

**Zeitschrift:** Mitteilungen der Naturforschenden Gesellschaft Luzern

**Herausgeber:** Naturforschende Gesellschaft Luzern

**Band:** 33 (1993)

**Artikel:** Klima und Luftqualität

**Autor:** Müller, Alois / Joller, Thomas / Ruoss, Engelbert

**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-524752>

#### **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:** 04.02.2026

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

## Klima und Luftqualität

Alois Müller, Thomas Joller, Engelbert Ruoss und Justus Gallati



Die Luftqualität in einem Gebiet hängt von komplexen Vorgängen in der Atmosphäre ab. Luftschatdstoffe können durch natürliche Prozesse in die Atmosphäre gelangen oder – wie im Falle der wichtigsten gasförmigen Leitsubstanzen – durch Prozesse und Aktivitäten menschlichen Ursprungs (anthropogen) verursacht sein. In der Zentralschweiz überwiegen die anthropogenen Quellen mit Anteilen von 80 bis 99 % des Ausstosses deutlich. Die Beurteilung der Luftqualität beruht im folgenden ausschliesslich auf den anthropogen verursachten Luftschatdstoffen.

Im Luftraum werden die Schadstoffe verdünnt, chemisch verändert und verteilt. Mit dem Regen oder als kleine, trockene Partikel kommen diese Luftfremdstoffe schliesslich wieder auf die Erde zurück. Je nach Zusammensetzung und Konzentration haben sie unterschiedliche Auswirkungen auf Pflanzen, Tiere oder Menschen. Massgebend für die klimatischen Verhältnisse und damit die Luftschatdstoffbelastung im Sempacherseegebiet sind auch die Topographie sowie die grossräumigen Wetterlagen.

Gemäss Eidgenössischer Luftreinhalteverordnung (LRV) ist der Kanton verpflichtet, in Gebieten mit übermässiger Luftschatdstoffbelastung Massnahmen zu deren Reduktion zu ergreifen. Aus diesem Grunde erhab das Amt für Umweltschutz zwischen 1986 und 1991 verschiedene Kästter. Diese geben Auskunft über die Art und Mengen der ausgestossenen Schadstoffe (Emissionskataster), über ihre Verfrachtung (Durchlüftungskataster) sowie über ihre Auswirkung auf Lebewesen (Wirkungskataster). An verschiedenen Punkten wurden die Konzentrationen von einigen Leitsubstanzen mit technischen Messeinrichtungen ermittelt (Immissionsmessungen). Diese bildeten die Basis für die Massnahmenpläne für Gebiete mit übermässiger Belastung. Damit sollen die

Schadstoffkonzentrationen bis 1994 soweit reduziert werden, dass keine übermässigen Belastungen gemäss LRV mehr auftreten.

## Emissionen

Luftschatdstoffe werden in der Regel durch Kamine, Abluftsysteme oder Auspuffrohre an die Atmosphäre abgegeben. Bei den flüchtigen organischen Verbindungen gelangen beträchtliche Schadstofffrachten auch diffus in die Umgebung. Die an die Luft abgegebenen Schadstoffe werden als «Emissionen» bezeichnet.

Anhand von Daten über die ausgestossenen Mengen der wichtigsten Schadstoffe und den Ort des Ausstosses können Reduktionsstrategien erarbeitet werden. Bei der Ermittlung dieser Daten werden verschiedene Quellengruppen definiert und dafür optimierte Erhebungsmethoden eingesetzt. Für den Raum Sempachersee stehen Daten für die Quellengruppen Verkehr, Industrie und Gewerbe sowie Haushaltungen zur Verfügung (Tab. 1).

Gemäss Ermittlungen von 1991 werden im Raume Sempachersee pro Jahr rund 810 Tonnen flüchtige organische Verbindungen (VOC) emittiert, was 8 % des Ausstosses im Kanton Luzern entspricht (Abb. 2). Flüchtige organische Verbindungen sind Stoffe, die in grossen Mengen bei Reinigungs- und Beschichtungsprozessen, bei Umfüllvorgängen und in Chemiebetrieben in die Umgebungsluft gelangen. Charakteristisch für die Emissionen dieser Stoffgruppe ist die grosse Anzahl von kleinen Emittenten, die zusammen einen beträchtlichen Anteil an den Gesamtemissionen ausmachen. Die Emissionsfrachten im Raume Sempachersee entsprechen dem gesamtschweizerischen Mittelwert pro Person. Die emittierten Frachten von flüchtigen organischen Verbindungen müssen künftig drastisch reduziert werden, wenn es

Schadstoffemissionen im Kanton Luzern und in der Region Sempachersee								
Gebiet	VOC				NO <sub>x</sub>			
	10 406	2 555	4 651	3 200	7 881	399	1 349	6 133
Kanton Luzern	810	187	300	323	1012	26	30	956
Region Sempachersee	55	8	7	40	157	1	0	156
Eich	37	14	8	15	34	2	1	31
Hildisrieden	168	40	68	60	191	5	3	183
Neuenkirch	49	18	14	17	23	2	1	20
Nottwil	50	19	13	18	36	2	8	26
Oberkirch	61	14	7	40	142	2	0	140
Schenkon	108	23	20	65	227	3	2	222
Sempach	282	51	163	68	202	9	15	178
Sursee								

Gebiet	SO <sub>2</sub>				Staub			
	2 078	791	1 087	200	1 240	633	565	42
Kanton Luzern	123	52	44	27	63	45	12	6
Region Sempachersee	6	2	0	4	3	2	0	1
Eich	5	4	0	1	5	4	1	0
Hildisrieden	17	10	2	5	15	11	3	1
Neuenkirch	6	4	1	1	5	5	0	0
Nottwil	22	5	16	1	7	5	2	0
Oberkirch	7	3	0	4	5	4	0	1
Schenkon	15	7	2	6	8	5	1	2
Sempach	45	17	23	5	15	9	5	1
Sursee								

Gemeinde gesamt

Haushaltungen

Industrie und Gewerbe

Verkehr



Tab. 1: Schadstoffemissionen im Kanton Luzern 1991 für verschiedene Schadstoffe und Emittentengruppen (Angaben in 1000 kg/Jahr; VOC = flüchtige organische Verbindungen; NO<sub>x</sub> = Stickoxide; SO<sub>2</sub> = Schwefeldioxid).

gelingen soll, die Ziele der schweizerischen Luftreinhaltepolitik zu erreichen.

Für die Schadstoffgruppe Stickoxid (NO<sub>x</sub>) – als Summe von NO und NO<sub>2</sub>, angegeben als NO<sub>2</sub> – beträgt der Anteil im Raume Sempachersee rund 13 % der Emissionen im Kanton Luzern. Stickoxide werden zur Hauptsache durch Verbrennungsmotoren emittiert. Die Gütertransporte auf der Strasse und der Personenwagenverkehr sind für über 90 % der NO<sub>x</sub>-Emissionsfrachten im Raume Sempachersee verantwortlich. Die Emissionen liegen vor allem wegen der nördlich des Sees vorbeiführenden Nationalstrasse N2 (Abb. 1)

deutlich über den Zielwerten. Zukünftig wird der Anteil des Güterverkehrs an den Stickoxidemissionen zusätzlich an Bedeutung gewinnen, da keine erfolgversprechenden Minderungstechnologien bekannt sind.

Die Stickoxidemissionen sind lokal von Bedeutung; auffallend ist die Dominanz der Verkehrsemissionen und einzelner grösserer Industriebetriebe (Abb. 3). Die Emissionsaufstellung für die einzelnen Gemeinden ermöglicht einen Überblick über die Bedeutung einzelner Schadstoffe und Schadstoffgruppen. Bei den aufgeführten Stoffen handelt es sich um sogenannte

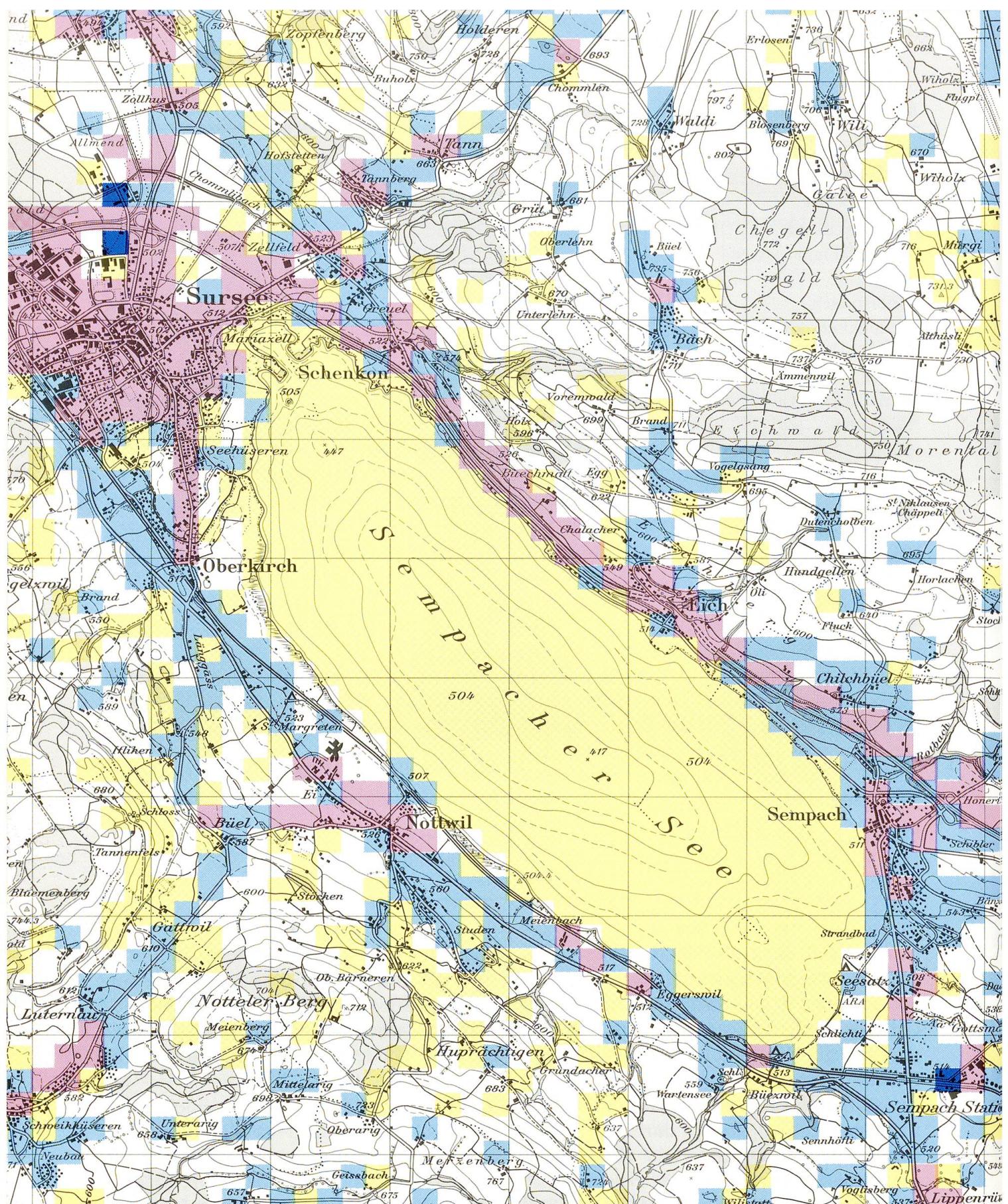


Abb. 2: Emissionen von flüchtigen organischen Verbindungen (VOC) von Haushaltungen, Industrie und Verkehr (zusammengefasst in 1000 kg/Jahr, 200-m-Raster, Stand 1. Februar 1992).

Yellow: > 0.010      Blue: > 0.100      Red: > 1.000      Black: > 10.000

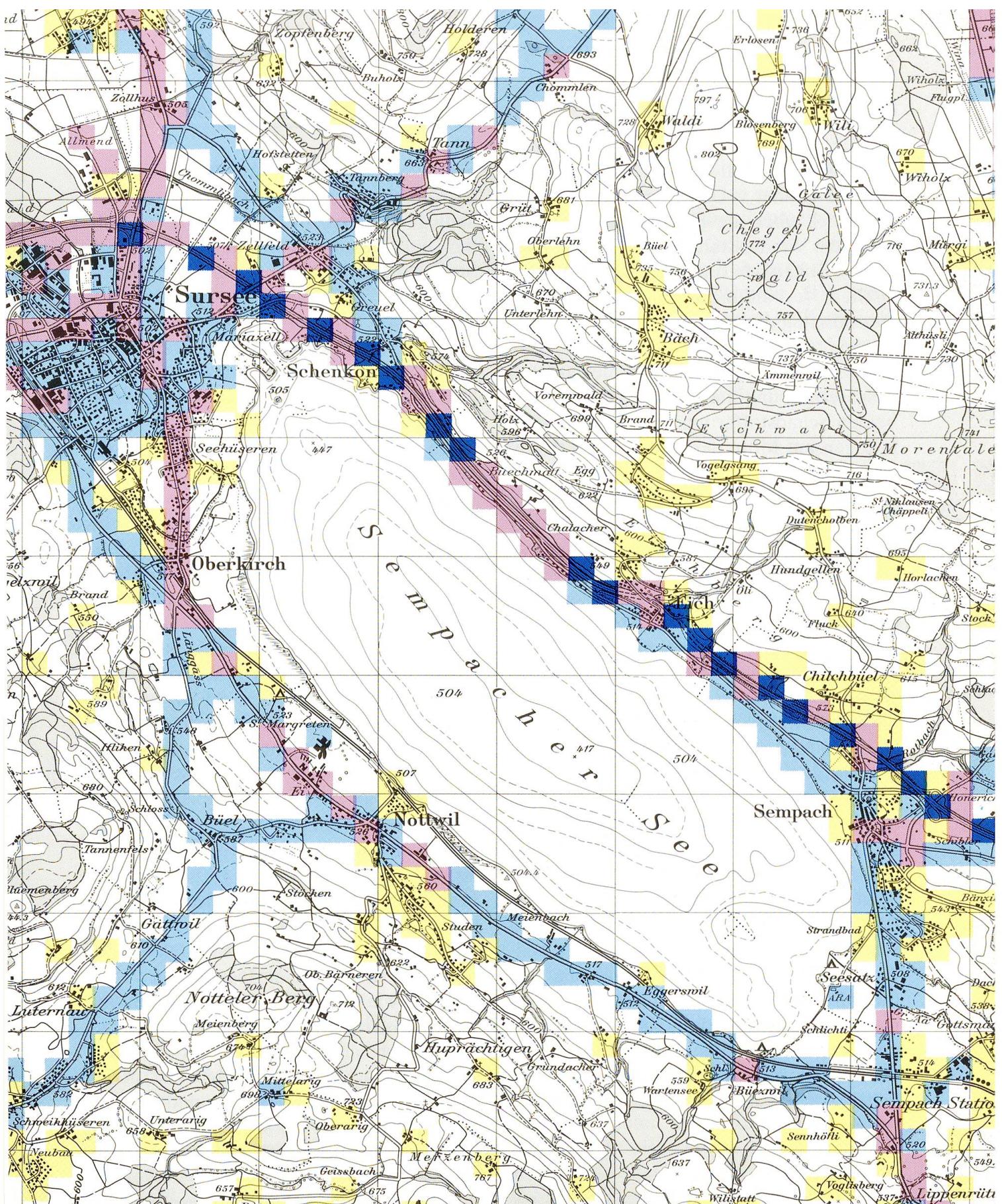
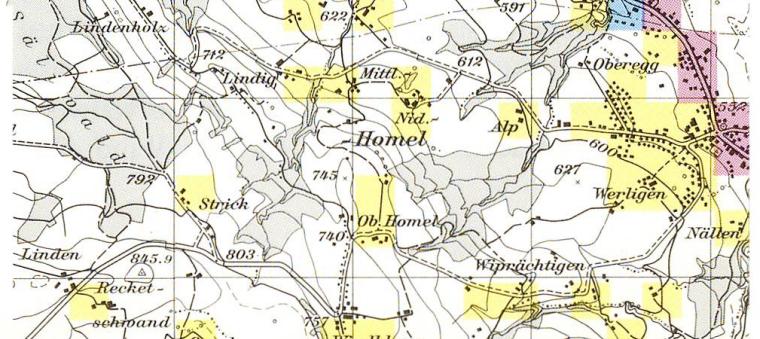


Abb. 3: Stickoxid-Emissionen von Haushaltungen, Industrie und Verkehr (zusammengefasst) im Sempacherseegebiet (in 1000 kg/Jahr, 200-m-Raster, Stand 1.Januar 1992).

> 0.010    > 0.100    > 1.000    > 10.000



Leitstoffe, die stellvertretend für die Gesamtheit aller Luftfremdstoffe einen Überblick über die Luftbelastung gemäss heutigem Wissensstand ermöglichen.

Die Stickoxide und die flüchtigen organischen Verbindungen sind in den Sommermonaten die wichtigsten Vorläufersubstanzen für den Sekundärschadstoff Ozon. Zur Einhaltung der Qualitätsziele der Bundesgesetzgebung müssen die Frachten der beiden Schadstoffgruppen um 60 bis 80 %, bezogen auf Mitte der achtziger Jahre, gesenkt werden.

Schwefeldioxid ( $\text{SO}_2$ ) ist ein Luftschadstoff, der zumeist durch die Verbrennung von schwefelhaltigen fossilen Energieträgern freigesetzt wird. Der Schwefelgehalt im Heizöl und Dieselöl wurde in den achtziger Jahren durch verschärfte Importanforderungen drastisch gesenkt. Dies führte zu einer deutlichen Reduktion der Emissionen von Schwefeldioxid.

Die Luftreinhalteverordnung kennt als weiteren Leitstoff den Schwebestaub. Der natürliche Anteil der Schwebestaubfrachten in der Atmosphäre ist deutlich höher als bei den gasförmigen Luftfremdstoffen. In Zukunft dürften Aussagen über den Anteil einzelner Inhaltsstoffe des Schwebestaubes wichtig werden, da diese eine deutlich bessere Beurteilung der lufthygienischen Situation ermöglichen. Ebenso sollten die Messungen durch Erfassung von Staubfraktionen mit kleineren Korngrössen ergänzt werden, da deren gesundheitliche Bedeutung, im Zusammenhang mit anderen gasförmigen Schadstoffen, vermutlich grösser ist als bisher angenommen.

## ■ Transmissionen

In der Atmosphäre werden die Luftfremdstoffe nicht nur verdünnt und durch vorwiegend chemische Prozesse teilweise verändert, sondern auch vom Wind über

bedeutende Distanzen verfrachtet. Die maximalen Verfrachtungsdistanzen sind abhängig von den Wetterverhältnissen und der möglichen Aufenthaltsdauer eines Stoffes in der Atmosphäre. Schwefeldioxid kann unter speziellen Bedingungen Hunderte von Kilometern verfrachtet werden. Andere Stoffe wie Ammoniak weisen nur kleinräumige Transportdistanzen (rund 10 km) und eine kurze Aufenthaltsdauer (maximal 3 Stunden) auf.

In der ausführlichen Studie «Das Ausbreitungsklima der Innerschweiz; Studie über die Durchlüftungs- und Ausbreitungsbedingungen in den Kantonen Luzern, Nidwalden, Obwalden, Schwyz, Uri, Zug» wurden 1989 die Grundlagen für die Beurteilung der Verfrachtungsvorgänge für die ganze Innerschweiz geschaffen. Das Ausbreitungsklima der Sempacherseeregion wurde darin anhand der Stationen Sursee und Eich/Eichsee (am See in Eich gelegen) charakterisiert und mit den nächstgelegenen, aber topographisch verschiedenen Stationen Beromünster und Ruswilerberg verglichen.

Wenn es gelingen soll, die Veränderungs- und Verfrachtungsvorgänge in der Atmosphäre modellmässig zu beschreiben, braucht es umfangreiche Kenntnisse der lokalen Windverhältnisse und der Topographie sowie Wissen über die Gebiete mit bedeutenden Inversionslagen. Von Interesse ist, wie weit und in welche Richtung die betroffenen Luftmassen verfrachtet werden, ob schadstoffarme Luft zugeführt wird, wie mächtig die Luftsicht ist, in der sich die Emissionen verteilen und verdünnen können, oder ob sich die verschiedenen Luftsichten stark miteinander vermischen.

Bestimmend für diese Transport- und Austauschprozesse sind die Wind- und Temperaturverhältnisse. Bedeutsam sind Richtung und Geschwindigkeit des Windes, etwa die Hauptwindrichtung, aber

auch Situationen mit sehr geringen Windstärken. Entscheidend für die Windverhältnisse einer Region ist, ob lokal-regionale Windsysteme vorherrschen oder ob das Windverhalten von grossräumigen Höhenwinden bestimmt wird. Die Temperaturverhältnisse werden durch den Verlauf der Temperatur mit zunehmender Höhe beschrieben. Besonders zu beachten sind Bodeninversionen, bei denen, im Gegensatz zum «normalen» Temperaturverlauf, die Temperatur mit der Höhe über Grund zunimmt. Die obere Grenze wird Sperr- oder Grenzschicht genannt. Bodeninversionen oder Kaltluftgebiete wurden in einer Kaltluftgebietskarte dargestellt.

Bei der Station Sursee ist die Hauptwindrichtung Nordwest (Abb. 4). Die Winde aus Südost setzen sich aus kalter Luft (Hangabwind) im Winter und Seewind im Sommer zusammen. Die Windstärken sind im allgemeinen gering und betragen im Jahresmittel 1,6 m/s. Die Windverhältnisse werden auch von den Höhenwinden beeinflusst, und zwar von Westwinden wie auch von der Bise (Nordostwind).

Die Stationen Eich und Eichsee zeigen diffuse Windverhältnisse. Ein lokales Windsystem mit Hangabwinden in der Nacht und Aufwind am Tag dominiert. Die Winde sind durch die Topographie kaum kanalisiert. Die Windgeschwindigkeiten liegen mit einem Jahresmittel um 2 m/s höher als in Sursee. Trotz der geschützten Lage ist der Einfluss der Höhenwinde (West, Bise) feststellbar.

Sursee und Sempach liegen in einem ausgeprägten Kaltluftgebiet (Abb. 5). Bei Inversionslagen ist die kalte unterste Schicht nur 40 m mächtig. Sie wird durch eine stabile Grenzschicht nach oben abgeschlossen. Beidseits des Sees findet auf einer kurzen Strecke ein Übergang zu Schichten mit grösserer Mächtigkeit statt. Dort ist die Luft weniger kalt, und die Grenzschicht verliert an Stabilität.

Die ziemlich tiefen mittleren Windgeschwindigkeiten in Sursee und die daraus folgende schlechte Durchlüftung sowie die Lage in einem Kaltluftgebiet bedeuten eine potentiell höhere Belastung durch die Emission an Luftschatdstoffen. Die höheren Windgeschwindigkeiten in Eich/Eichsee und die Lage in einem weniger ausgeprägten Kaltluftgebiet gestatten eine bessere Verteilung und Verdünnung von Luftschatdstoffen.

## ■ Immissionen

Luftschatdstoffe können neben Belästigungen auch Schädigungen verursachen. Ihre Einwirkungen auf Betroffene werden als Immissionen bezeichnet. Diese gelten als übermässig, wenn Immissionsgrenzwerte überschritten, wenn Menschen, Tiere und Pflanzen in ihren Lebensgemeinschaften und Lebensräumen gefährdet, Bauwerke beschädigt, die Fruchtbarkeit des Bodens, die Vegetation oder die Gewässer beeinträchtigt werden, oder wenn ein wesentlicher Teil der Bevölkerung in ihrem Wohlbefinden erheblich gestört wird.

Im Sempacherseegebiet sind die Immissionen von Ozon ( $O_3$ ) in den Sommermonaten übermässig. Der Kurzzeitgrenzwert wird je nach Wetterverhältnissen während 200 bis 400 Stunden pro Jahr überschritten. Die gemessenen Maximalwerte liegen im Bereich von 200 Mikrogramm pro Kubikmeter; der maximal zulässige Stundenmittelwert, der nur einmal pro Jahr überschritten werden darf, beträgt 120 Mikrogramm pro Kubikmeter. Die erforderlichen Massnahmen zur Reduktion der Emissionen sind eingeleitet worden; voraussichtlich werden sie nicht termingerecht (gemäss Luftreinhalteverordnung bis zum 1. März 1994) dazu führen, dass keine übermässigen Immissionen mehr zu verzeichnen sind.





Abb. 4: Im Sempacherseegebiet dominieren die Nordwestwinde. Diese wehen im ländlichen Gebiet stärker als im Kessel der Agglomeration Sursee.

Ozon ist der Hauptbestandteil des Sommersmogs und wird aus Stickoxiden und flüchtigen organischen Verbindungen unter Einwirkung des Sonnenlichtes gebildet. Grenzwertüberschreitungen sind vor allem in ländlichen Gebieten zu verzeichnen. Konzentrationen über dem Immissionsgrenzwert schädigen Pflanzen und beeinträchtigen die Atemorgane von Mensch und Tier. Zahlreiche Studien lassen den Schluss zu, dass bei Ozonkonzentrationen, wie sie im Raume Sempachersee jährlich auftreten, mit Auswirkungen auf Pflanzen, Tiere und Menschen zu rechnen ist. Grosse Anstrengungen jedes einzelnen Bürgers, im ganzen schweizerischen Mittelland, werden künftig erforderlich sein, um die

Luftbelastungen im Sommer auf ein unbedenkliches Mass zu senken.

Die Immissionsmessungen von Stickstoffdioxid von 1991 im Kanton Luzern mit Hilfe von Passivsammeln (Abb. 6) zeigten, dass die langfristigen Mittelwerte im Bereich des gültigen schweizerischen Grenzwertes von 30 Mikrogramm pro Kubikmeter lagen. Unter extremen Bedingungen im Winter, bei Kälte und ausgeprägten, langandauernden Inversionslagen, wurden gelegentlich die Kurzzeitgrenzwerte erreicht oder überschritten. Hohe NO<sub>2</sub>-Immissionswerte wurden in der Nähe von grossen Stickoxid-Quellen registriert. Als mässig bis stark belastet gelten deshalb Gebiete entlang der Nationalstrasse und die Umge-



Abb. 5: Bei Inversionslagen sind in den Kaltluftgebieten der Talungen erhöhte Luftscha-dstoffkon-zentrationen anzutreffen. In den Zentralschweizer Alpen herrscht eine Föhnwetterlage.

bung dichtbesiedelter und industrialisierter Flächen.

Durch Reduktionsstrategien im Bereich der Stickoxidemissionen können sowohl die Immissionswerte für NO<sub>2</sub> wie auch jene für den Sekundärschadstoff Ozon gesenkt werden. Die bereits eingeleiteten und wirksamen Gegenmassnahmen haben zwar Frachtreduktionen bei den Stickoxiden ermöglicht, sind jedoch nicht ausreichend,

um die Qualitätsziele zu erreichen. Im Massnahmenplan müssen daher zusätzliche Reduktionen gefordert werden. Diese werden mit Sicherheit technisch und politisch schwierig zu realisieren sein.

Weitere Luftscha-dstoffe sind für das be-trachtete Gebiet nicht von zentraler Be-deutung, da die Belastungswerte deutlich tiefer liegen als die Qualitätsanforderun-gen. Bei den Immissionen von Schwefel-

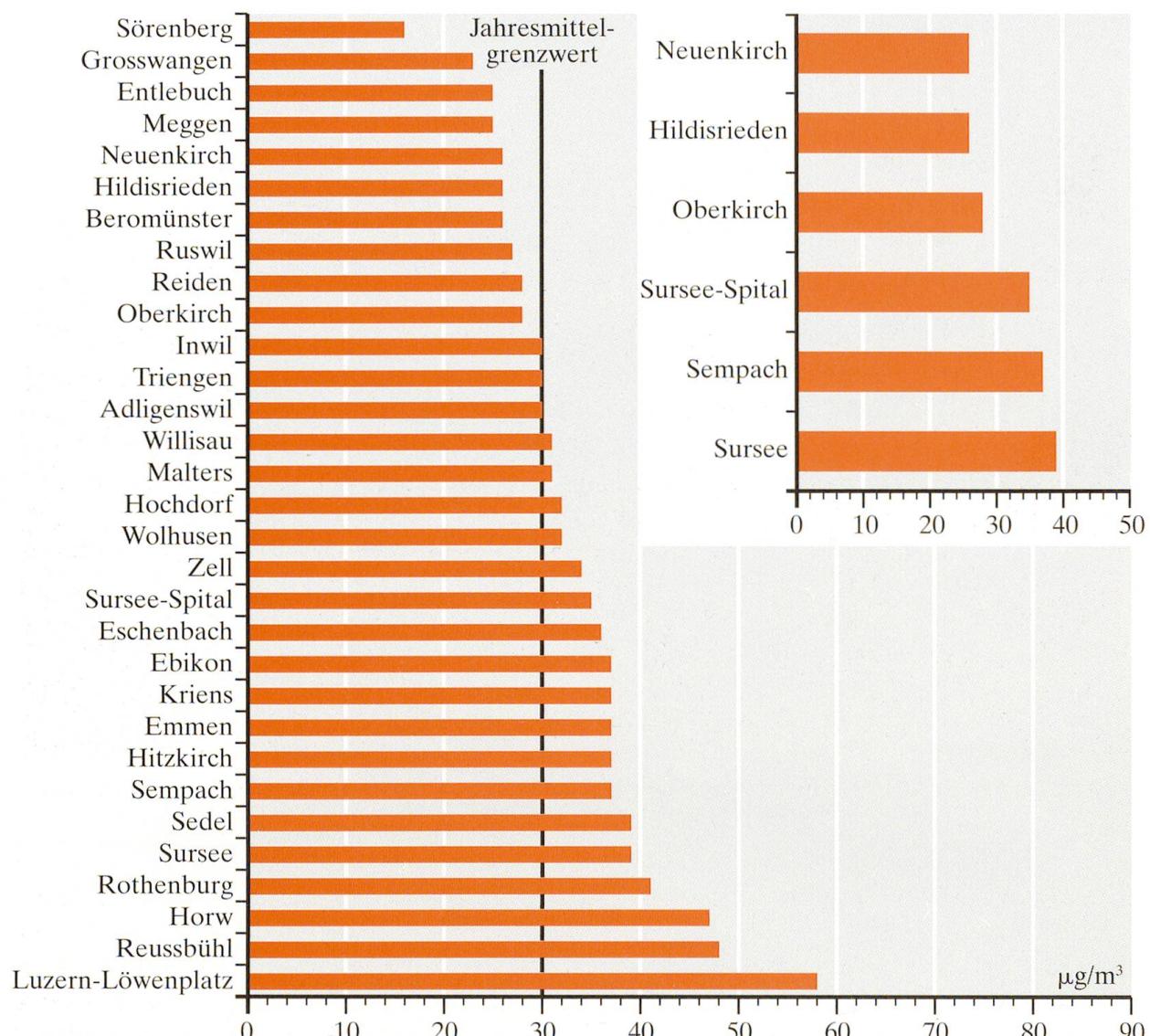


Abb. 6: Die Passivsampler-Messungen im Raume Sempachersee im Vergleich zu anderen Messstandorten im Kanton Luzern. Stickstoffdioxid-Jahresmittelwerte 1991.

dioxid erreichen die registrierten Werte weniger als 50 % des gültigen Grenzwertes. Gemäss heutigem Kenntnisstand können solche Konzentrationen als unbedenklich eingestuft werden. Schwefeldioxid trägt zur Bildung der sauren Niederschläge bei. Eine weitestgehende Reduktion dieses Schadstoffes ist daher wünschenswert. Schwebestaubimmissionen und Staubbiederschläge liegen ebenfalls in einer Größenordnung, die als akzeptabel eingestuft werden kann. Dies gilt auch für jene Schwermetallnieder-

schläge, für die in der Luftreinhalteverordnung ein Grenzwert festgelegt ist.

Lokal von Bedeutung sind Belästigungen der Bevölkerung durch einzelne Emittenten. Im Vordergrund stehen die Geruchsbelästigungen durch Gewerbe- und Industriebetriebe, das Verbrennen von Abfällen im Freien sowie den Betrieb von ungeeigneten Holzfeuerungsanlagen. Die Forderungen nach Emissionsminderung sind in vielen Fällen gerechtfertigt. Meistens bleiben jedoch auch nach zeitlich aufwendigen Sanierungs-



Abb. 7: Die Emissionen von Ammoniak aus landwirtschaftlichen Betrieben führen zu einer unmittelbaren Gefährdung von Ökosystemen aus der Luft.

schritten Restemissionen, die dann als zumutbar eingestuft werden müssen.

In der Schweiz besteht kein Grenzwert für die sehr grosse Gruppe der flüchtigen organischen Verbindungen (VOC). Der erforderliche Sanierungsbedarf ergibt sich durch die Immissionsbegrenzung des Sekundärschadstoffs Ozon. Einzelne dieser Stoffe haben zudem eine Bedeutung wegen ihrer starken toxischen Wirkung; sie werden teilweise in der Liste der Schweizerischen Unfallversicherungsgesellschaft (SUVA) als krebserzeugend bezeichnet. Für einige gibt es im EG-Raum gültige Immissionsbegrenzungen.

## Dünger aus der Luft

Im Kantonalen Amt für Umweltschutz wird derzeit ein erster Ansatz für eine kan-

tonale Stickstoffbilanz im Rahmen eines Berichts «Stickstoffbilanz für den Kanton Luzern. – Die Suche nach Quellen, Senken und Zusammenhängen» erarbeitet. Dabei werden die Stoffflüsse von biorelevanten Stickstoffverbindungen ( $\text{NO}_x$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{NH}_4$ ,  $\text{HNO}_3$ ) und Lachgas ( $\text{N}_2\text{O}$ ) zwischen verschiedenen Bereichen berechnet (Boden, Luft, Wasser, Landwirtschaft, naturnahe Ökosysteme und Verbrennungsprozesse).

Die grössten Stickstoffflüsse gibt es in der Landwirtschaft. Umweltbelastende Stickstoffverbindungen gelangen ins Wasser und in die Luft (Abb. 7). Die Emissionen von Ammoniak, vornehmlich aus der Landwirtschaft (Kanton Luzern: 4590 t N/Jahr), übersteigen dabei diejenigen der Stickoxide (Kanton Luzern: 2390 t N/Jahr), welche hauptsächlich aus dem Verkehr stammen (Tab 2). Über die Emissionen von Lachgas ( $\text{N}_2\text{O}$ ) bestehen grosse

Stickstoff-Emissionen	
<i>Ammoniak (NH<sub>3</sub>)-Emittenten</i>	
Landwirtschaft	4 170 t N/Jahr
Bevölkerung	420 t N/Jahr
Total	4 590 t N/Jahr
<i>Stickoxid (NO<sub>x</sub>)-Emittenten</i>	
Verkehr	1 850 t N/Jahr
Industrie und Gewerbe	420 t N/Jahr
Haushalte	120 t N/Jahr
Total	2 390 t N/Jahr

Tab. 2: Die Stickstoff-Emissionen in Form von Ammoniak und Stickoxiden, aufgeteilt nach Verursachergruppen im Kanton Luzern.

Unsicherheiten; die künstliche Düngung wird als eine wichtige anthropogene Quelle betrachtet.

Während die Depositionen von oxidierten Stickstoffverbindungen (NO<sub>2</sub>, Nitrit, Nitrat) grossräumig homogen verteilt werden, werden die Einträge reduzierter Formen (Ammoniak, Ammonium) deutlich von lokalen Quellen beeinflusst. Das zeigt sich vor allem bei den Wäldern, welche durch die hohen Stickstoffeinträge aus der Luft regelrecht überdüngt werden. Die Stickstofffrachten, die über Oberflächengewässern deponiert werden, erreichen im Sempacherseegebiet jährlich Durchschnittswerte von 15 kg Stickstoff pro Hektare. Für Wälder wurde in diesen Gebieten ein Eintrag von 82 kg und für landwirtschaftliche Nutzflächen von 30 kg N/ha pro Jahr errechnet. Als kritische Stickstofffrachten wurden von einer internationalen Expertengruppe für Magerwiesen 7 bis 10 kg, Hochmoore 5 bis 10 kg, Nadelwald 10 bis 12 kg und Laubwald 15 kg Stickstoff pro Hektare und Jahr geschätzt.

Massnahmen für eine mengenmässig bedeutende Reduktion der Ammoniak-Emissionen aus der Landwirtschaft sind dringend notwendig. Dabei sollte bei der Reduktion der Tierbestände angesetzt wer-

den. Nur so kann die lokal extrem hohe Stickstoffbelastung für naturnahe Ökosysteme gesenkt werden.

## Auswirkungen auf Lebewesen

Zur Beurteilung der Auswirkungen der Luftschatstoffe werden Wirkungskataster erstellt, wobei gezielt Pflanzen und Flechten als Indikatoren eingesetzt werden. Ergebnisse solcher Bioindikations-Untersuchungen mit Flechten liegen auch im Kanton Luzern vor. Für die Ökosysteme im Raum des Sempachersees ist die Wirkung des gesamten Spektrums der Luftschatstoffe von Bedeutung.

Mit einer standardisierten Methode wurde der Flechtenbewuchs freistehender Bäume zwischen 1986 und 1989 untersucht. Dabei wurde auf einer Rasterfläche die Häufigkeit (Frequenz) einzelner Arten am Stamm ausgezählt (Abb. 9). Die Situation im Siedlungs- und Industriegebiet sowie in der Umgebung von Sursee ist für Flechten angespannt. Entlang dem See bis Oberkirch und am Tannberg gibt es eine Übergangszone mit deutlich besserem Flechtenbewuchs. Die Agglomeration Sursee wurde im Wirkungskataster als «Äussere Kampfzone» für Flechten bezeichnet. Dies entspricht nicht einer Flechtenwüste, wie sie von Grossstädten bekannt ist; deutlich sind aber Auswirkungen «saurer» Luftschatstoffe, wie beispielsweise Schwefeldioxid (SO<sub>2</sub>), erkennbar.

Die Flechtenflora wurde zudem entlang eines Transeks von West nach Ost – von Nottwil bis Tann – an 47 ausgewählten, freistehenden Bäumen erfasst (Abb. 8). Im städtischen Gebiet ist die Flechtenvegetation deutlich geschädigt. In ländlichen Gebieten dominieren die nitrophytischen Arten; die empfindlichen Arten fehlen. Dies dürfte auf den übermässigen Nährstoffeintrag aus der Atmosphäre mit dem

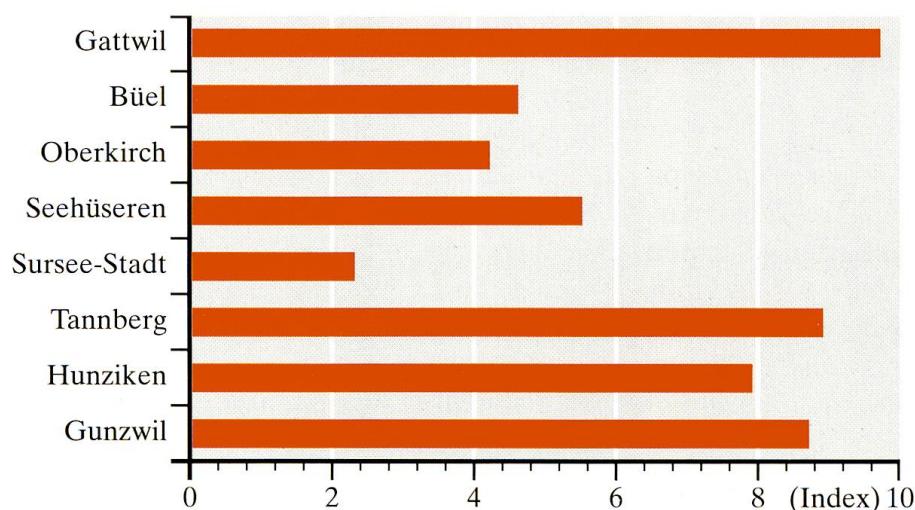


Abb. 8: Der Flechtenindex, gebildet aus Flechtenbedeckung und Artenzahl, wider- spiegelt die Flechten- diversität im nördlichen Seegebiet (Transekt SW – NE).



Niederschlag oder durch trockenen Staub sowie auf den direkten Eintrag aus der Landwirtschaft in der Umgebung zurückzuführen sein. Im Luzerner Mittelland konnte in Flechten von Schweine- stalldächern bis viermal mehr Stickstoff nachgewiesen werden als in Proben derselben Arten aus abgelegenen Kontrollgebieten.

Es konnte somit gezeigt werden, dass die «saure» Luftschaadstoffbelastung im Siedlungsgebiet zu einem Rückgang des Flechtenbewuchses führt. Gleichzeitig verursacht eine Belastung mit «basischen» Nährstoffen (z. B. Ammonium) eine Verarmung der Flechtenflora im ländlichen Raum und ein Überhandnehmen nährstoffliebender Arten. Da Flechten bei schönem, trockenem Wetter nicht aktiv sind, sind sie vor Einwirkungen hoher Ozonkonzentrationen weitgehend geschützt. Hingegen wurden bei Laubbäumen wie Pappeln und Birken Verfärbungen der Blätter und bei Nutzpflanzen eine Abnahme des Ernteeintrags festgestellt.

Die Stickstoffverbindungen können sich in hohen Konzentrationen auch auf andere Lebewesen auswirken.  $\text{NO}_2$  kann beim Menschen Erkrankungen der Atemwege hervorrufen, wirkt bei Pflanzen als Gift, vor allem in Kombination mit ande-

ren Gasen, und trägt über die Bildung von Nitrit und Nitrat zur Stickstoffüberdüngung von Ökosystemen bei. In hohen Konzentrationen wirkt Ammoniak im Wasser als Fisch- und in der Luft als Pflanzengift. Zudem trägt Ammoniak zusammen mit Ammonium zur Stickstoffüberdüngung von Wäldern und anderen Ökosystemen bei. Ernährungsphysiologische Veränderungen bei Pflanzen und Veränderungen der Zusammensetzung der Pflanzengemeinschaften sind Folgen des Nährstoffeintrags aus der Atmosphäre. Ammonium ist zudem an der Eutrophierung der Oberflächengewässer beteiligt.

### Weg zu besserer Luft

Der Vollzug der schweizerischen Gesetzgebung im Bereich Luftreinhaltung beruht auf einem Regelkreisvorgehen. Anhand einer Erfolgskontrolle im Bereich der Immissionen wird ermittelt, ob weitere Massnahmen zur Reduktion der Emissionen erforderlich sind. Daraus ergibt sich eine rollende Planung. Mit verschiedenen Methoden soll errechnet werden, welcher Bedarf an Emissionsminderung besteht und wie Massnahmen auf das Emissionsgeschehen einwirken. Es handelt sich dabei

## Flechten im Landwirtschaftsgebiet

An freistehenden Bäumen der Region Sursee wurden insgesamt 58 Flechtenarten registriert. Die häufigsten Flechten waren Zeigerarten für hohen Nährstoffeintrag. Zu den dominierenden Arten zählten die Blattflechten *Parmelia tiliacea*, *Physcia adscendens*, *P. tenella* und *Xanthoria parietina* sowie die Krustenflechten *Candelariella xanthostigma* und *Lecanora chlarotera*. Selten waren auch im ländlichen Bereich die empfindlichen Bart- und

Strauchflechten, die zumeist anitrophytische, also nährstoffmeidende Arten sind. Bei geringer Eutrophierung wären vor allem die seenahen Einzelbäume ideale Trägerbäume für diese empfindlichen Flechten. Den besten Flechtenbewuchs wiesen die Laubbäume auf dem Notteler Berg, im Gebiet Tannberg/Erlsosen sowie bei Seehüseren auf. Sogar in der Innenstadt von Sursee konnten an guten Trägerbäumen noch 15 schlecht entwickelte, zumeist toxitolerante Flechtenarten mit einer Gesamtdeckung von 10 bis 20 % registriert werden.



Auch an Steinen und künstlichen Standorten wie beispielsweise Mauern oder Wegstöcken geben die grau-gelben Flechtenmosaiken mit *Xanthoria parietina*, *Physcia caesia* oder *Lecanora muralis* Hinweise auf das reichliche Nährstoffangebot. Die Farbigkeit kann aber nicht darüber hinwegtäuschen, dass als Folge des Nährstoffeintrags viele empfindliche Flechten absterben und die Flechtenflora verarmt.



Abb. 9: Im nördlichen Seengebiet wurden die Flechten an freistehenden Bäumen erfasst. In der Stadt Sursee (links) konnten zwar noch 15 Arten gefunden werden; sie wiesen aber Schädigungen auf und waren schlecht entwickelt. In Landwirtschaftsgebieten (rechts) konnte eine bunte und gut entwickelte Flechtenflora registriert werden; die meisten Arten waren aber Zeiger für übermässigen Nährstoffeintrag.

auch um die Abschätzung künftiger Entwicklungen.

Trotz grosser Schwierigkeiten (prinzipielle Unmöglichkeit der Voraussage bei komplexen Systemen) ist dies erforderlich. Um dieses Vorgehen auch finanziell tragen zu können, muss die Erfassung und Ermittlung von Emissionen in einer Genauigkeit ausgeführt werden, welche auch der Bedeutung einzelner Aspekte entspricht. So

sind beispielsweise die Stickstoffdioxid-Emissionen der Hausfeuerungen geschätzt. Trotz ihrer grossen Zahl entspricht ihr Anteil an den  $\text{NO}_x$ -Emissionen nur 5 %. Die Emissionen grosser Industriebetriebe werden hingegen mit aufwendigen Messungen ermittelt. Bei den Emissionen des Verkehrs ist man auf eine Kombination von Schätzung und Messung angewiesen. Trotz des hohen Verkehrsanteils an den  $\text{NO}_x$ -

Emissionen ist dieses Verfahren wegen der grossen Anzahl von Fahrzeugen erforderlich. Damit wird eine langfristige Überwachung mit einem Vergleich des Ist- und Sollzustandes notwendig.

Die Ziele der Luftreinhalteverordnung können voraussichtlich nicht termingerecht erreicht werden. Ob es überhaupt gelingen wird, die Ozongrenzwerte auf ein für die Pflanzen, Tiere und Menschen verträgliches Mass zu reduzieren, bleibt vorderhand offen.

Bis heute wird das Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ ) trotz seiner Bedeutung als Treibhausgas nicht als Schadstoff eingestuft. Die möglichen Gefahren, die durch eine Anreicherung von Treibhausgasen in der Atmosphäre verursacht werden können, sind in Wissenschaftskreisen zumeist anerkannt. Es muss deshalb auf allen Ebenen eine deutliche Reduktion der Emissionen dieses Stoffes gefordert werden. Nach Meinung der zuständigen Bundesstellen sollen Lenkungsabgaben als Instrumente eingesetzt werden. Trotz übereinstimmender

Ansichten vieler Entscheidungsträger ist es bis heute nicht gelungen, ökonomische Instrumente in der Schweiz zu etablieren. Da ein enger Zusammenhang zwischen dem Energieverbrauch einerseits und den Schadstoffemissionen andererseits besteht, ermöglicht eine Reduktion der  $\text{CO}_2$ -Emissionen in Zukunft positive Impulse für die Reduktion der übrigen Schadstofffrachten.

Die Bereitschaft, Luftreinhaltemassnahmen mitzutragen, ist im heutigen Zeitpunkt weder auf politischer Ebene noch bei der Bevölkerung in genügendem Masse vorhanden. Die klassischen Lösungsansätze via polizeirechtliche Massnahmen müssen grundsätzlich überprüft und neue Strategien, beispielsweise auf der Ebene konsensfähiger Vereinbarungen, müssen vorangetrieben werden. Da die technisch orientierten Massnahmen zur Schadstoffreduktion weitgehend ausgeschöpft sind, können künftig weitere Verbesserungen nur noch durch veränderte Verhaltensweisen erzielt werden.