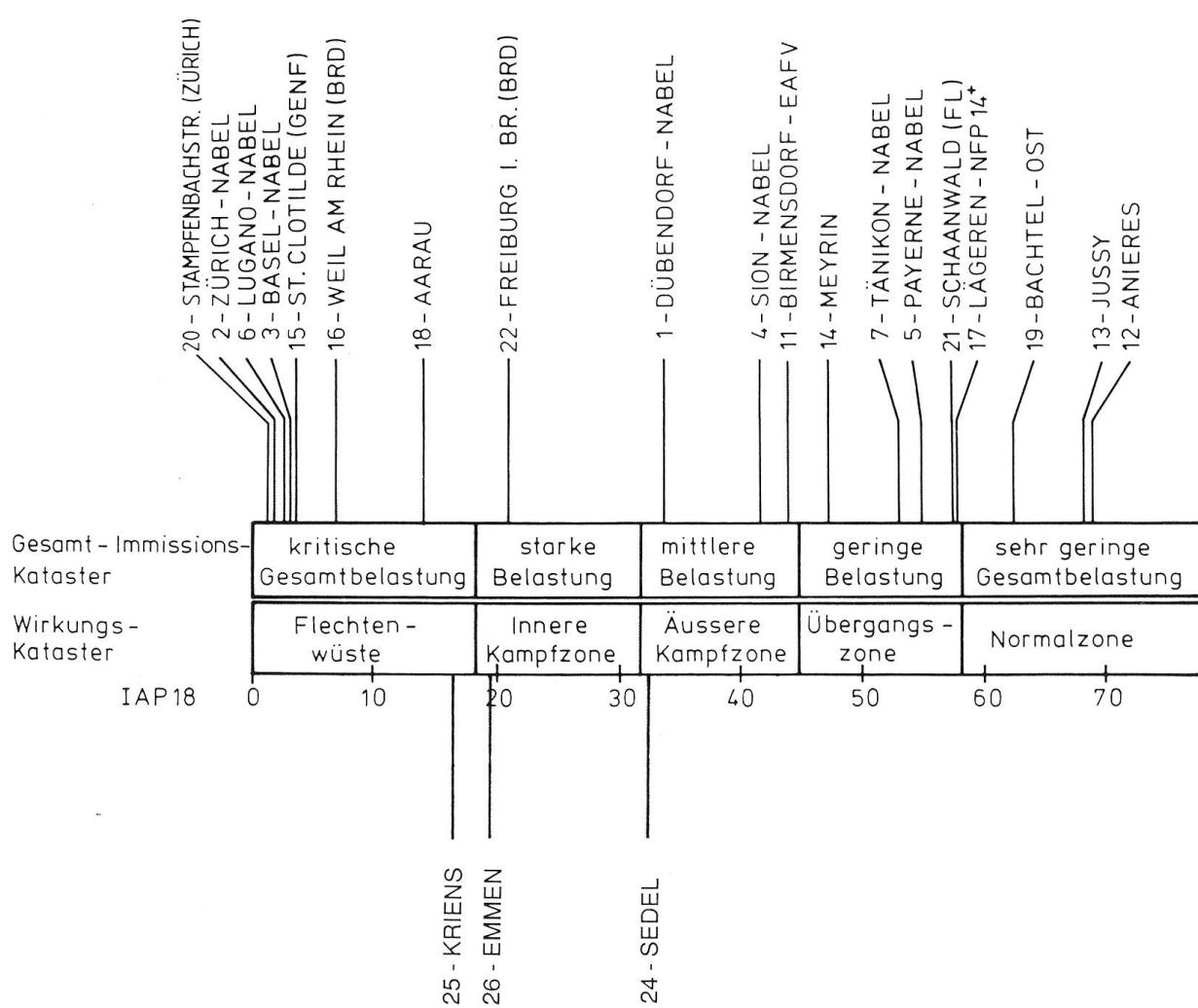


Abb. 5: Zuordnung der Immissions-Messstationen zu den Wirkungs- und Gesamtimmissionszonen.

Messstation auf ihren Flechtenbewuchs untersucht. In Abb. 5 sind die drei Stationen entsprechend ihrem IAP18-Wert den Wirkungs- und Gesamtmissionszonen zugeordnet und gleichzeitig anderen, mit der Kalibrierten Flechtenindikationsmethode untersuchten Stationen, entgegengestellt. Die Stationen Kriens und Horw weisen eine kritische bis starke Gesamtbelastung auf, der Sedel ist mit einer mittleren Gesamtbelastung weniger stark belastet.

Im Vergleich zu den anderen Mittellandstationen zeigt sich, dass keine der Luzerner Stationen eine so extreme Gesamtbelastung aufweist wie die meisten Schweizer Stadtsta-

tionen. Dies ist aufgrund der Lage der Luzerner Stationen auch nicht zu erwarten. Verglichen mit anderen Agglomerations-Stationen im Schweizer Mittelland weisen dagegen Kriens und Emmen eine recht hohe Gesamtbelastung auf; die Agglomerations-Stationen Dübendorf und Birmensdorf beispielsweise sind weniger stark belastet.

Die Belastung der Station Sedel ist vergleichbar mit derjenigen von Dübendorf. Die Station liegt zwar im Landwirtschaftsgebiet, das meist eine tiefere Gesamtbelastung aufweist (beispielsweise Tänikon, Payerne); sie befindet sich aber nahe der Stadt Luzern und nahe bei Emmen, sowie in nächster

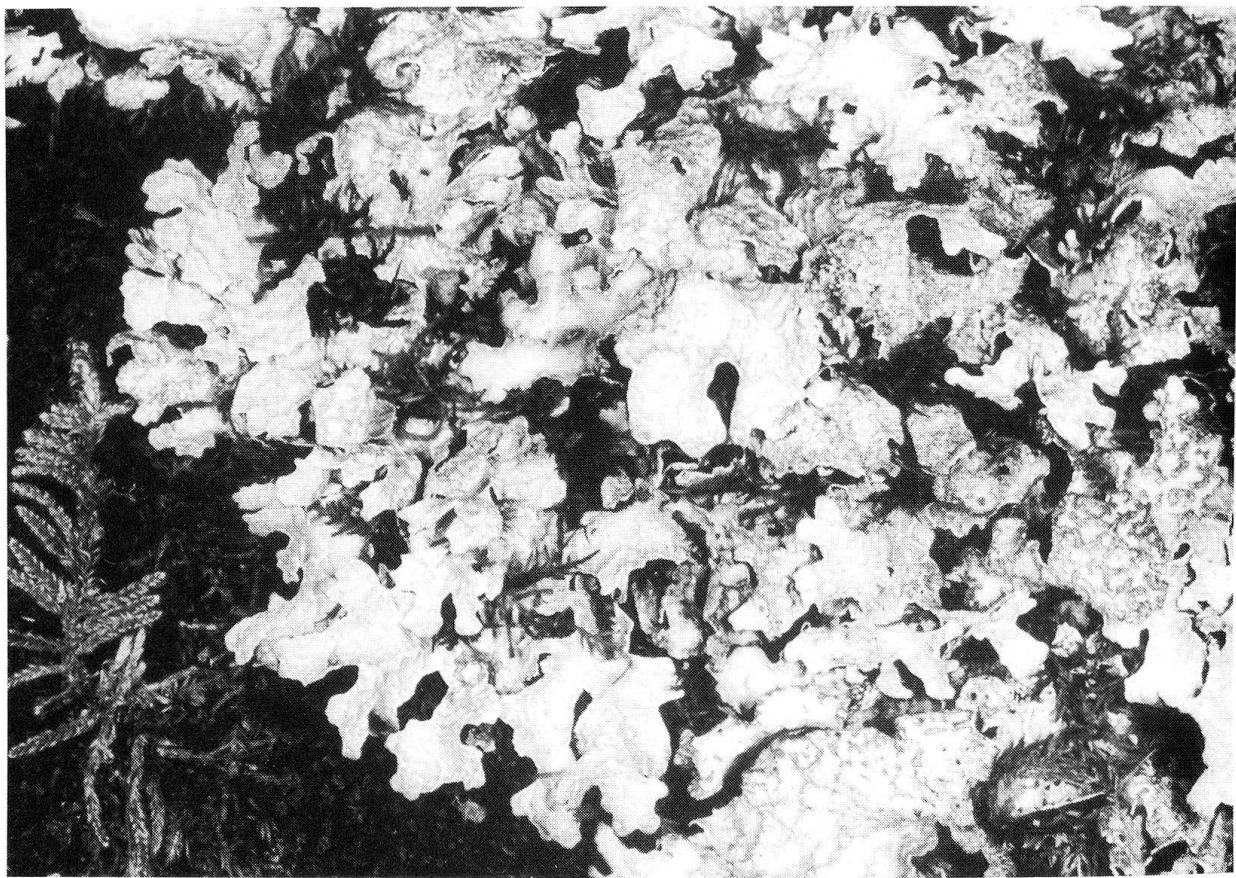


Abb. 6: *Parmelia sulcata*.

Nähe zu einer Kehrichtverbrennungsanlage und zur Autobahn, so dass die gefundene Gesamtbelastung nicht erstaunen kann.

Der vorliegende Wirkungs- und Gesamtimmisionskataster anhand der Kalibrierten Flechtenindikationsmethode gibt flächen-deckend Auskunft über die *Gesamtbelastung*, die die Kombinationswirkung verschiedenster Luftscha-dstoffe mitberücksichtigt. Diese biologische Beurteilung unterscheidet sich deutlich von technischen Schadstoff-Messungen, welche die Immisionen von *Einzelschadstoffen* ausweisen. Kalibrierte Flechtenindikationsmethode und technische Schadstoff-Messungen sind einander sinnvoll ergänzende Messmethoden, keine kann durch die andere ersetzt werden.

Die Resultate dieser Flechtenuntersuchungen zeigen gute Übereinstimmung mit

weiteren Erhebungen zur Luftreinhaltung im Kanton Luzern. So lassen sich hohe Gesamtimmisionsbelastungen vielfach auf erhöhte Emissionen und ungünstige klimatische Verhältnisse zurückführen: Die Hauptemissionsgebiete des Kantons von SO_2 und NO_x sind gleichzeitig Gebiete mit erhöhten Gesamtimmisionsbelastungen (Stadt und Agglomeration Luzern, Wolhusen, Sursee, Dagmersellen und Hochdorf). Auch die Kaltluftkarte stimmt für viele Gebiete mit dem Wirkungs- und Gesamtimmisionskataster überein: Tiefer liegende, invasionsgefährdete Regionen weisen oft eine erhöhte Gesamtimmisionsbelastung auf.

Der Wirkungs- und Gesamtimmisionskataster zeigt in den untersuchten Teilen des Kantons *lufthygienische Problemgebiete* räumlich differenziert und die *Vorbelastung*

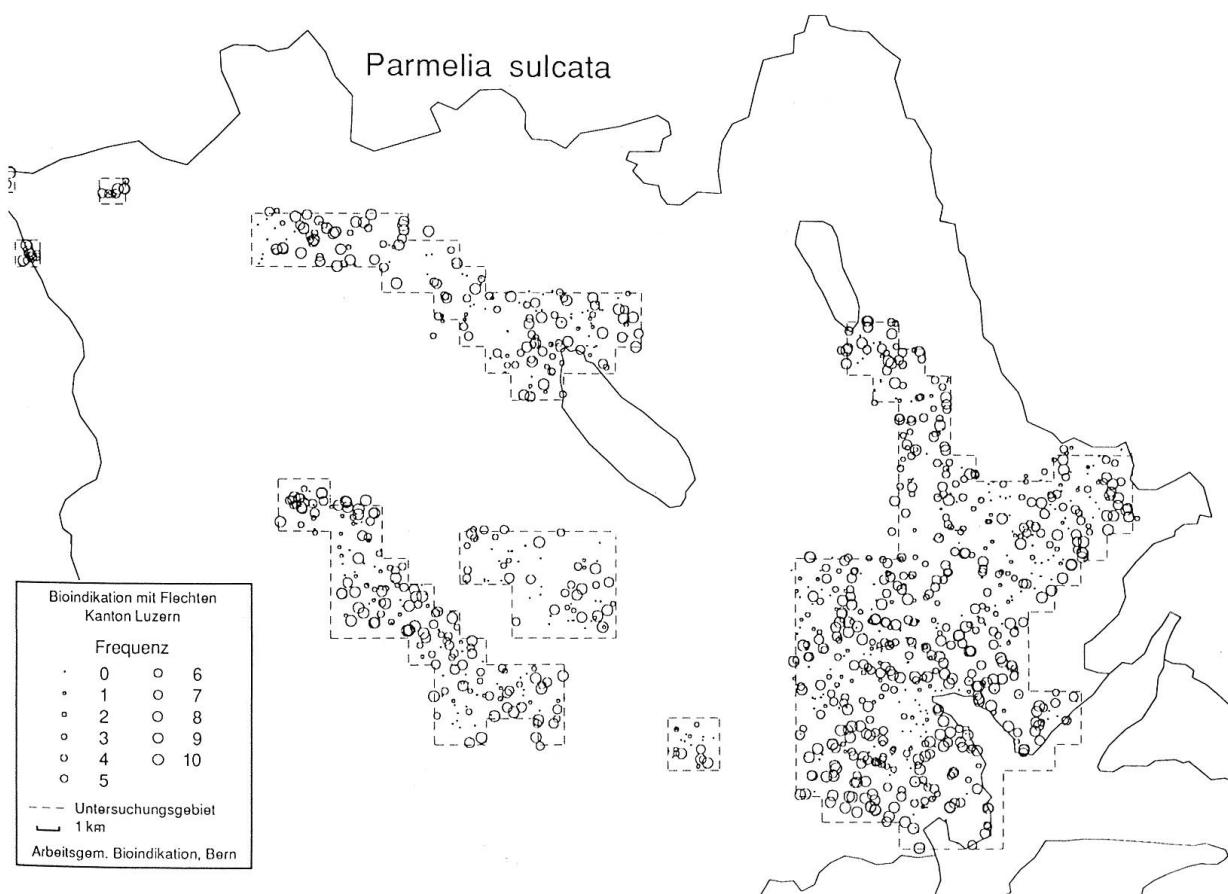


Abb. 7: Verbreitung von *Parmelia sulcata* im untersuchten Gebiet aus dem Kanton Luzern.

mit Luftschaadstoffen flächendeckend auf.

Die Erhebungen stellen eine detaillierte Grundlage für die Langzeitüberwachung der Gesamtimmissionsbelastung dar, sowohl Verschlechterungen wie Verbesserungen der Belastung können nachgewiesen werden. Insbesondere ermöglicht sie die *Erfolgskontrolle* nach der Durchführung emissionsenkender Massnahmen: Durch spätere Wiederholung der Flechtenerhebungen können flächendeckend Veränderungen in der Immissionssituation aufgezeigt werden.

Ausserdem ist die Möglichkeit zur flächendeckenden und ganzheitlichen Bewertung der Immissionssituation auch für die *Raumplanung* von bedeutender Wichtigkeit (THÖNI et al. 1989), da zunehmend auch ökologische Kriterien in ihre Konzepte einzbezogen werden.

Verbreitungskarten einzelner Flechtenarten

Der Wirkungs- und Gesamtimmissionskataster basiert auf insgesamt 50 Flechtenarten und Artengruppen. Jede dieser Arten(gruppen) weist eine eigene, artspezifische Reaktionsweise gegenüber der Luftbelastung auf; so entstehen auch unterschiedliche Verbreitungsmuster.

Über Verbreitungskarten lassen sich deshalb Informationen zur Ökologie der einzelnen Flechtenarten gewinnen. Ausserdem ergeben sich weitere Hinweise zum Immissionsmuster und zum Immissionstyp in einem untersuchten Gebiet.

Im folgenden sind exemplarisch die Verbreitungskarten dreier Flechtenarten abgebildet und diskutiert. Die Karten basieren auf den Frequenzwerten der einzelnen

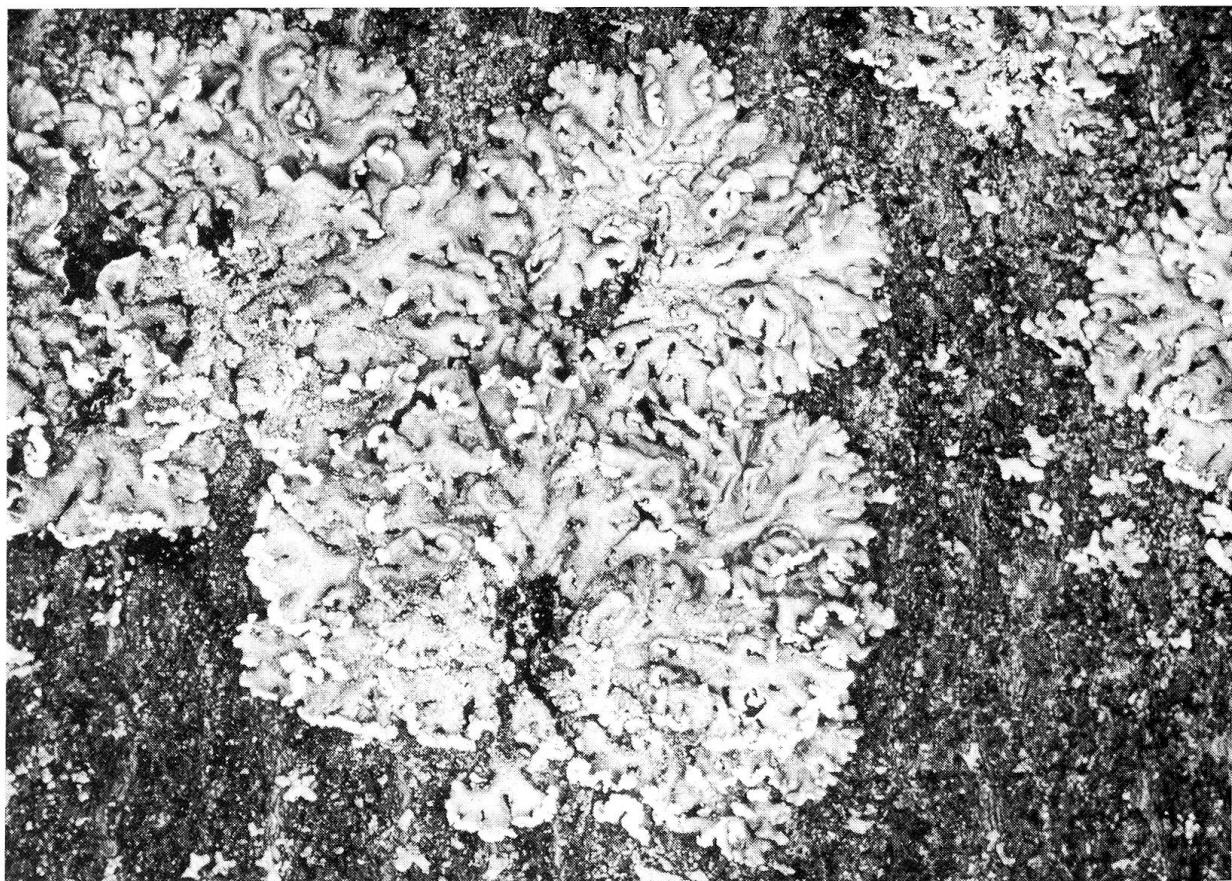


Abb. 8: *Hypogymnia physodes*.

Flechtenarten an den 1276 untersuchten Bäumen im Luzerner Mittelland. Diese Karten können nicht als floristische Karten gelten, da sich die Aussage über das Vorkommen der Flechten nur auf die Aufnahmefläche innerhalb des Frequenzgitters (vgl. Abb. 1 und 2) einzelner ausgewählter Trägerbäume bezieht.

Die Blattflechte *Parmelia sulcata* (Abb. 6 und 7) ist im ganzen Untersuchungsgebiet weit verbreitet und tritt oft mit hohen Frequenzwerten auf. Sie ist eine der häufigsten baumbewohnenden Flechtenarten im Schweizer Mittelland. Da sie ziemlich toxisch-tolerant ist, fehlt sie nur in stärker belasteten Gebieten fast vollständig, so vor allem im Zentrum von Luzern.

Die Blattflechte *Hypogymnia physodes* (Abb. 8 und 9) tritt vor allem in der Stadt

und Agglomeration Luzern auf, fehlt dagegen in weiten Teilen des Untersuchungsgebietes. Sie ist ein typischer Säurezeiger (acidophile Art; WIRTH 1980); wo sie im Untersuchungsgebiet an freistehenden Trägerbäumen gehäuft auftritt, kann auf eine Ansäuerung durch Luftbelastungen geschlossen werden. In der Umgebung von Willisau beispielsweise tritt sie nie auf, in der Stadt Luzern selber an mehreren Bäumen und mit hohen Frequenzen.

Ein entgegengesetztes Bild ergibt die Verbreitung von *Xanthoria parietina* (Abb. 10): In der Stadt und Agglomeration Luzern fehlt sie weitgehend, dagegen ist sie in den ländlichen Teilen des Untersuchungsgebietes häufig und mit teilweise hohen Frequenzen vertreten. Sie ist ein typischer Vertreter der basiphilen Flechtenarten (WIRTH 1980),

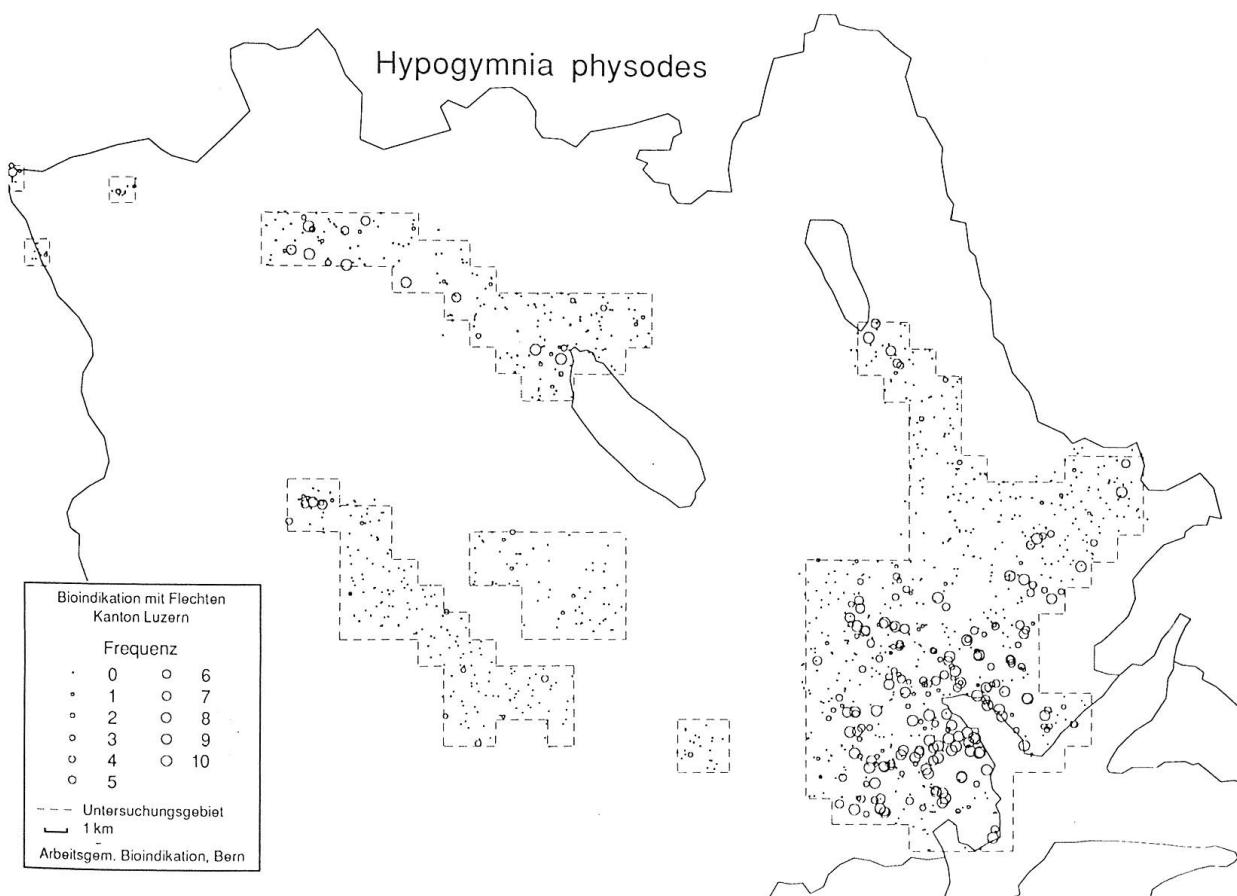


Abb. 9: Verbreitung von *Hypogymnia physodes* im untersuchten Gebiet aus dem Kanton Luzern.

welche eher basische Unterlagen bevorzugen und deshalb zur Anzeige von basischen Immissionen geeignet sind.

Acidoindex

Im Luzerner Mittelland zeigen die Verbreitungskarten für die einzelnen Flechtenarten unterschiedliche Verbreitungsmuster; einige Flechtenarten verhalten sich in ihrer Verbreitung sogar gegenläufig. So weisen die beiden Blattflechten *Hypogymnia physodes* und *Xanthoria parietina* völlig verschiedene Verbreitungsmuster auf. Die beiden Arten unterscheiden sich deutlich in ihren ökologischen Ansprüchen: Während *Hypogymnia physodes* als acidophile Art saure und nicht eutrophierte Substrate bevorzugt, findet

sich *Xanthoria parietina* als basophile Art in erster Linie auf basischer und eutrophierter Unterlage.

Das Auftreten solch typischer Arten lässt Rückschlüsse auf den Immissionstyp ziehen: In Gebieten mit häufigem Auftreten von *Hypogymnia physodes* sind saure Immissionen zu erwarten, in Regionen mit viel *Xanthoria parietina* überwiegen basische Immissionen.

Auf dieser Idee basiert der Acidoindex: Zur Charakterisierung des Immissionstyps in einem Gebiet werden typische Säure- und Basenzeiger einander gegenübergestellt. Als Säurezeiger werden die acidophilen Blattflechten *Hypogymnia physodes*, *Hypogymnia tubulosa*, *Pseudevernia furfuracea* und *Evernia prunastri* verwendet. Als Basenzeiger gelten die vier basiphilen Arten

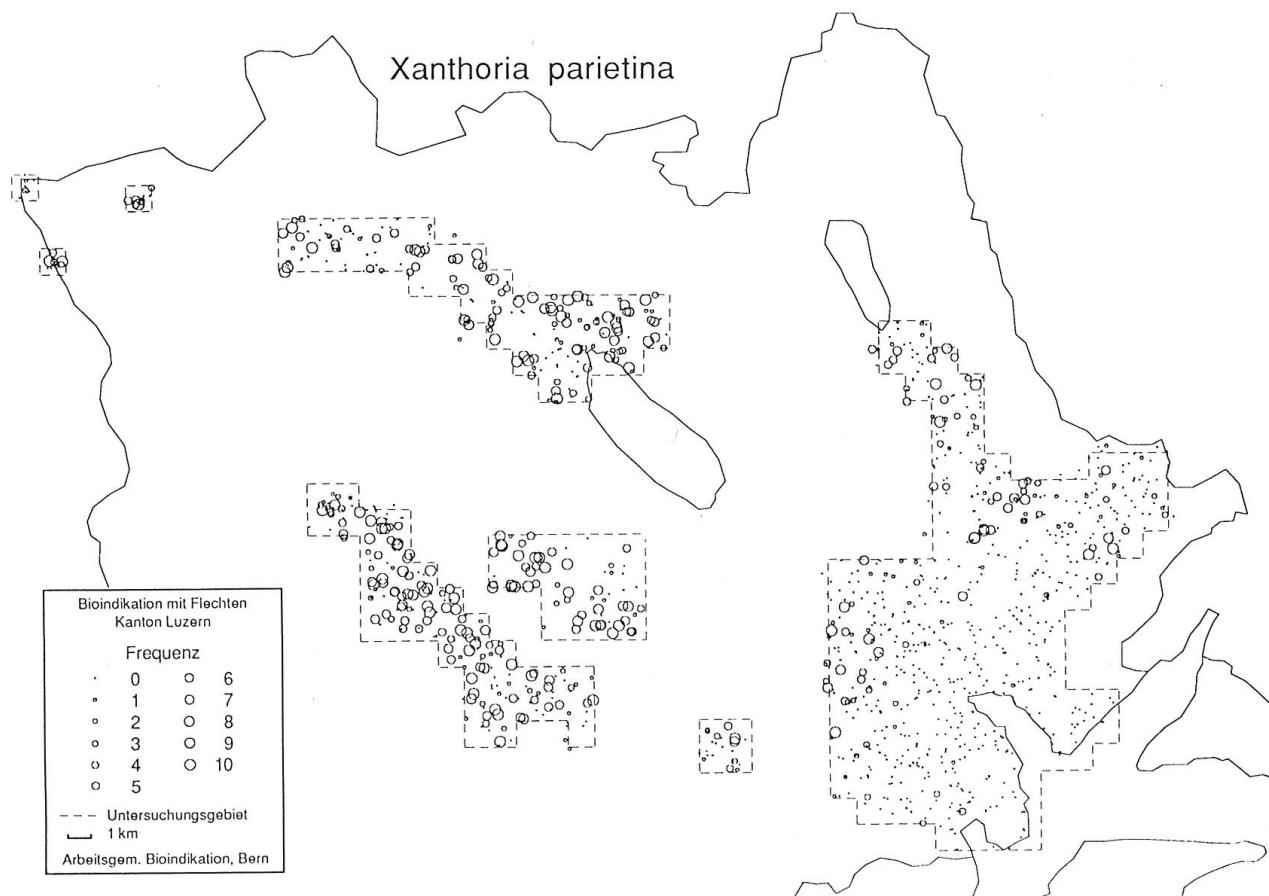


Abb. 10: Verbreitung von *Xanthoria parietina* im untersuchten Gebiet aus dem Kanton Luzern.

Xanthoria parietina, *Physcia orbicularis*-Gruppe, *Physconia pulverulacea* und *Parmelia subargentifera*.

Die vier Säurezeiger sind alle zugleich auch a-nitrophil, d. h. sie gedeihen in erster Linie auf nährstoffarmer (nicht eutrophierter) Unterlage. Die vier Basenzeiger dagegen sind alle nitrophil, sie wachsen vor allem auf nährstoffreicher Unterlage. Die beiden Gruppen charakterisieren die Immission nicht nur in bezug auf den Säuregrad, sondern gleichzeitig auch in bezug auf das Nährstoffangebot.

Wie stark sich die beiden Gruppen von einander unterscheiden, kann auch anhand einer Hauptkomponenten-Analyse aufgezeigt werden. Basis für diese Hauptkomponenten-Analyse bilden die Frequenzwerte der acht Flechtenarten an allen 1276 unter-

suchten Trägerbäumen. In Abb. 11 sind die beiden ersten Hauptkomponenten grafisch aufgetragen. Deutlich trennt die erste Hauptkomponente, welche 31% der Gesamtvariabilität erklärt, die Gruppe der acidophilen Arten von derjenigen der basiphilen Arten ab.

Zur Berechnung des Acidointex werden die Frequenzwerte je Vierergruppe an jedem Trägerbaum addiert. Die Frequenzsumme der basiphilen Arten wird anschließend auf die Frequenzsumme der acidophilen Arten normiert, so dass beide Summen den gleichen Maximalwert im Untersuchungsgebiet aufweisen. Den Acidointex eines Trägerbaumes erhält man durch Subtraktion der Frequenzsumme der basiphilen Arten von der Frequenzsumme der acidophilen Arten.

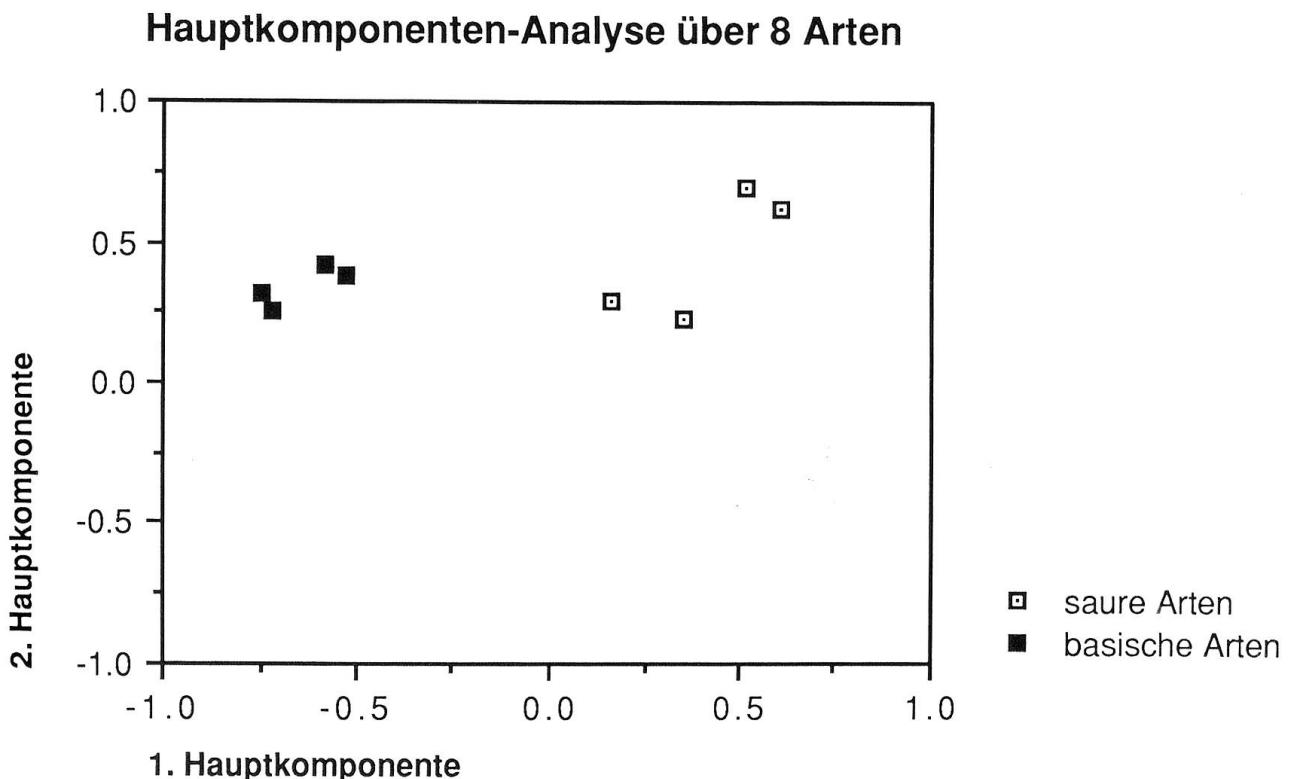


Abb.11: Hauptkomponenten-Analyse über acht Flechtenarten.

Treten mehr acidophile Flechtenarten auf, so wird der Acidoindex positiv, treten mehr basiphile Arten auf, wird er negativ. Das Vorzeichen des Acidoindex liefert qualitative Anhaltspunkte über den Immissions- typ in einer Region: Bei positivem Vorzeichen überwiegen eher saure, nährstoffarme Immissionen, bei negativem Vorzeichen eher basische, nährstoffreiche Immissionen.

In den Untersuchungsgebieten des Kantons Luzern wurde für jeden Trägerbaum der Acidoindex berechnet. Anschliessend wurden in Analogie zu den IAP18-Mittelwerten mittlere Acidoindices für geographisch homogene Raumeinheiten berechnet. Diese mittleren Acidoindices sind in Abb.12 dargestellt.

Positive Vorzeichen (saure Immissionen) sind als Kreise abgebildet, negative Vorzeichen (basische Immissionen) als Sterne. Je grösser die Symbole, desto stärker positiv resp. negativ sind die Werte. Werte bei null

(kleine Punkte) bedeuten entweder eine starke Gesamtimmissionsbelastung (alle Frequenzen null, so dass der Acidoindex null wird) oder ein Gleichgewicht zwischen den acidophilen und basiphilen Flechtenarten.

Saure Immissionen finden sich in Stadt und Agglomeration Luzern sowie in Aus- senzentren wie Sursee, Dagmersellen und Hochdorf.

Basische Immissionen dagegen dominieren in den ländlichen Regionen des Kantons. In der Stadt Luzern und vor allem in den südlichen Agglomerationsgemeinden Kriens und Horw überwiegen die sauren Immissionen (grosse Kreissymbole). Auch in Emmen, in den oberen Teilen des Reuss- und des Rontales sowie in Meggen herrschen saure Immissionen vor.

Daneben finden sich saure Immissionen nur noch in grösseren Siedlungen: Dagmersellen, Sursee und Hochdorf weisen je mehr-

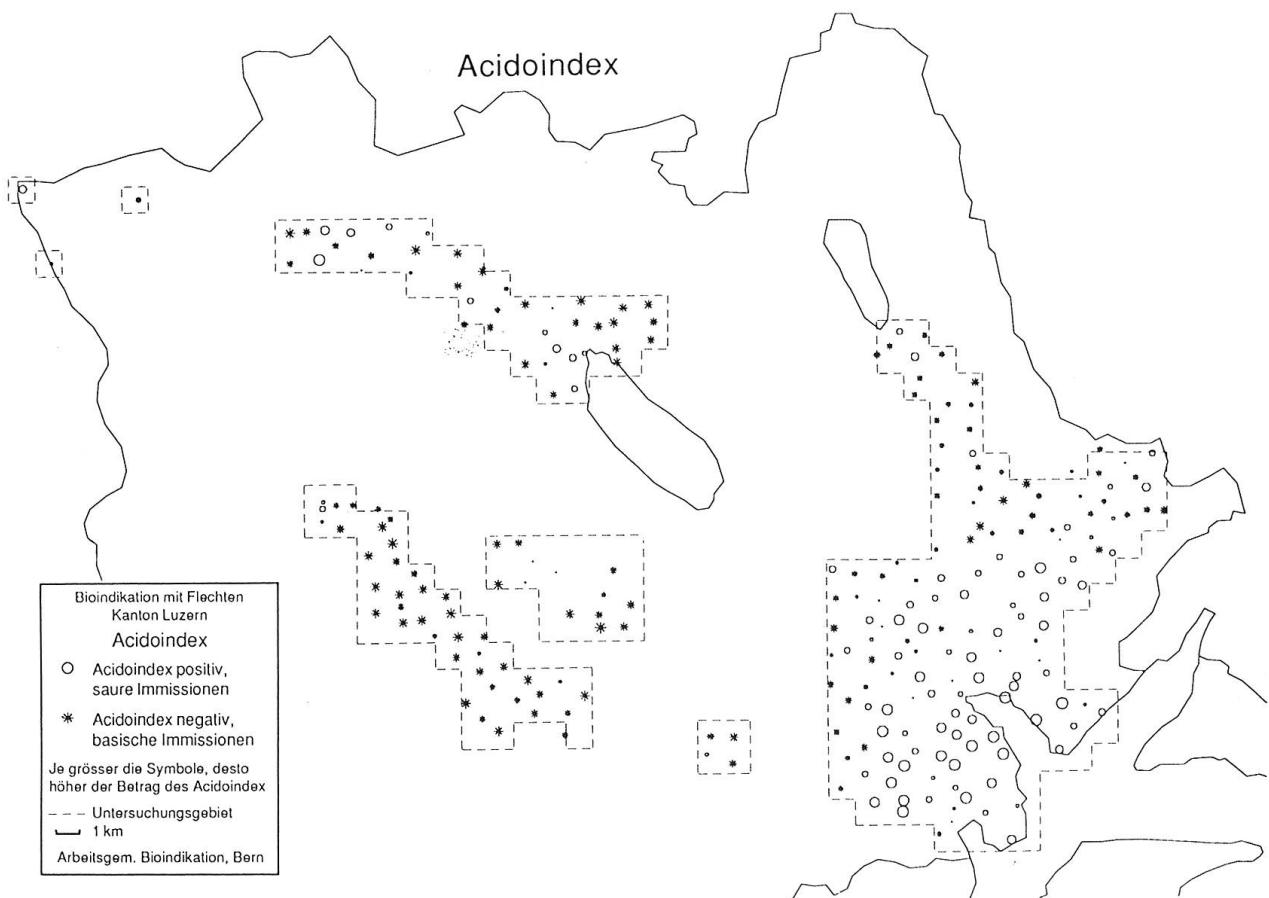


Abb.12: Acidoidex im Kanton Luzern.

rere positive mittlere Acidoidices auf. Auch Willisau muss dazu gezählt werden: In einer sehr stark basisch geprägten Region sind in der Stadt Willisau saure Immissionen festzustellen.

Hauptbestandteil dieser sauren Immissionen stellen sicherlich die Schadstoffe SO_2 und NO_x (inkl. deren Säureformen) dar. Diese stammen aus dem Verkehr, der Industrie, dem Gewerbe und dem Hausbrand. Deshalb sind saure Immissionen vorwiegend in dicht besiedelten Regionen des Untersuchungsgebietes zu finden.

Im Gegensatz dazu sind die ländlichen Teile des Untersuchungsgebietes meist von basischen Einflüssen dominiert. Die Region Willisau–Wolhusen weist sehr stark negative Acidoidices auf (große Sternsymbole). Aber auch die Regionen östlich von Sursee,

zwischen Sursee und Dagmersellen und zwischen Eschenbach und Hochdorf sowie die Randregionen der Agglomeration Luzern sind eher basisch geprägt.

In diesen Gebieten wird die Flechtenvegetation von basischen Immissionen beeinflusst. Es ist zu vermuten, dass diese Immissionen vorab aus Staub und Ammoniak (NH_3) bestehen.

Hauptquelle dieser Emissionen dürfte im Kanton Luzern die Landwirtschaft darstellen. Gesamtschweizerisch stammen 89% des emittierten Ammoniak-Stickstoffes ($\text{NH}_3\text{-N}$) aus der Landwirtschaft. Die Emission von $\text{NH}_3\text{-N}$ durch Nutztierhaltung ist im Kanton Luzern im schweizerischen Vergleich am höchsten; sie beträgt 27 kg $\text{NH}_3\text{-N}$ pro Hektar Bodenfläche; der schweizerische Durchschnitt beträgt 9 kg $\text{NH}_3\text{-N}$ pro Hektar

(STADELmann 1988). Es erstaunt deshalb nicht, dass stark landwirtschaftlich genutzte Gebiete des Kantons basische Immissionen aufweisen, d. h. durch einen negativen Acidoidindex gekennzeichnet sind.

Ammoniak ist wie andere Stickstoffverbindungen in grösseren Mengen und vor allem in Kombination mit anderen Schadfaktoren pflanzenschädigend (FUHRER 1988). In Freilandbegasungen wurde die schädigende Wirkung von NH_3 auch für Flechten nachgewiesen (JÜRGING 1975).

In Gebieten mit hohen NH_3 -Immissionen sind daher zwei Reaktionen der Flechtenvegetation zu erwarten: Empfindliche Flechten werden durch die Immission direkt geschädigt, und zudem verschiebt sich die Flechtenvegetation in Richtung basiphiler und unempfindlicher Flechtengesellschaften.

Verdankungen

Herzlich danken wir:

- Dr. Marilen Macher und Hanni Britt für ihre Mitarbeit bei der Kartierung,
- Dr. Christoph Scheidegger und Christine Keller für die Bestimmung taxonomisch schwieriger Flechtenproben,
- Dr. Klaus Ammann, Systematisch-Geobotanisches Institut der Universität Bern, für die Leitung der Flechtenprojekte im Kanton Luzern,

die wesentlich zum Gelingen der vorliegenden Arbeit beigetragen haben.

Wir danken dem Amt für Umweltschutz Kanton Luzern, welches die Flechtenprojekte finanzierte; spezieller Dank gilt Dr. Thomas Joller, welcher als Vertreter des Amtes wichtige Beiträge zur Arbeit geleistet hat.

LITERATURVERZEICHNIS

- AFU (Amt für Umweltschutz Kanton Luzern) (1989): *Massnahmenplan in der Agglomeration Luzern, Sanierungsbedarf.*
- AGB (1989): *Flechtenuntersuchungen im Kanton Luzern, Teilprojekt B: Flechten als Bioindikatoren der Luftverschmutzung. Schlussbericht.* — AGB, Arbeitsgemeinschaft für Bioindikation, Umweltbeobachtung und ökologische Planung, Bern; Amt für Umweltschutz Kanton Luzern, Luzern.
- EDI (Eidgenössisches Departement des Innern) (1986): *Luftreinhalte-Verordnung (LRV) vom 16.12.1985.* — EDMZ, Bern.
- FREY E. (1960): *Beitrag zur Flechtenflora des Schweizer Mittellandes mit besonderer Berücksichtigung des Aargaus.* — Verhandl. der Schweiz. Naturforsch. Gesell., Wissenschaftl. Teil 140: 121–124.
- FUHRER, J. (1988): *Auswirkung luftbürtiger N-Verbindungen und deren Folgeprodukten auf landwirtschaftliche Kulturpflanzen.* — FAC-Oktobertagung 1988, Eidg. Forschungsanstalt für Agrikulturchemie und Umwelthygiene Liebefeld-Bern.
- GIUB (1989): *Das Ausbreitungsklima der Innere Schweiz. Schlussbericht, Band 1 und 2.* — Geographisches Institut der Universität Bern, Bern; Amt für Umweltschutz Kanton Luzern, Luzern.
- HERZIG, R., URECH, M. & LIEBENDÖRFER, L. (1987): *Flechten als biologische Indikatoren der Luftverschmutzung in der Schweiz: Methoden-Evaluation und Eichung mit wichtigen Luftschadstoffen.* — VDI-Berichte 609, 619–639.
- JÜRGING, P. (1975): *Epiphytische Flechten als Bioindikatoren der Luftverunreinigung.* — Bibliotheca Lichenologica, Hrsg. J. Cramer, Vaduz, Band 4.
- LEBLANC, F. & DESLOOVER, J. (1970): *Relation between industrialization and growth of epiphytic lichens and mosses in Montreal.* — Can. J. Bot. 48, 1485–1496.
- RUOSS, E. & KELLER, CH. (1988): *Flechtenuntersuchungen im Kanton Luzern. Teilprojekt A: Flechteninventar. 1. Zwischenbericht.* — Amt für Umweltschutz Kanton Luzern, Luzern.
- STADELmann, F. (1988): *N in der Landwirtschaft: Kreislauf, Probleme, Verluste, Synthese, Schlussfolgerungen.* — FAC-Oktobertagung 1988, Eidg. Forschungsanstalt für Agrikulturchemie und Umwelthygiene Liebefeld-Bern.
- THÖNI, L., PETER, K., HERTZ, J. & BÄCHTOLD, H. G. (1989): *Ökologische Planung: Ergebnisse der Fallstudie Bündner Rheintal, Erfassung der Immissions-situation einer Region als Grundlage für die Raumplanung.* — ORL-Berichte Nr. 76, vdf Zürich.
- URECH, M., HERZIG, R. & AMMANN, K. (1989): *NFP14: Flechten als biologische Indikatoren der Luftverschmutzung in der Schweiz — Schlussbericht: Integriertes biologisches Messsystem der Luftverschmutzung für das Schweizer Mittelland.* — Systematisch-Geobotanisches Institut der Universität Bern.
- WIRTH, V. (1980): *Flechtenflora.* — Uni-Taschenbücher UTB 1062. Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart.

Dr. Martin Urech, Dr. Kathrin Peter,
Luzius Liebendörfer, Dr. Rolf Herzig
AGB
Arbeitsgemeinschaft für Bioindikation,
Umweltbeobachtung und ökologische
Planung
Mühlemattstrasse 31
3007 Bern