

**Zeitschrift:** Schweizer Ingenieur und Architekt  
**Herausgeber:** Verlags-AG der akademischen technischen Vereine  
**Band:** 107 (1989)  
**Heft:** 49

**Artikel:** Forschung in Umwelt- und Systemanalyse: Forschungsarbeiten an einem neu gegründeten Labor des Paul Scherrer Institutes  
**Autor:** Gassmann, F. / Graber, W. / Kypreos, S.  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-77220>

### **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:** 10.07.2025

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

- 1000 m<sup>3</sup> Luft (entspricht 1000 m Luftsäule über 1 m<sup>2</sup>)
- 1000 l Wasser (entspricht Jahresniederschlag pro 1 m<sup>2</sup>)
- 1000 kg Boden (entspricht 0,5 m Bodenschicht pro 1 m<sup>2</sup>)

Es ist natürlich wichtig, auf welche Weise die Elektrizität erzeugt wird. Deshalb werden drei Varianten betrachtet:

V 1: Blockkraftwerk mit Gasdieselmotor mit Katalysator

V 2: Erdgaskraftwerk

V 3: 60% aus Wasserkraft, 40% aus Kernenergie, wie es der gegenwärtigen schweizerischen Situation entspricht.

Die Resultate sind in Tabelle 3 zusammengestellt, wobei die Anzahl der nacheinander zu verwendenden Lampen bei allen Typen so gewählt wurde, dass sich eine totale Betriebsdauer von 8000 Stunden ergibt. Energiesparlampen sind energetisch bei jeder Variante sehr vorteilhaft, da ERZ viel kleiner als die Betriebsdauer von 8000 Stunden ist. Die Erhöhung von ERZ bei Variante V 3 beruht auf dem Einfluss der höhe-

ren investierten Energie bei Kern- und Wasserkraftanlagen im Vergleich zu fossilen Kraftwerken; die Auswirkung auf ERZ ist aber offensichtlich gering.

Bei der Elektrizitätserzeugung aus fossilen Brennstoffen (Variante V 1 und V 2) ergeben sich die Energiesparlampen nach unseren Beispiellannahmen als auch ökologisch sehr sinnvoll; bei der gegenwärtigen, sehr emissionsarmen schweizerischen Erzeugung (Variante V 3) ist der ökologische Erntefaktor (Betriebsdauer 8000 Stunden geteilt durch ORZ) zwar geringer, aber immer noch grösser als 3.

### Schlussbemerkung

Es sei nochmals betont, dass diese Beispiele nur demonstrieren sollen, zu welcher Art von Folgerungen derartige Betrachtungen führen können; beim heutigen Stand der Arbeit sind die Zahlen selbst aber noch sehr unsicher.

Die Erarbeitung der für die verlässliche ORZ-Ermittlung erforderlichen Me-

Umgearbeitete Fassung eines Vortrags am Symposium: «Umwelttechnik in der Schweiz» an der Industriemesse Hannover vom 10. April 1989

thoden und Kenntnisse ist eine grosse und wichtige wissenschaftlich-technische Herausforderung, denn sie hilft, ökologische Irrwege in Technik oder Politik zu vermeiden, Schwachstellen zu erkennen und den Kunden durch verständliche Information zu umweltgerechterem Verhalten einzuladen. Als Nebeneffekt wird sie dazu beitragen, dass jeweils bei Einzelentscheiden in der Umwelttechnik der ganze Zyklus, das ganze «System Umwelt» mitbedacht wird, dass also das notwendige ganzheitliche und vernetzte Denken gefördert wird.

Adresse der Verfasser: Dr. P. Suter, Professor für Energiesysteme, und P. Hofstetter, dipl. Ing., Laboratorium für Energiesysteme, ETH-Zentrum, 8092 Zürich.

## Forschung in Umwelt- und Systemanalyse

Forschungsarbeiten an einem neu gegründeten Labor des Paul Scherrer Institutes

**Bei der Zusammenlegung der ehemaligen Institute EIR und SIN zum Paul Scherrer Institut (PSI) seit dem 1.1.88 wurde vermehrt Gewicht auf umweltbezogene Forschungsarbeiten gelegt, die zum grössten Teil im expandierenden Labor für Umwelt- und Systemanalyse zusammengefasst wurden. Die hier behandelten Forschungsschwerpunkte sind die Ausbreitung und Umwandlung von Luftschadstoffen, die Untersuchung komplexer Systeme, die Analyse von Messdaten sowie die Berücksichtigung von Umwelt-Folgekosten im Spannungsfeld Energie-Ökonomie. Im folgenden seien zwei kürzlich durchgeführte Arbeiten beschrieben.**

### Einfluss des Geländes auf Windfelder und Schadstofftransport

#### Entwicklung der quantitativen Meteorologie

Die Geschichte der quantitativen Meteorologie begann erst in den sechziger Jahren mit dem Aufkommen einiger-massen schneller Rechenmaschinen, die auch ansehnliche Speicherkapazitäten zur Verfügung stellen konnten. Erstmals in der Geschichte der Menschheit konnten die Jahrtausende

alten Versuche, die Wetter- und Klimaentwicklung vorherzusagen, auf einer exakten Basis aufgebaut werden, was einen wesentlichen Schritt von den

VON F. GASSMANN,  
W. GRABER UND  
S. KYPREOS,  
VILLIGEN-PSI

stark subjektiv gefärbten Wetterregeln zu einer objektiven Prognose darstellte. Es ist klar, dass die ersten brauchbaren Computerprogramme aus Gründen der

Rechengeschwindigkeit und Speichergrösse auf sehr weitmaschigen Gittern basierten, die keine Beschreibung der Geländeform zulassen. In den siebziger Jahren begannen sich aber ganz andere Fragestellungen in den Vordergrund zu schieben. Wetter und Klima wurden immer stärker als durch menschliche Aktivitäten beeinflusst verstanden, so dass die passive Beobachtung des Geschehens allmählich der Erkenntnis einer aktiven Veränderung des Systems durch den Menschen Platz machen musste. Gleichzeitig zu dieser Entwicklung wurde auch ein fundamentaler Durchbruch auf theoretischem Gebiet erzielt, indem erkannt wurde, dass die in den physikalischen Grundgleichungen zur Beschreibung atmosphärischer Strömungen enthaltenen Nichtlinearitäten bewirken, dass sich kleine Veränderungen des Strömungsfeldes innerhalb weniger Tage zu wesentlichen Effekten in einem viel grösseren Massstab aufschaukeln können. Dank der Einführung einer neuen Generation von schnellen Vektorrechnern mit enormen Speicherkapazitäten konnte dieses sogenannte Fehlerwachstum auch direkt simuliert werden. Damit setzte sich die Erkenntnis endgültig durch, dass auch grossräumige Phänomene, wie beispielsweise Hoch- oder



Tiefdruckgebiete, ihre Wurzeln in kleinen Skalenbereichen haben können, die massiver Beeinflussung durch menschliche Aktivitäten unterworfen sind. Ähnlich wie in der Kosmologie den Elementarteilchen fundamentale Bedeutung zukommt, sind auch in der Atmosphärenphysik die Vorgänge im makroskaligen Bereich eng mit Prozessen im mikroskaligen Bereich verknüpft. Dadurch wird verständlich, weshalb sich in den achtziger Jahren das wissenschaftliche Interesse immer intensiver auch kleinräumigen Phänomenen zuwandte.

### Die Messkampagne Holla

Die Messkampagne Holla (Hochdrucklagen im Gebiete der Lägeren) wurde im Sommer 1988 mit dem Ziel durchgeführt, die Kopplung von regionalen Windfeldern mit der Spurengasverfrachtung zu untersuchen. Das umfangreiche Instrumentarium wurde während Hochdrucklagen eingesetzt, weil dann die photochemischen Prozesse besonders ausgeprägt sind und zu Ozonkonzentrationen innerhalb der planetaren Grenzschicht (bodennahe Luftschicht bis in etwa 1000–1500 m Höhe) führen, die akute Schäden bei Pflanzen und deutlich feststellbare akute Veränderungen beim Menschen hervorbringen. Das im Bild 1 wiedergegebene Versuchsfeld enthält als bedeutende Quellen für die Primärschadstoffe Stickstoffmonoxid und Kohlenwasserstoffe die Agglomerationen Zürich und Baden-Wettingen, den Flughafen Zürich-Kloten sowie die Autobahn N1. Als bedeutende Relief-Merkmale spielen die Lägeren (860 m über Meer), der Heitersberg (780 m) und der Altenberg (630 m), die das Limmat- und Furttal (etwa 400 m) begrenzen, eine wesentliche Rolle für die Ausprägung lokaler und regionaler Eigenheiten des Windfeldes. Um der Grösse dieses Beobachtungsfeldes gerecht zu werden und auch in der Vertikalen genügend Information zu erhalten, wurden sehr unterschiedliche Messsysteme verschiedener wissenschaftlicher Gruppierungen aus dem Hochschulbereich sowie aus Einrichtungen des Kantons Zürich, des Flughafens und des Bundes herangezogen:

Mit 16 Bodenstationen, im gesamten Gebiet verteilt, wurden die bodennahe Windrichtungen und Windgeschwindigkeiten, Temperaturen und Feuchtigkeiten registriert. Diese «Bodenstationen» standen meist an exponierten Orten wie hervorragenden Hochhäusern (Altstetten, Spreitenbach, Regensdorf), unbewaldeten Hügeln und Aussichtstürmen (z.B. Üetliberg, Baldegg). Die Messgeräte selbst wurden auf etwa 14 m hohen Masten

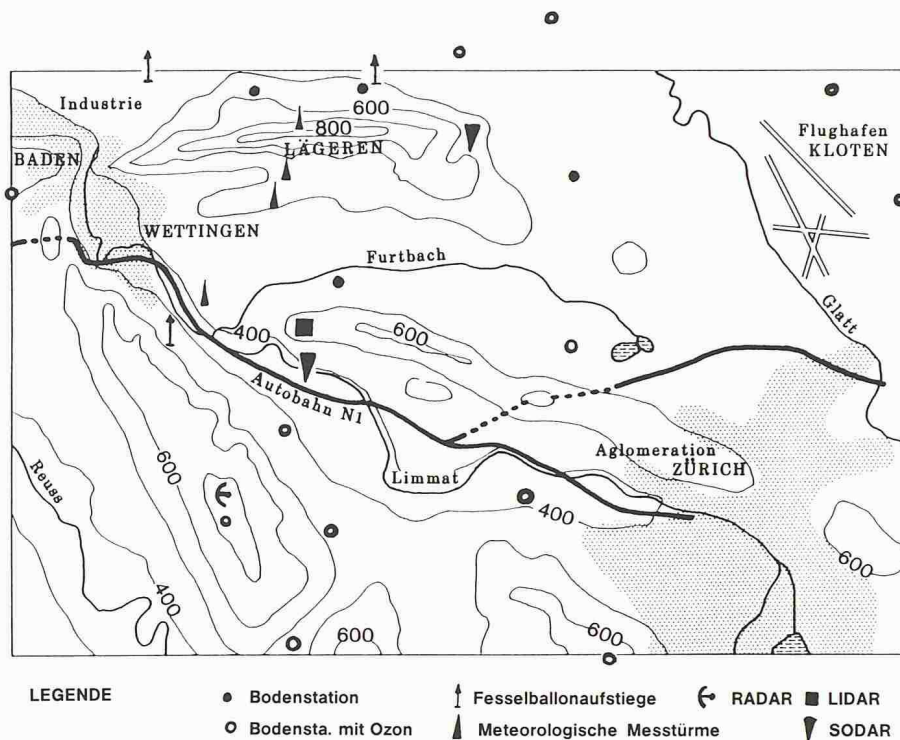


Bild 1. Untersuchungsraum der Messkampagne Holla im Sommer 1988 mit eingezeichneten Höhenlinien sowie Einsatzorten der verschiedenen Messsysteme

befestigt. Weiter standen 3 Fesselballonsysteme zur Verfügung, die die gleichen Grössen bis in eine Höhe von etwa 1000 m registrierten, indem Sonden an zeppelinförmigen Fesselballonen ihre Daten zu den Empfangsanlagen am Boden funkten. Zwei akustische Echosondiersysteme (sogenannte «Sodar») dienten ebenfalls der Bestimmung von Windgeschwindigkeit und -richtung bis in eine Höhe von etwa 700 m: Bei diesen Systemen werden akustische Signale in drei Richtungen schräg nach oben abgestrahlt und deren aus verschiedenen Entfernungen von den Luftpaketen zurückgestrahlten «Echos» mit hochempfindlichen Mikrophonen empfangen; aus diesen Signalen lässt sich die Windgeschwindigkeit in allen drei Richtungen und allen Höhen ableiten. Eine weitere Messmethode stand in Form eines ehemaligen Flugzeugverfolgungsraders des Militärs zur Verfügung, das zur automatischen Verfolgung von Schwebballonen umgebaut wurde: Schwebballone wurden mit einer sehr genauen Menge Helium gefüllt, so dass sie in einer gewünschten Höhe im Gleichgewicht schwebten. Werden solche Ballons mit einem grösseren Trägerballon in ihre Flughöhe gehoben und dort freigegeben, so folgen sie anschliessend dem Wind in dieser Höhe. Mit dem Radar lässt sich ihre «Reiseroute» und damit die örtliche Strömung genau festhalten.

Die während der Verfrachtung ablaufenden chemischen Reaktionen, die stark von der Temperatur und vom eingestrahlt Licht abhängen, können in

ihrer ganzen Komplexität nur mathematisch nachgebildet werden. Um diese Berechnungen sicherzustellen, ist zu deren Stützung die Messung möglichst vieler Spurengase notwendig, vornehmlich des Ozons selbst. Zu diesem Zweck wurden 12 der 16 Bodenstationen zusätzlich mit Ozonmessgeräten ausgerüstet, ebenso trugen die Fesselballone eine zweite Sonde zur Bestimmung des Ozons bis in 1000 m Höhe. Da es sich bei der Bildung von Ozon um einen weiträumigen Prozess handelt, interessiert vor allem die grossräumige Ozonverteilung, die sich nur mit Flugzeugmessungen realistisch beobachten lässt. Zu diesem Zweck flog ein mit Turbulenz- und Ozonmessgeräten ausgerüsteter Motorsegler mehrmals täglich in verschiedenen Höhen je einen Nord-Süd- und einen Ost-West-Transsekt von etwa 200 km Ausdehnung. An zentraler Stelle stand zudem ein sogenanntes LIDAR, bei dem mittels Rückstreuung von Laserlicht die Absorption von Ozon und damit dessen Konzentration in allen Richtungen und bis zu einer Entfernung von 7 km bestimmt werden konnte.

Nebst diesen speziell für die Messkampagne Holla bereitgestellten Instrumenten stellten eine Reihe von routinemässig betriebenen Stationsmessnetzen ihre Daten zur Verfügung: Das automatische meteorologische Netz, die Luftüberwachungsanlagen von Kanton und Bund sowie die Flughafenanlagen. Regelmässige Auswertungen von speziellen Satellitenbildern brachten Informationen über die Bodentemperaturver-



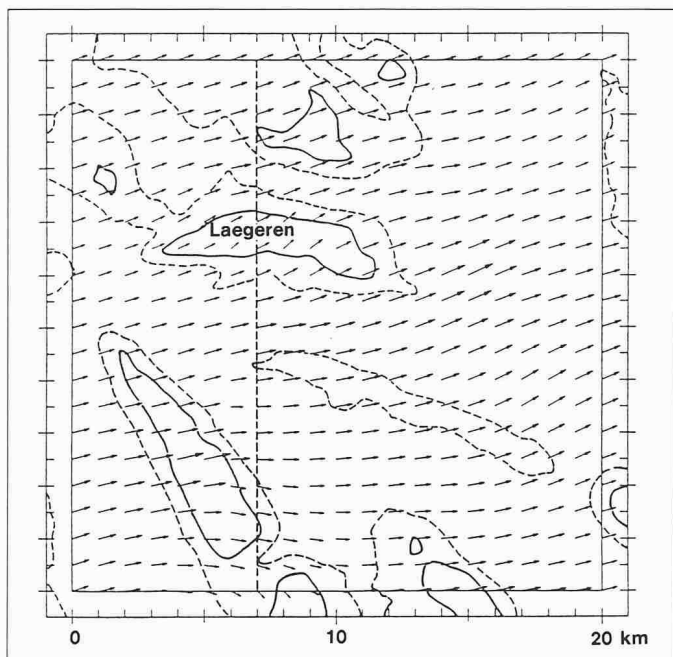


Bild 2. Interpoliertes, divergenzfreies Horizontalwindfeld 30 m über Grund für den 5.9.88, 14-15 Uhr. Das 20×20 km umfassende Messfeld wurde mit einem 100×100 m-Raster überlagert. Die eingezeichneten Höhenlinien (600 m ü. Meer ausgezogen, 500 m ü. Meer gestrichelt) dienen als Orientierungshilfe. Deutlich erkennbar ist die Drehung und Abschwächung der Windvektoren im Bereiche der Lägeren oberhalb der Bildmitte. Der längste Pfeil entspricht einer Windgeschwindigkeit von 5,3 m/s, der kürzeste von 1,9 m/s. Die gestrichelte Linie gibt die Lage der für das Bild 3 verwendeten Schnittebene an

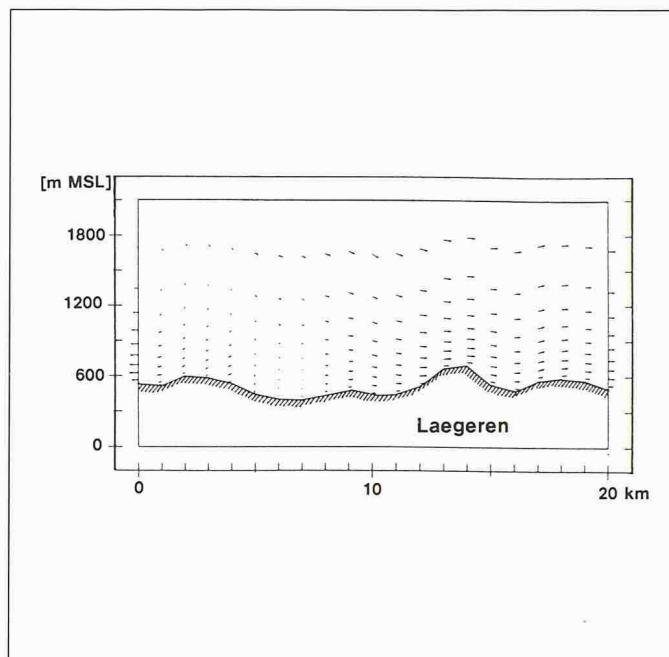


Bild 3. Vertikalschnitt durch das im Bild 2 dargestellte Windfeld (der Nordrand ist rechts, die Skalierung der Windvektorkomponenten ist gleich wie im Bild 2). Über dem Limmattal und Furttal absinkende Luftmassen entsprechen den Divergenzen im Horizontalwindfeld und sind konsistent mit einem Ausströmen von Luft aus dem Untersuchungsgebiet nach Norden und nach Süden. Zur Verdeutlichung der Orographie wurde die Abbildung zweifach überhöht gezeichnet; die Vertikalkomponenten der Windvektoren wurden gegenüber den Horizontalkomponenten jedoch nicht gestreckt

hältnisse. Speziell seien noch die meteorologischen Türme an der Lägeren hervorgehoben, die für das Nationalfondsprojekt «Waldschäden und Luftverschmutzung in der Schweiz» aufgebaut wurden: Zur Messung eines Profils von Luftschadstoffen und Windverhältnissen standen vom Lägerenkamm bis ins Limmattal bei Würenlos in Höhenabstufungen von je etwa 200 m insgesamt vier Messtürme von je 30 bis 70 m Höhe zur Verfügung.

### Beeinflussung des Windfeldes durch das Gelände

Aus der insgesamt 12 Tage umfassenden Messreihe liegt eine erste Momentaufnahme des Windfeldes vom 5. September 1988 zwischen 14 und 15 Uhr vor. Das im Bild 2 dargestellte Windfeld für eine Höhe von 30 m über Grund wurde in mehreren aufeinanderfolgenden Schritten aus den für dieses Zeitintervall vorhandenen Messwerten erhalten. Zuerst wurden die in verschiedener Höhe erhobenen Windrichtungen und -geschwindigkeiten 10 geländefolgenden Schichten zugeordnet. Die mit zunehmender Höhe über Grund immer spärlicher werdenden Messdaten wurden durch ein Interpolationsverfahren in jeder Höhengschicht

zu einem engmaschigen Vektorfeld mit einer horizontalen Auflösung von 100 m ergänzt. Es ist klar, dass bei diesem Verfahren, das aus einer kleinen Anzahl von 4 bis 16 Messwerten für das 20×20 km umfassende Untersuchungsgebiet für jede Höhengschicht rund 400 Werte erarbeiten muss, ein vorerst physikalisch nicht korrektes Windfeld entstehen kann. Aus diesem Grunde wurde dieses primäre Windfeld mit Hilfe eines mathematischen Verfahrens, das die Geländeform mitberücksichtigt, divergenzfrei gemacht. Dadurch entstand ein engmaschiges, dreidimensionales Windfeld, das sowohl mit den Messdaten wie auch mit dem physikalischen Grundgesetz der Massenerhaltung konsistent ist und als gutes Abbild des wirklichen über das betrachtete Zeitintervall von einer Stunde gemittelten Windfeldes gelten kann. Das im Bild 2 dargestellte Ergebnis zeigt, dass die Geländeform deutliche Spuren hinterlässt, indem die Windrichtungen um rund 45° um die mittlere Windrichtung Südwest-West schwanken und die Windstärken zwischen 1,9 und 5,3 m/s variieren. Das Bild 3 zeigt einen Nord-Süd-Vertikalschnitt durch das Windfeld. Die verwendeten 10 Schichten haben mit zunehmender Höhe immer

grössere Abstände voneinander und verlieren mehr und mehr die Form des Geländes, bis schliesslich das oberste, genau horizontal liegende Niveau erreicht wird. Bedingt durch Divergenzen des Horizontalwindfeldes, ergab sich durch die oben erwähnten Berechnungen ein Absinken von Luftmassen über dem Limmatt- und Furttal. Das damit verknüpfte Ausströmen von Luft aus dem Untersuchungsgebiet nach Norden und nach Süden ist deutlich erkennbar.

### Transport von Luftschadstoffen

Der Zusammenhang zwischen Emissionen und den an verschiedenen Stellen gemessenen Immissionen wird nicht allein durch das mittlere Windfeld gegeben. Darüber hinaus spielen die turbulente Diffusion sowie die während des Transportes ablaufenden chemischen Umwandlungsprozesse eine wichtige Rolle und komplizieren den Zusammenhang zwischen Emissionen und Immissionen auf undurchsichtige Art und Weise. Ein konsistentes Gesamtbild der innerhalb des Untersuchungsgebietes ablaufenden Prozesse kann deshalb nur durch eine Simulationsrechnung erhalten werden, die bis heute den Rahmen der Möglichkeiten sprengt.



Als Beispiel sei der mit Hilfe einer Fesselballonsonde gemessene Ozon-Konzentrationsverlauf über drei Sommertage in verschiedenen Höhen über Neuenhof bei Baden als «Ozon-Gebirge» veranschaulicht. Aus dem Bild 4 ist ersichtlich, dass die Ozonkonzentrationen in Bodennähe jeweils am Nachmittag ihr Maximum aufweisen, während sie am Morgen fast verschwinden. Im Gegensatz dazu erscheint in der 500 m über Grund liegenden Luftschicht die Maximalkonzentration etwa um Mitternacht, und die morgendlichen Minima sind immer noch recht hoch. Auf einfache Art und Weise können nur die Morgenminima in Bodennähe erklärt werden, die die Umwandlung von Ozon in Stickstoffdioxid widerspiegeln, die durch die Stickstoffmonoxidemissionen des Morgenverkehrs verursacht wird. Der Mittags- und Abendverkehr führt hingegen zu keinen solchen Minima, weil zu diesem Zeitpunkt im Gegensatz zum Morgen die bodennahe Luftschicht instabil ist und daher Emissionen rasch vertikal transportiert und verdünnt werden.

### Anwendung der Messresultate

Die 12 Tage in hoher zeitlicher und räumlicher Auflösung umfassende Messreihe repräsentiert einen einmaligen Datensatz, der für verschiedene Zwecke unentbehrlich sein wird:

- Die Windfelder werden als Testfälle für mathematische Modelle der planetaren Grenzschicht verschiedenen Forschergruppen dienen und so der Modellentwicklung und -validierung einen wesentlichen Schritt weiterhelfen.
- Die detaillierte Kenntnis der Konzentrationsverläufe verschiedener Spurengase (Ozon, Stickoxide, Kohlenwasserstoffe, Ammoniak, Schwefeldioxid) wird der Entwicklung luftchemischer Modelle wichtige Impulse verleihen und ebenfalls einen herausfordernden Testfall darstellen.
- Die um das an der Lägeren gelegene Hauptversuchsfeld des nationalen Forschungsprogrammes «Waldschäden und Luftverschmutzung in der Schweiz» herum durchgeführte Messkampagne wird einen wesentlichen Beitrag zur Einbettung der Versuchsfläche in die grössere Umgebung des schweizerischen Mittellandes leisten.

Darüber hinaus werden die Messergebnisse wertvolle Dienste leisten bei der Definition des regionalen Klimaprojektes im Hochrhein-Oberrhein-Gebiet, das Anfang 1990 anlaufen wird und über insgesamt 8 Jahre grosse Teile des Forschungspotentials der oberrheini-

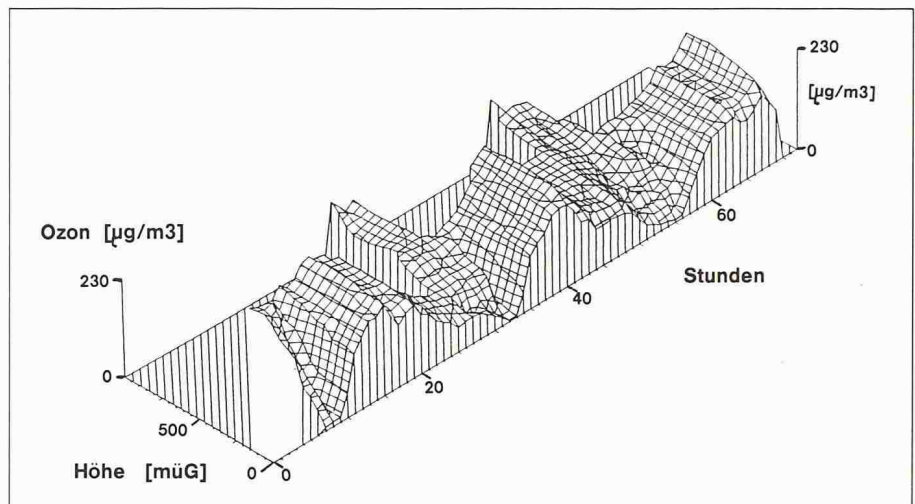


Bild 4. Verlauf der Ozonkonzentration in verschiedenen Höhen über Neuenhof (bei Baden) zwischen 21.7. und 23.7. 1988

- Vertikale Achse: Ozonkonzentration (Maximum 116 ppb = 230 µg/m³)
- nach links hinten laufende Achse: Höhe bis 1000 m über Grund
- nach rechts hinten laufende Achse: Zeit in Stunden, beginnend am 21.7.88, 0 Uhr

schen Universitäten Basel, Freiburg, Mulhouse, Strasbourg und Karlsruhe sowie des PSI auf das regionale Klimasystem im südlichen Oberrheingraben konzentrieren wird.

### Energieverbrauch, Luftschadstoffe und Ökonomie

Im Rahmen des IEA/ETSAP-Projektes (International Energy Agency - Energy Technology Systems Analysis Project) durchgeführte Untersuchungen haben erste Resultate gebracht. Die mit Hilfe eines am PSI entwickelten Energienachfragemodells SMEDE (Simulation Model for Energy Demand) sowie eines IEA-Modells für die Kostenoptimierung Markal (Market Allocation) erhaltenen Resultate zeigen, dass die Reduktion der gesamten Schwefeldioxid- und Stickoxidemissionen der Schweiz auf das Niveau von 1950 bzw. 1960 bis zum Jahr 2005 möglich ist, falls einige über das Luftreinhaltekonzept hinausgehende Massnahmen durchgesetzt werden. Um eine signifikante Reduktion der Kohlendioxidemissionen erreichen zu können, müssten jedoch drastische Veränderungen in der schweizerischen Energielandschaft realisiert werden.

### Untersuchte Szenarien

Als Basis für die Untersuchungen wurde ein Referenzfall definiert. Die wichtigsten der darin enthaltenen Annahmen für den Zeitraum 1985-2025 sind:

- eine jährliche Bevölkerungszunahme (inklusive Einwanderung) von 0,1%

- eine eher optimistische jährliche Zunahme des Bruttosozialproduktes von 1,9% (etwa Verdoppelung des Bruttosozialproduktes bis zum Jahre 2025)
- eine Verstärkung des Anteils des Dienstleistungssektors von 57 auf 62% am Bruttosozialprodukt
- eine Zunahme der Preise für fossile Energieträger (exkl. Kohle), um etwa den Faktor 1,5-3 bis zum Jahr 2005. Nach diesem Zeitpunkt wurden die Energiepreise als konstant betrachtet, was im Gegensatz zu globalen Energieanalysen steht, die aufgrund einer beginnenden Verknappung der konventionellen fossilen Energieträger einen steilen Anstieg der Preise nach dem Jahr 2000 nahelegen.

Auf der Basis dieser Annahmen lieferte das Modell Markal das kostengünstigste Energiesystem. Die Kosten der in der Luftreinhalteverordnung festgelegten Massnahmen wurden dabei berücksichtigt. Als in Frage kommende Energietechnologien wurden dem Modell die folgenden Randbedingungen auferlegt:

- die Wasserkraft soll aus Gründen des Landschaftsschutzes nicht auf das technisch mögliche Maximum ausgebaut werden
- die Kernenergie und der Import von Erdgas dürfen zunehmen
- mässige Energiesteuern aufgrund eines neuen Energiegesetzes
- kein Import von elektrischer Energie.

Als Resultat der Optimierungsrechnung ergibt sich ein verstärkter Energieverbrauch vor allem im Passagier-



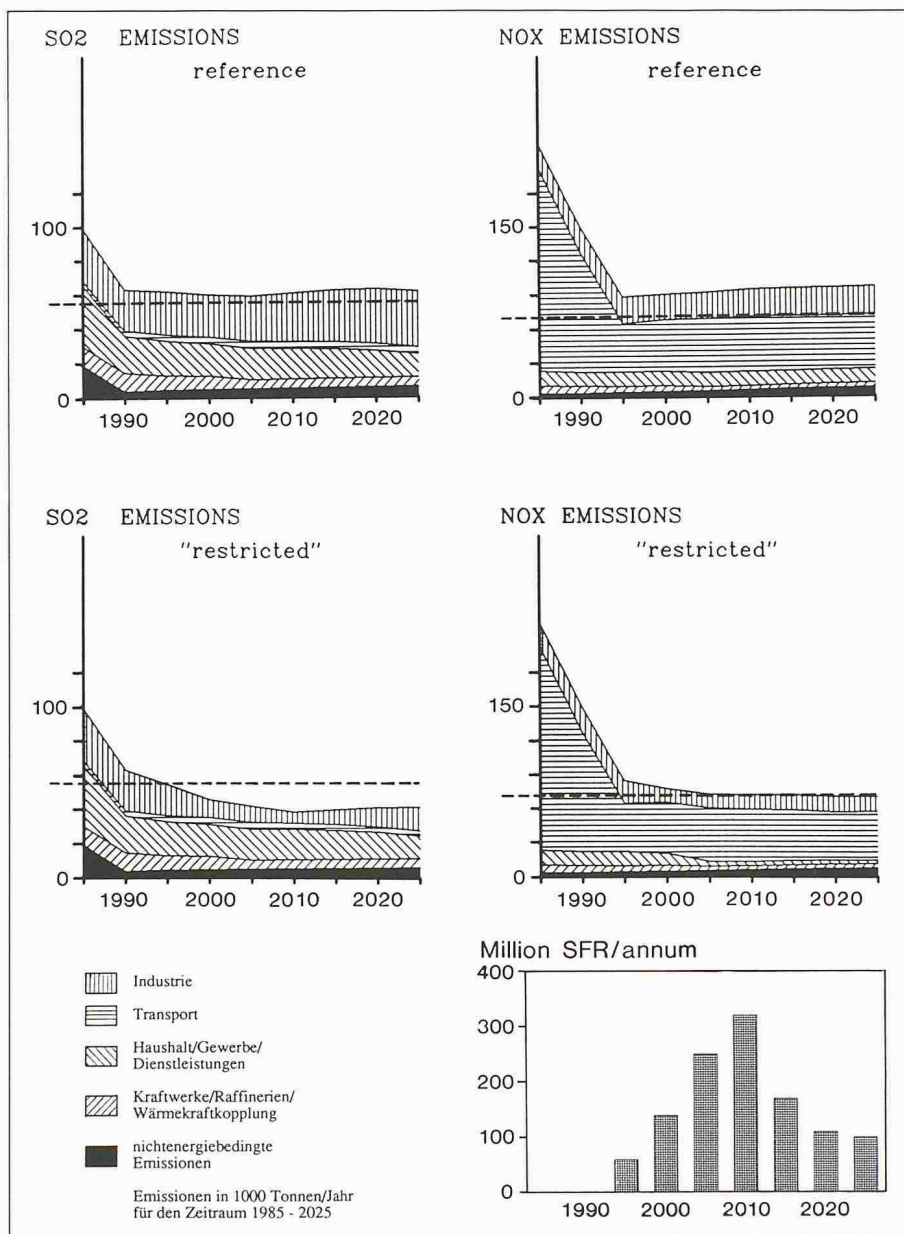


Bild 5. Schwefeldioxid(SO<sub>2</sub>)- und Stickoxid(NO<sub>x</sub>)-Emissionen für das Referenz-Szenario mit Berücksichtigung der in der Luftreinhalteverordnung verankerten Massnahmen. Die Zielwerte des Luftreinhaltekonzeptes (gestrichelte Linie) werden nicht erreicht (oben).

Szenario: «Begrenzte SO<sub>2</sub>- und NO<sub>x</sub>-Emissionen mit Erreichen der Zielwerte im Jahre 2005 und damit verbundene jährliche Kosten in Millionen Fr. Basis 1985 (unten).

Flugverkehr (Anstieg um 100% auf das Doppelte), in der Industrie (um 40%), sowie in Haushalt, Gewerbe und Dienstleistungen (um 15%). Der berechnete totale Energieverbrauch der Schweiz nimmt so aufgrund der Annahmen innerhalb der betrachteten 40 Jahre um 20% zu. Der Anteil der elektrischen Energie steigt innerhalb dieser Zeitperiode von 20% auf 27% der Gesamtenergie, was eine Zunahme des Elektrizitätsverbrauches um 55% bedeutet.

Zusätzlich zu diesem Referenzfall wurden je ein Szenario mit begrenzten Schwefeldioxid- und Stickoxid-

emissionen sowie begrenzten Kohlendioxidemissionen gerechnet, um die daraus folgenden Verlagerungen und Kosten im Energiesektor zu untersuchen.

### Begrenzte Schwefeldioxid- und Stickoxidemissionen

Die im Bild 5 wiedergegebenen Emissionen beim Referenzfall zeigen deutlich, dass durch die berücksichtigten Massnahmen der Luftreinhalteverordnung das gesteckte Ziel (höchstens 55 000 t/Jahr Schwefeldioxid - und 70 000 t/Jahr Stickoxidemissionen)

nicht erreicht werden kann. Es müssten dafür zusätzliche Massnahmen ergriffen werden, die mit durchschnittlichen jährlichen Kosten von gegen Fr. 200 Mio. (Basis 1985) im Zeitraum 1995-2025 zu bewältigen wären (vgl. Bild 5).

Mehrere Rechnungen haben gezeigt, dass die Schwefeldioxidemissionen ohne wesentliche Kostenfolgen auf rund 40 000 t/Jahr reduziert werden können, ohne den Schwefelgehalt im Heizöl EL unter 0,2% zu senken. Dies rührt zum Teil daher, dass bei der Reduktion der Stickoxidemissionen als Nebeneffekt gleichzeitig auch die Schwefeldioxidemissionen abgesenkt werden. Dies bedeutet, dass der Aufwand von Fr. 8-10 (Basis 1985) pro kg vermiedene Stickoxide indirekt auch zur Reduktion von Schwefeldioxid beiträgt. Die über die Luftreinhalteverordnung hinausgehenden Massnahmen, die zum besprochenen Resultat führen, sind:

- Gas-Keramikk Brenner, stickoxidarme Brenner, Wirbelschichtfeuerung und Denox-Systeme in der Industrie.
- Gas-Keramikk Brenner und Füllmann-Brenner in Haushalten und Gewerbe sowie Fernheizsysteme.
- Verbesserte Wirkungsgrade von Dieselfahrzeugen sowie der Einsatz von Methanol als Treibstoff für Lastwagen und Autobusse im Verkehrssektor.

### Begrenzte Kohlendioxid-emissionen

Kohlendioxid ist langfristig der potentiell gefährlichste Luftschadstoff. Die rund zur Hälfte durch dessen Anstieg in der Erdatmosphäre verursachte weltweite Erwärmung dürfte ab etwa dem Jahr 2030 zu Klimaveränderungen führen, die noch nicht im Detail überschaubare Auswirkungen auf die globale Lebensmittel- und Sicherheitssituation haben werden. Obwohl einer Verzögerung und Abschwächung der Klimaverschiebung höchste Priorität zukäme, wird das Problem nur zögernd oder gar nicht in Angriff genommen, weil damit einschneidende Massnahmen und grundlegende Veränderungen im Energiesektor verbunden wären. Erste Rechnungen mit Markal zeigen denn auch, dass eine Reduktion der Kohlendioxidemissionen um 33% unter die Emissionen im Referenz-Szenario nur mit der Durchsetzung strenger Sparmassnahmen und einem hohen Anteil an Kernenergie, Gas und erneuerbaren Energien zu erreichen wäre. Weiter wird ersichtlich, dass sich mit einer blossen Verlagerung von Heizöl



**Verdankungen**

Für die kooperative Mitarbeit, insbesondere im Rahmen der Messkampagne Holla, sei allen Teilnehmern ein herzlicher Dank ausgesprochen. Die zu den Bildern 2 bis 4 führenden Auswertarbeiten wurden durch die Herren P. Kaufmann und M. Tinguely ausgeführt, wofür ihnen ein spezieller Dank gebührt.

auf Kernenergie und Gas bei deren Ausbau um den Faktor 2 bzw. 3 eine CO<sub>2</sub>-Entlastung von nur 13% bis zum Jahre 2025 erreichen liesse. Dies steht im Gegensatz zur Minimalforderung der Toronto-Konferenz von 1988, die besagt, dass die Industrienationen ihren Kohlendioxidausstoss bis zum Jahre 2005 um mindestens 20% (basierend auf den Emissionen des Jahres 1987) absenken müssten, um die globale Klimasituation merklich positiv zu beein-

flussen. Erst zusätzliche Energieeinsparungsmassnahmen würden es erlauben, dieses Ziel zu erreichen.

Adresse der Verfasser: F. Gassmann, Dr. sc. nat., W. Graber, Dr. sc. nat., und S. Kypreos, c/o Paul Scherrer Institut (PSI), 5232 Villigen-PSI.

## Begrünbare Böschungen

Statische Berechnung und Haftungsfragen – ein Erfahrungsbericht

**Randbedingungen**

Das zu beschreibende Objekt befindet sich an der Kreuzbuchstrasse in Luzern. Gefordert war eine Böschungs-

VON E. F. ROELEVELN,  
BAAR

sicherung mit definierter, stützender Funktion. Die Bauherrschaft (Tiefbauamt der Stadt Luzern) sah zunächst eine Stahlbetonkonstruktion vor. Spätere Projektänderungen mit Fahrbahnversmälnerungen schufen Platz für eine geneigte Böschungsmauer. Die exponierte Lage der Mauer machte auch eine rasche Begrünung wünschenswert. Als besondere Randbedingung sind die konvexen Kurvenradien von minimal 9,50 m (siehe Bild 1) zu erwähnen. Die maximale Mauerhöhe betrug 3,70 m. Besondere Anforderungen bezüglich Auflast bestanden nicht.

Ausgelöst wurde das Bauvorhaben durch die Sanierung der Kreuzbuchstrasse und der dortigen Haarnadelkurve, im Volksmund «Vallasterkurve» genannt.

Gewünscht war eine bestmögliche Erhaltung des Umgebungsgeländes beim bestehenden Einfamilienhaus und eine Verbesserung der Sichtverhältnisse.

### Ermittlung der Bodenkennwerte und der übrigen Randbedingungen

Als Grundlage für den statischen Nachweis (Computerberechnung und Pro-

duktoptimierung) sind Angaben erforderlich über

- Wandgeometrie
- Bodenkennziffern
- Nutzlasten.

Beim vorliegenden Objekt wurden die Werte gemäss Bild 2 ermittelt.

Zur vollständigen Ermittlung und Weiterleitung der Angaben standen spezielle Formulare des Lieferanten zur Verfügung.

**Statische Berechnung mittels EDV**

Die ermittelten Werte wurden einem Hersteller von verschiedenen begrünbaren Böschungssystemen (A. Tschümperlin AG, Baar ZH) für die Berechnung zur Verfügung gestellt.

Grundsätzlich werden geneigte, begrünbare Böschungsmauern nach den üblichen Regeln einer schräggestellten Schwergewichtsmauer berechnet. Die Betonelemente bilden zusammen mit der Erdfüllung das Mauergewicht, das dem Erddruck entgegensteht.

Mit Hilfe von PC-Programmen ist es heute möglich, rasch die Grösse und Lage der resultierenden Kräfte zu ermitteln und so die zulässige Stützhöhe zu bestimmen. Dabei können die verschiedenen Parameter wie Böschungseigung, Auflast usw. berücksichtigt werden.

Der statische Nachweis der Gleit- und Grundbruchsicherheit nach VSS für die Fundamente kann ebenfalls mit EDV durchgeführt werden. Die angenommenen Dimensionen der Fundamente

werden so lange korrigiert und der Nachweis so lange durchgeführt, bis die erforderliche Sicherheit vorhanden und die Abmessungen der Fundamente optimal sind (Breite, Höhe, Neigung der Sohle usw.).

In unserem Fall stand für die Berechnung ein Personal-Computer IBM S/2 zur Verfügung. Die erforderliche Software, die alle produktespezifischen und statischen Möglichkeiten berücksichtigt, wurde vom Technischen Büro des Lieferanten selbst entwickelt.

**Produktoptimierung**

Aufgrund positiver Praxiserfahrung tendierte die Bauherrschaft zunächst auf den Einsatz von Löffelsteinen, da in der Nähe der «Vallasterkurve» einwandfrei überwachsene Referenzobjekte vorhanden waren. Die Resultate der Berechnungen ergaben, dass mit «Normal»-Löffelsteinen bei Einhaltung der vorgeschriebenen Kippsicherheit (min. 1,5) die maximale Höhe nur 3,50 m beträgt.

Aus Sicherheitsgründen wurde deshalb vom Lieferanten der seit kurzem auf dem Markt befindliche neue BIG-LÖFFEL empfohlen (vgl. Bild 3). Bei dieser Lösung handelt es sich um einen Löffelstein im Grossformat, der die gleichen Eigenschaften wie der herkömmliche Löffelstein aufweist. Zur Auswahl stehen 2 kombinierbare Grundelemente; der Normalstein (Baulänge BL 60 cm) und der Spezialstein (BL 100 cm). Beide werden betongrau oder erdbrun produziert.

Im vorliegenden Fall genügte der Einsatz der Normalsteine. In Kombination sind je nach Reibungswinkel und Gelände Mauerhöhen bis 8 m möglich.

Als Entscheidungsgrundlage standen der Computerausdruck der Ergebnisse