

Peter SCHUHMACHER, Anita DALL'O und Martin HÖLZLE, Zürich

## Windfeldverhältnisse in der Stadt Basel: Analyse und Anwendung in der numerischen Immissionsmodellierung

### 1. Einleitung

Mit der Ausdehnung und Verdichtung des Siedlungsraumes nehmen auch die lufthygienischen Belastungen zu. Das Immissionsbild ist dabei nicht allein von den Emissionsstrukturen abhängig, sondern auch von den lokalen Klimateigenschaften.

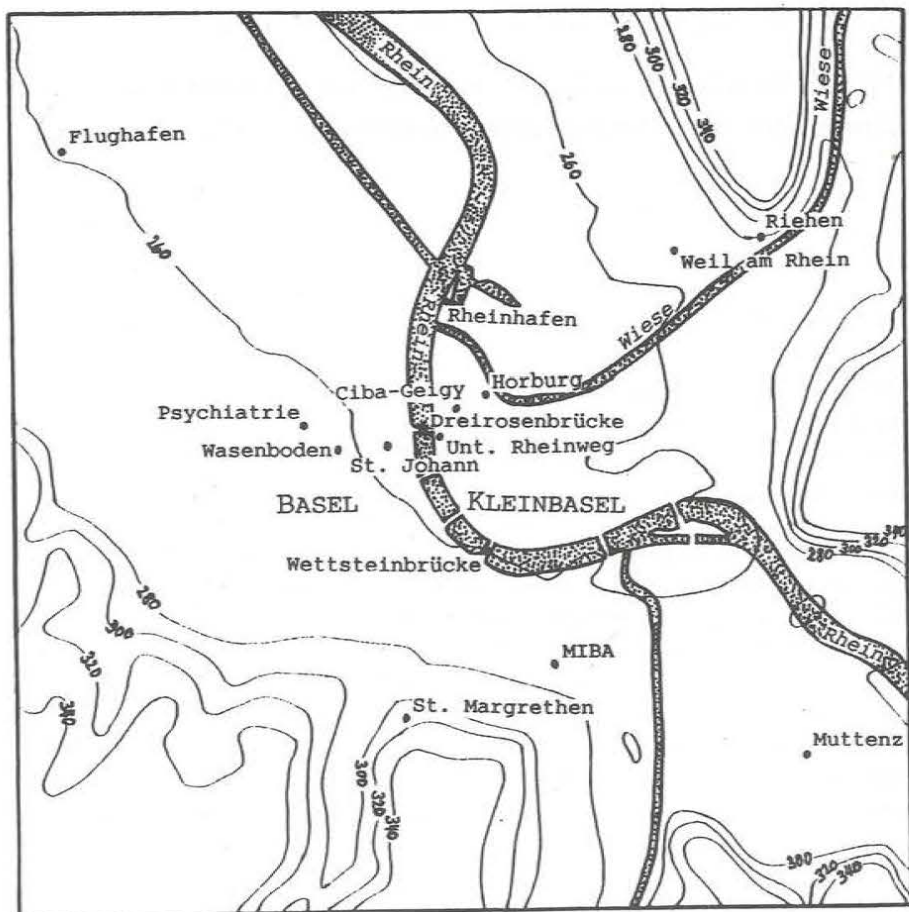
Vor der Umsetzung von raumwirksamen Vorhaben wird in der Regel untersucht, inwieweit sie zu einer Verbesserung der lufthygienischen Situation beitragen. Dies bedingt detaillierte Klimakenntnisse sowie geeignete, numerische Modelle, um die verschiedenen Phänomene abbilden zu können. Die Modellierung umfaßt dabei das Windfeldverhalten und die Immissionen, die sich aus dem Schadstofftransport ergeben. Das Ergebnis kann mit den Immissionsmessungen an einzelnen Punkten im Untersuchungsgebiet verglichen werden. Bei guter Übereinstimmung kann das Modellergebnis als räumliche Interpolation des Immissions-Zustandes verwendet werden. Ferner verfügt man über ein Arbeitsinstrument, um die Auswirkung von möglichen Entwicklungsszenarien abzuschätzen.

### 2. Untersuchungsgebiet

#### 2.1 Geographie

Das Untersuchungsgebiet umfaßt die Stadt Basel und deren nächste Umgebung (Abb. 1). Basel liegt an der Talmündung des in ost-westlicher Richtung verlaufenden Hochrheintales in den Oberrheingraben, welcher von Basel aus süd-nördlicher Richtung bis Frankfurt verläuft. Im Norden wird das Hochrheintal begrenzt durch den Schwarzwald und seine Vorhügel, im Süden durch den Jura, welcher auch die südliche Begrenzung des Oberrheingrabens bildet. Das Hoch-

Abb. 1: Das Untersuchungsgebiet  
 Eingetragen sind die Standorte der verwendeten Meßstationen (s. Kapitel 3). Der Kartenausschnitt ist durch die folgenden Eckkoordinaten (schweizerische Militärkoordinaten) festgelegt: (263000/606000) und (274000/617000).



rheintal und seine Seitentäler verbindet den Oberrheingraben mit dem schweizerischen Mittelland und stellt somit ein Ausgleichskanal zwischen den beiden Beckenlandschaften dar. Neben Schwarzwald und Jura prägen im Nordosten Basels als drittes Gebirge die Vogesen die Landschaft der weiteren Region Basel.

## 2.2 Klimatologie

Die Temperaturverhältnisse in der Region Basel sind vor allem durch die Orographie sowie durch die unterschiedliche Erwärmung von städtischem und

ländlichem Gebiet bestimmt. In Untersuchungen von BIDER et al. (1984) über die klimatischen Verhältnisse in der weiteren Basler Region zeigte sich, daß von Hangwinden beeinflusste Zonen am Fuß der Gebirge, gefällreiche Täler ohne Kaltluftstau, Hang-, Plateau- und Gipfellagen besonders wärmebegünstigt sind. Dagegen weisen freie Lagen in einiger Entfernung von Gebirgen, flache Senken und Mulden sowie gefällsarme Hochtäler erheblich tiefere Temperaturen auf. Die Senken und Mulden sind kälter, da sich in ihnen die nächtliche Ausstrahlungskaltluft ansammeln kann. Gleiches gilt für die rheinnahe Zone. Die Wärmewirkung des Rheinstromes greift nach BIDER et al. (1984) nur auf die unmittelbare ufernahe Zone über und die relativ trockenen, wärmeren Talabwinde erreichen die Rheinzone im allgemeinen nicht mehr. Dadurch sind die Lagen in der freien Rheinebene und in Rheinnähe bis zu 1 Grad kälter als die günstigen Lagen an den Gebirgsrändern.

Wegen der stärkeren Erwärmung der überbauten Gebiete weisen die Städte in der Regel 0,8 bis 1,8 Grad höhere Temperaturen auf (BIDER et al. 1984). Auf diese Tatsache weist auch MOSER (1985) hin: „Die Stadt und Agglomeration Basel ist durch eine intensive Überwärmung und damit eine städtische Wärmeinsel gekennzeichnet“. Die Mittlere Jahrestemperatur in Basel beträgt zirka 10 Grad, auf dem Land hingegen etwa 8,8 bis 9,8 Grad Celsius.

Die Niederschlagsverhältnisse in der Region Basel sind vor allem durch die drei Gebirge Schwarzwald, Vogesen und Jura, die das Gebiet begrenzen, geprägt. Relativ trocken ist der zentrale Teil der Oberrheinischen Tiefebene. In Colmar beträgt das 30jährige Mittel wenig über 500 mm/Jahr, am Flughafen Mulhouse wenig über 700 mm/Jahr. Die Niederschlagsmengen steigen Richtung Schwarzwald im Osten bzw. Vogesen im Westen kontinuierlich an, um in deren Gipfelzonen durchschnittlich über 2000 mm/Jahr zu erreichen. Richtung Süden, das heißt gegen den Jura zu, steigen die Niederschlagsmengen weniger rasch an, obwohl der Jura ungefähr die gleiche Höhe erreicht wie Schwarzwald und Vogesen (SCHÜEPP 1982 b).

Die Windverhältnisse sind von der Synoptik und der Orographie abhängig. So findet man in der Region Basel eine Überlagerung der synoptischen Windrichtung und den verschiedenen Tal-Bergwind- sowie Hang-Wind-Systemen. Aus dem Zusammenwirken der verschiedenen Systeme ergibt sich ein komplexes Windverhalten, das lokal sehr unterschiedlich sein kann. Daß das lokale Windfeld in Basel sowohl räumlich, als auch zeitlich sehr differenziert sein kann, zeigen die Untersuchungen von SCHÜEPP (1982 a). SCHÜEPP beschreibt qualitativ die regionalen Strömungssysteme, wobei er die in Basel beobachteten Wettersituationen zu insgesamt 24 Gruppen zusammenfaßt.

Beim Bodenwindfeld in der Region Basel überwiegen im Herbst und im Winter Ostwinde, im Frühling und Sommer hingegen eher Westwinde (MOSER 1988). Die Häufigkeit der Ostwinde nimmt dabei vom Hochrheintal in den Oberrheingraben ab. Der Grund dafür ist die Tatsache, daß der Kanalisierungseffekt über der Stadt wegfällt. Einer weitergeführten Ostströmung aus dem Hochrheintal entspricht deshalb eine Winddrehung auf südöstliche bis südliche Strömung im Bereich des Flughafens, also wieder entsprechend der orographischen Lage des Oberrheingrabens.

MOSER (1988) stellt neben dem jahreszeitlichen auch einen tageszeitlichen

Gang des Windes in der Region Basel fest. Dabei können die Winde beispielsweise am Tag aus Nordwesten, in der Nacht hingegen aus Südosten wehen. Dieses tagesperiodische Windverhalten hat nach MOSER (1988) eine mangelhafte Lufterneuerung als lufthygienische Konsequenz.

KAMBER (1986) untersucht Strömungssysteme im Hochrheintal bei Basel. Er definiert ein Strömungssystem als spezielle Kombination von gleichzeitig beobachteten Windrichtungen mehrerer Stationen und behandelt jeden Meßtermin separat. So lassen sich mit den 39 häufigsten Strömungssystemen 34,7 Prozent der 1407 Terminbeobachtungen erklären.

### 3. Problemstellung

Als Voraussetzung für eine numerische Immissionsmodellierung ist die Kenntnis des Windfeldes im Untersuchungsgebiet erforderlich. Dabei genügt eine qualitative Beschreibung des Strömungsverhaltens nicht. Vielmehr werden quantitative Angaben zum Windfeld benötigt. Dann nämlich sind die Ergebnisse den numerischen Modellen zugänglich, und es lassen sich Aussagen zur mittleren, jährlichen Immissionsbelastung machen.

Die naturwissenschaftliche Problemstellung besteht erstens darin, das Windverhalten mit Vektorfeldern zu beschreiben und deren klimatologische Bedeutung zu bestimmen. Zweitens müssen mit diesen Kenntnissen sowie dem Emissionskataster die Immissionen numerisch berechnet werden. Schließlich soll die Qualität der Modellergebnisse mittels Immissionsmessungen abgeschätzt werden.

Aus landeskundlicher Sicht interessieren die Fragen nach der räumlichen Verteilung der gegenwärtigen Immissionsbelastung sowie nach einem Hilfsmittel, mit dem die Auswirkung von raumplanerischen Handlungsalternativen auf die Immissionsituation abgeschätzt werden kann.

## 4. Daten

### 4.1 Bestehende meteorologische Stationen

Die durchgeführten meteorologischen Untersuchungen stützen sich auf Daten der Jahre 1987 und 1989. Dabei wurden folgende Stationen, die im Raume Basel routinemäßig im Einsatz stehen, herangezogen:

- Flughafen (französischer Wetterdienst)
- Weil am Rhein (deutscher Wetterdienst)
- St. Johann (LHA)
- MIBA (LHA)
- Muttenz (LHA)
- Ciba-Geigy (Ciba-Geigy)
- St. Margrethen (Schweizerische Meteorologische Anstalt)

St. Chrischona (PTT/ETH)

Die Lage dieser Meßstationen ist in Abbildung 1 eingetragen.

### 4.2 Eigene meteorologische Stationen

Als Ergänzung zu den Routine-Meßstationen im Raum Basel-Nord wurden zusätzliche Meteo-Stationen installiert. Das somit dichtere Meßnetz in diesem Raum hatte zum Ziel, die dortige Situation genauer zu beschreiben sowie allfällige Detailfragen zu beantworten. Die Meßperiode für diese zusätzlichen Messungen dauerte von 24. Januar 1989 bis zum 8. März 1990. Eingesetzt wurden fünf Klimastationen der GEOS Research AG. Davon waren drei Stationen fest installiert, zwei wechselten ihren Standort während der Meßperiode. Der Einsatzort und die Einsatzzeit dieser zusätzlich eingesetzten Meßstationen ist der Tabelle 1, die Lage der Stationen Abbildung 1 zu entnehmen.

Tab. 1: Einsatzort und -zeit der meteorologischen Messungen

Standort	x-Koord.	y-Koord.	Höhe	Zeitspanne
Psychiatrie	609.700	269.000	266	24. 1. 89 — 8. 3. 90
Wasenboden	610.080	268.700	265	24. 1. 89 — 29. 3. 89
Wasenboden	610.080	268.700	265	12. 7. 89 — 20. 9. 89
Dreirosenbrücke	611.000	268.920	259	11. 2. 89 — 8. 3. 90
Horburg	612.180	269.300	254	24. 1. 89 — 8. 3. 90
Wettsteinbrücke	611.825	267.275	265	11. 5. 89 — 12. 7. 89
Unterer Rheinweg	611.150	268.800	250	29. 3. 89 — 18. 10. 89
Riehen	615.600	271.300	248	18. 10. 89 — 8. 3. 90
Rheinhafen	611.350	270.700	248	1. 11. 89 — 8. 3. 90

Alle Stationen waren mit Sensoren für die Windrichtung und Windstärke ausgestattet, vier davon zusätzlich mit Sensoren für die Temperatur und die Feuchtigkeit. Erfasst wurden je 1/2-Stunden-Werte.

## 5. Methoden

### 5.1 Wetterlagen-Klassifikation

Als Vorbereitung zur Windfeldanalyse wurden die einzelnen Tage zu Witterungsepisoden zusammengefaßt. Die Bildung der Episoden erfolgte unter Zuhil-

fenahme der Witterungsklassifikation nach SCHÜEPP (1979), welche für die Schweiz insgesamt 40 Witterungslagen unterscheidet. Die Schweizerische Meteorologische Anstalt (SMA) verwendet die Klassifikation nach SCHÜEPP für die tägliche Klassifikation der Wetterlage. Die 40 Witterungslagen lassen sich weiter zu 12 Hauptwitterungslagen zusammenfassen, nämlich in drei konvektive (antizyklonal, indifferent, zyklonal), acht advektive (West-, Nordwest-, Nord-, Nordost-, Ost, Südost-, Süd-, Südwestlagen) und eine Mischlage (Tiefdruckkern). Bei den vorliegenden Untersuchungen wurde eine Witterungsepisode als Zeitraum gleicher Hauptwitterungslage definiert, sofern diese mehr als drei Tage andauert. Mit dieser Definition konnten 129 Episoden bestimmt werden.

## 5.2 Windfeldanalyse

Um die einzelnen Witterungsepisoden weiter zu typischen Windfeldmustern zusammenfassen zu können, wurde für jede Episode und jede Station Windrosen sowie mittlere Tagesgänge des Windes, der Temperatur und der Feuchte berechnet. Die Berechnung des mittleren Tagesganges des Windes erfolgte dabei durch vektorielle Mittelung der zur gleichen Tagesstunde registrierten Werte. Der resultierende Vektor stellt somit den mittleren Massenfluß pro Stunde dar.

Die berechneten Windrosen bzw. Tagesgänge wurden für jede Episode je auf einer Karte bei den entsprechenden Stationen dargestellt. Diese Karten bildeten dann die Grundlage für die Gruppierung der Episoden. Dabei wurden Karten mit ähnlichen Mustern zu einer Gruppe zusammengefaßt.

Folgende Kriterien waren für die Gruppenbildung entscheidend:

- ähnlicher Tagesgang des Windes an gleichen Stationen
- ähnliche Struktur der Windrosen an gleichen Stationen
- ähnliches räumliches Muster der Windrosen.

## 6. Ergebnisse

### 6.1 Einteilung in 12 Windfeldmuster

Aus den 129 zur Verfügung stehenden Windfeldern konnten drei Haupttypen unterschieden werden:

- konvektive Lagen
- Westlagen
- Ostlagen.

West- und Ostlage bedeuten, daß beim generellen Strömungsverhalten West- bzw. Ostrichtung vorherrscht. Als konvektive Lagen werden windschwache Situationen bezeichnet.

Diese drei Haupttypen ließen sich je weiter in Sommer- und Wintersituationen sowie Übergangsformen im Frühling und Herbst unterteilen. Damit ergaben sich

insgesamt 12 Windfeldmuster, M 1 bis M 12. So konnten von den 129 zur Verfügung stehenden Windfeldern 95 eindeutig einem bestimmten Windfeldmuster zugeordnet werden. Die Häufigkeitsverteilung der Windfeldmuster ist in der Abbildung 2 wiedergegeben. Die absoluten Häufigkeiten sind der Tabelle 2 zu entnehmen. Die 12 Windfeldmuster können allgemein als lokale Strömungsfeld-Klassifikation verwendet werden.

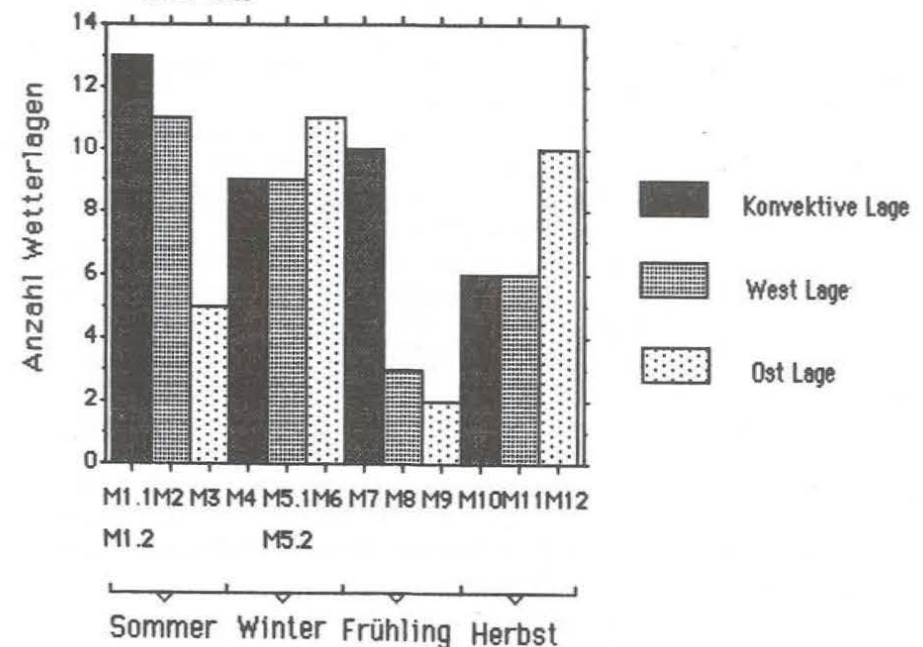
Im folgenden wird beschrieben, welche Gründe eine Einteilung nach der Jahreszeit nahelegten.

Im Sommer tritt bei allen Wetterlagen ein ausgeprägter Tagesgang auf. In den Nachtstunden ist die Strömung gegen Norden gerichtet, in den Tagstunden jedoch ist die entgegengesetzte Richtung zu verzeichnen. Der Wechsel von südlicher zu nördlicher Windrichtung findet jeweils um zirka 8 Uhr statt, von nördlicher zu südlicher Richtung etwa um 20 Uhr. Der Zeitpunkt des Windrichtungswechsels, nämlich etwa eine Stunde nach Sonnenauf- bzw. nach Sonnenuntergang, läßt vermuten, daß der Windwechsel strahlungsbedingt ist.

Die drei Windfeldtypen „konvektiv“, „Westlage“ und „Ostlage“ unterscheiden sich im Sommer vor allem durch die West- bzw. Ostkomponenten des Windes sowie durch die Stärke des Massenflusses in Richtung Nord und Süd.

Bei den konvektiven Lagen folgen die Winde ziemlich genau dem bei Basel nordwest-südost-orientierten Rheintal. Am Tag wehen sie aus Nordwest und in der Nacht aus Südost. Der Massenfluß nach Nord und nach Süd ist etwa gleich groß.

Abb. 2: Häufigkeitsverteilung der Windfeldmuster M1—M12 für die Jahre 1987/1989



Tab. 2: Häufigkeit der Windfeldmuster

	Sommer	Winter	Frühling	Herbst
Konvektive Lage	M1.1, M1.2 Tagesgang	M4 konvergent	M7	M10
Anzahl Fälle	13	9	10	6
West Lage	M2 Tagesgang	M5.1 M5.2 uniform	M8	M11
Anzahl Fälle	11	9	3	6
Ost Lage	M3 Tagesgang	M6 uniform	M9	M12
Anzahl Fälle	5	11	2	10
Total	95 klassierte Fälle			

Ebenfalls Winde aus Nordwest am Tage sind bei den Westlagen festzustellen, das heißt auch hier folgen die Winde dem Tal. In der Nacht hingegen behalten sie nach der Drehung nach Nord die westliche Komponente bei. Sie wehen also senkrecht zur Talachse. Der dabei stattfindende Massenfluß ist aber viel geringer als jener am Tag.

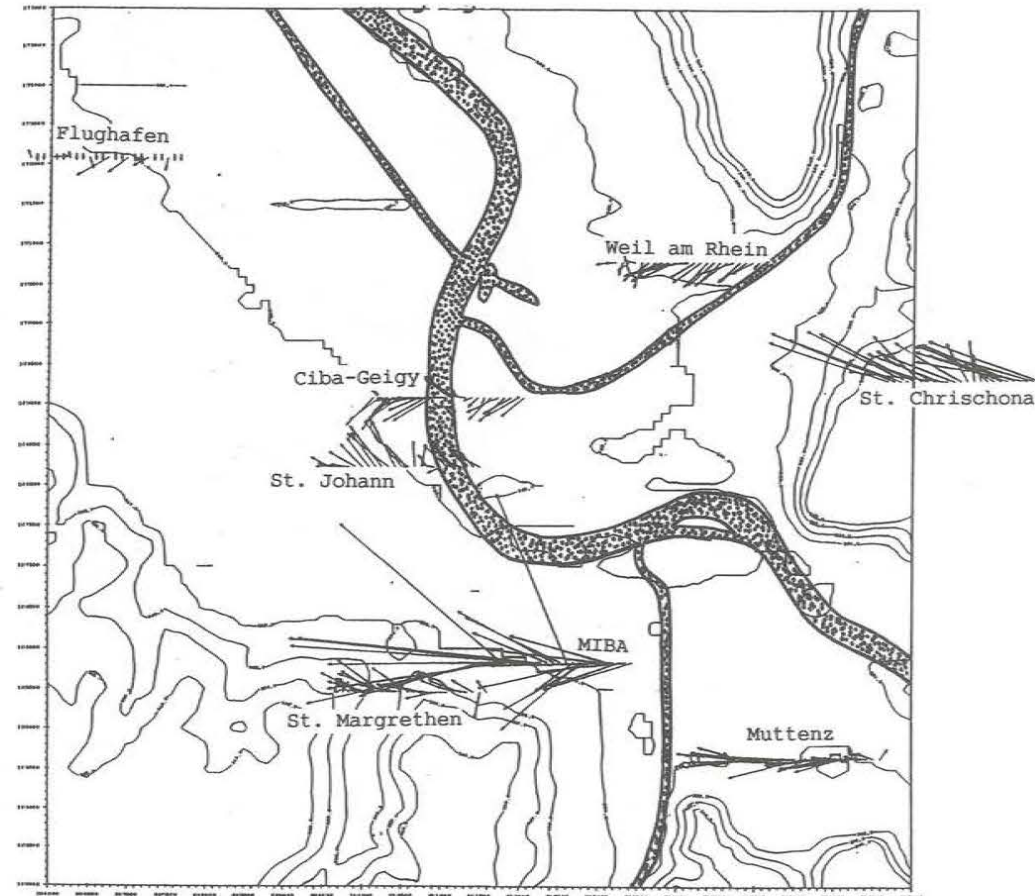
Bei den Ostlagen wehen die Winde in der Nacht eindeutig parallel zur Talachse, am Tag hingegen weisen sie nur eine schwache, zum Teil auch gar keine Westkomponente auf. Der Massenfluß in der Nacht, also Richtung Norden, ist dabei größer als jener am Tag Richtung Süden.

Im Winterhalbjahr ist das Tagesgangverhalten nur sehr schwach bis gar nicht feststellbar. Bei den konvektiven Lagen ist oft ein konvergentes Strömungsfeld zu beobachten. In Nordbasel verlaufen die Windrichtungen in Nord-Süd-Richtung, gleichzeitig ist aber eine Windströmung aus dem Wiesental gegen das Stadtzentrum zu verzeichnen (vgl. Abb. 3). Westlagen hingegen weisen ein nahezu uniformes Windfeld aus Südwest auf. Um etwa 10 Uhr drehen die Winde auf WSW oder erhalten sogar eine schwache nördliche Komponente. Schon um zirka 15 Uhr wehen sie aber wieder aus Südwest. Auch das Windfeld der Ostlagen ist im Winter jeweils beinahe uniform. Die Winde wehen vorwiegend aus Ost-südost und können am späteren Vormittag eine schwache nördliche Komponente erhalten, die bis etwa um 19 Uhr anhält.

Das nur schwache Tagesgangverhalten im Winter läßt sich mit der geringeren Sonneneinstrahlung erklären. Es ist auch feststellbar, daß der Wechsel der von

Abb. 3: Konvektive Lage im Winter

Dargestellt ist für jede Station der mittlere Tagesgang des Windes während der Witterungsepisode vom 21. 12. 1987 bis 25. 12. 1987.



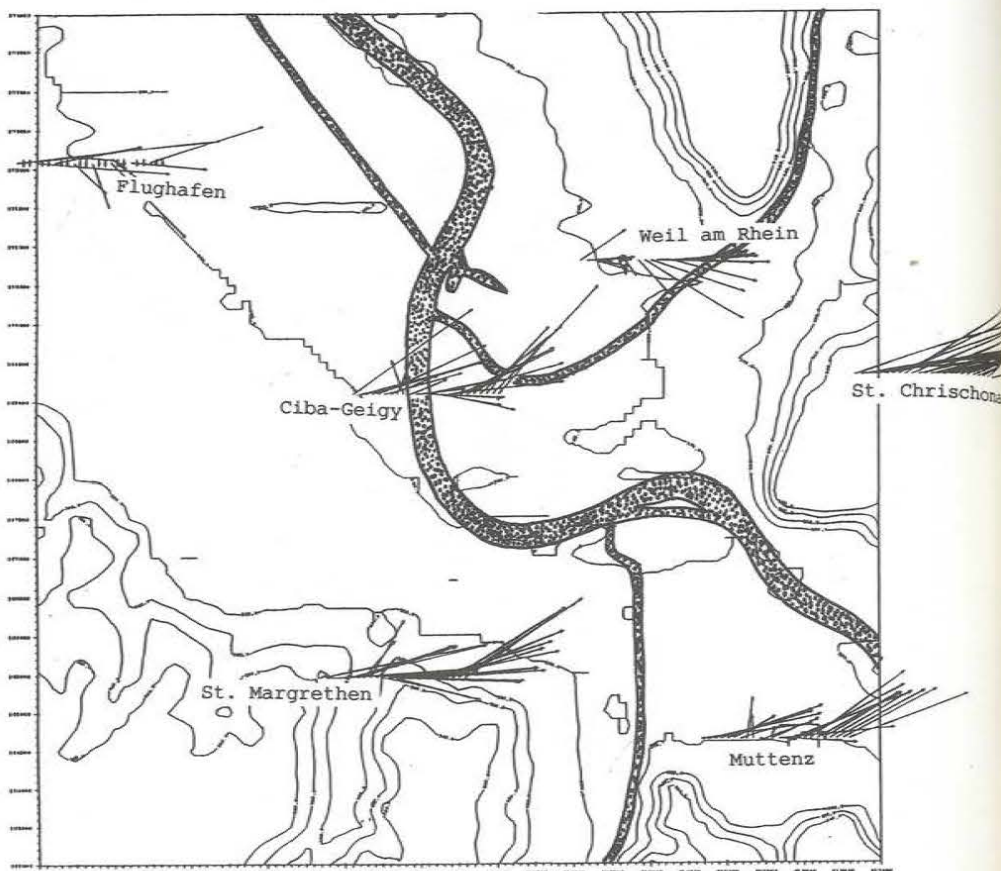
Nord- auf Südkomponente erst am späten Vormittag stattfindet und nur wenige Stunden anhält. Diese Tatsache läßt sich mit den im Winter kürzeren Tageszeiten erklären.

In den Jahreszeiten Frühling und Herbst zeigen sich Übergangsformen zwischen den typischen Winter- und Sommersituationen.

## 6.2 Spezielles Verhalten des Windes an der Station Chrischona

Die auf 440 m Höhe über Boden der Stadt Basel gelegene Station Chrischona auf dem Dinkelberg zeigt im Vergleich zu den übrigen Stationen oft ein gesondertes Verhalten. So weist sie zum Beispiel häufig kein Tagesgangverhalten auf, auch wenn dieses an den übrigen Stationen klar erkennbar ist (vgl. Abb. 4). Zudem verzeichnet sie oft viel stärkere Winde als die tiefer gelegenen Stationen. Dieses

Abb. 4: Mittlerer Tagesgang des Windes während der Witterungsepisode von 1. 1. 1987 — 3. 1. 1987.



spezielle Verhalten der Station Chrischona ist auf deren hohe Lage zurückzuführen. Sie repräsentiert eher die Winde der freien Atmosphäre als das bodennahe Windfeld. In der kalten Jahreszeit ist es zudem möglich, daß die Station über einer Inversionsschicht liegt und somit vom Bodenwindverhalten getrennt ist. Auf eine häufige Abkoppelung von topographisch beeinflusstem Bodenwindfeld und synoptisch bedingter Windströmung in der Höhe vor allem im Winter weist auch MOSER (1988) hin. Dabei liegt die Trennlinie zwischen den verschiedenen Höhengniveaus nach MOSER um 500 m.

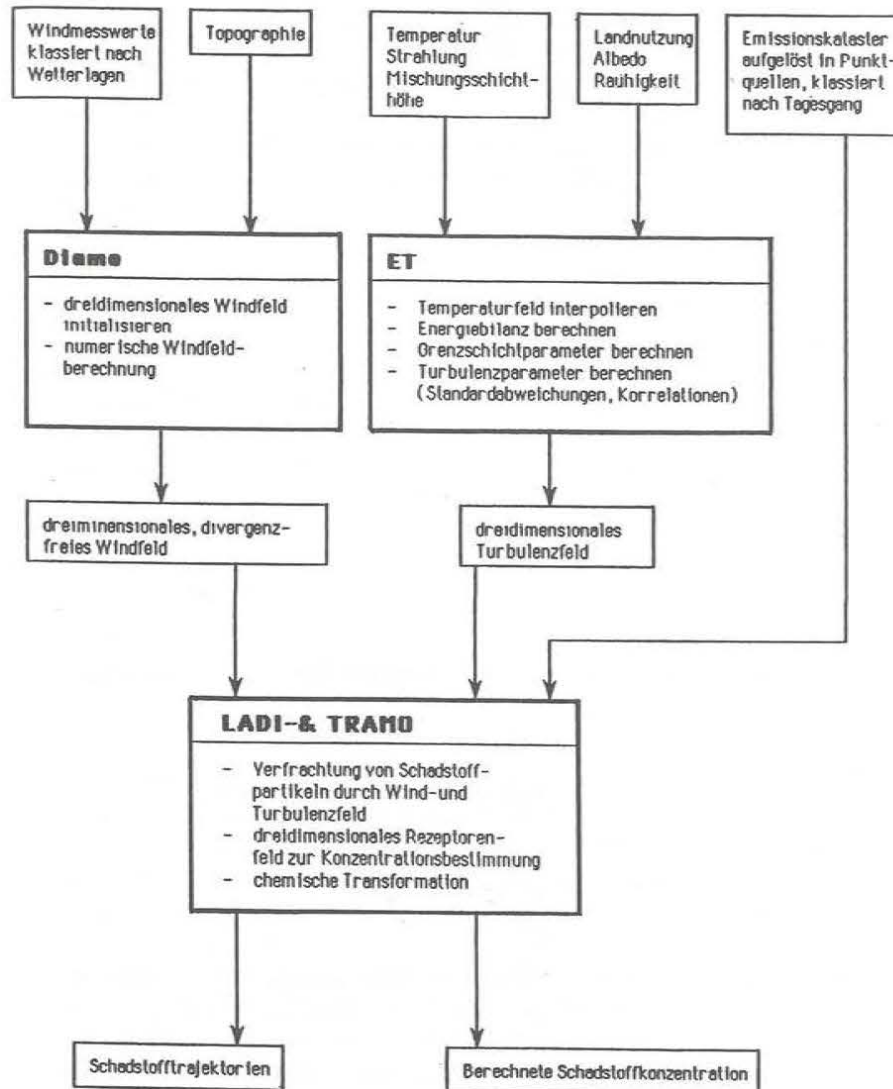
### 7. Verwendung der Windfeldmuster zur Immissionsmodellierung

Die oben beschriebenen 12 Windfeldmuster dienten als Eingangsgrößen in ein flächendeckendes Windfeldmodell. Dieses lieferte zusammen mit einem Turbu-

lenzmodell die Grundlage für die Modellierung des Schadstofftransportes in der Atmosphäre. Der Zusammenhang zwischen den meteorologischen Untersuchungen und der Immissionsmodellierung ist in Abbildung 5 dargestellt.

DIAMO ist ein numerisches, diagnostisches Windfeldmodell, das die Daten der meteorologischen Meßstationen als Eingangsgrößen verwendet und davon unter Berücksichtigung der Topographie ein dreidimensionales Windfeld berechnet. Die mathematische Formulierung und die Anwendungsmöglichkeit von DIAMO sind bei SCHUMACHER (1991) beschrieben. Im Programmteil ET

Abb. 5: Übersicht der Immissionsmodellierung



wird das dreidimensionale Turbulenzfeld berechnet, das seinerseits von der Energiebilanz abhängig ist. Die Bestimmung der Energiebilanz geschieht nach der Methode von van ULDEN und HOLSTAG (1988) und die Turbulenzparametrisierung nach NIEUWSTADT und von DOP (1982). Die eigentliche Immissionsberechnung erfolgt mit der Lagrang'schen Diffusions- und Trajektorienmodell LADI- & TRAMO, welches das mittlere Windfeld (von DIAMO), das Turbulenzfeld (von ET) sowie die Emissionen (von einem Emissionskataster) als Eingangsgrößen verwendet und Schadstoffe in Form von Partikeln rechnerisch durch die Modellatmosphäre transportiert. Die Bestimmung der Immissionskonzentrationen erfolgt an Rezeptor-Punkten, die gitterförmig im Modellgebiet angeordnet sind.

Zur Illustration des Zusammenspiels zwischen Windfeld, Turbulenz, Emission und Immission wird der Tagesgang des Windfeldes sowie des Immissionskonzentrationsfeldes am Beispiel des Windfeldmusters M 9 in den Abbildung 6 a-f dargestellt. Das Windfeldmuster M 9 tritt zwar nicht häufig auf, doch sind hier verschiedenste meteorologische Erscheinungsformen deutlich sichtbar.

In den Nachtstunden (vgl. Abb. 6a) herrscht aus dem Hochrheintal eine Südostströmung vor. Am rechten oberen Bildrand sieht man den konvergenten Einfluß aus dem Wiesetal. Die Immissionen sind klein, da in der Nacht die Verkehrsmenge gering ist. Mit dem Einsetzen des Verkehrs um 6.00 und 7.00 (vgl. Abb. 6b) nehmen die Immissionskonzentrationen schlagartig zu und erreichen sehr hohe Werte. Das Windfeld hat sich aber wenig verändert. Um 8.00 Uhr nehmen die Verkehrsemissionen weiter zu. Das Windfeld bleibt weiterhin ziemlich unverändert. Dennoch nehmen die Immissionskonzentrationen ab (vgl. Abb. 6c). Dies ist auf das Einsetzen der Turbulenz zurückzuführen. Um 9.00 Uhr beginnt das Windfeld zu drehen und führt zu konvergenten Erscheinungsbildern (vgl. Abb. 6d). In den Nachmittagsstunden weht der Wind aus der entgegengesetzten Richtung von Nordwesten (vgl. Abb. 6e). In den frühen Abendstunden beginnt der Wind wieder zu drehen und zeigt nochmals typische Konvergenzmuster (vgl. Abb. 6f). In der Nacht stellt sich dann wieder die Südostströmung ein.

## 8. Anwendung in der Praxis: Immissionsverhältnisse des heutigen Zustandes

Im Zusammenhang mit der eingangs erwähnten Umweltverträglichkeitsprüfung wurden für die Stadt Basel die  $\text{NO}_2$ -Immissionsverhältnisse unter Verwendung der oben beschriebenen Modelle berechnet. Die Immissionsberechnungen erfolgten für die drei Emittentenklassen Hausbrand, Verkehr und Industrie, woraus die mittlere, jährliche  $\text{NO}_2$ -Gesamtbelastung ermittelt wurde, die in Abbildung 7 dargestellt ist.

Innerhalb derselben Untersuchung wurde die aktuelle  $\text{NO}_2$ -Immissionsbelastung auch mit Messungen erfaßt. An zehn Standorten, die sich aufgrund des Projektvorhabens vorwiegend in Nord-Basel befanden, wurden während 27 Wochen Passivsammler eingesetzt. Die Ergebnisse dienen sowohl für eine de-

Abb. 6a — f: Tagesgang eines Windfeldes sowie des  $\text{NO}_2$ -Immissions-Konzentrationsfeldes am Beispiel des Windfeldmusters M9. Die Konzentrationen sind in  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  dargestellt.

a) 4 Uhr, b) 7 Uhr, c) 8 Uhr, d) 10 Uhr, e) 13 Uhr, f) 16 Uhr

Abb. 6a: Konzentrationen  $\text{NO}_2$ , 4 Uhr

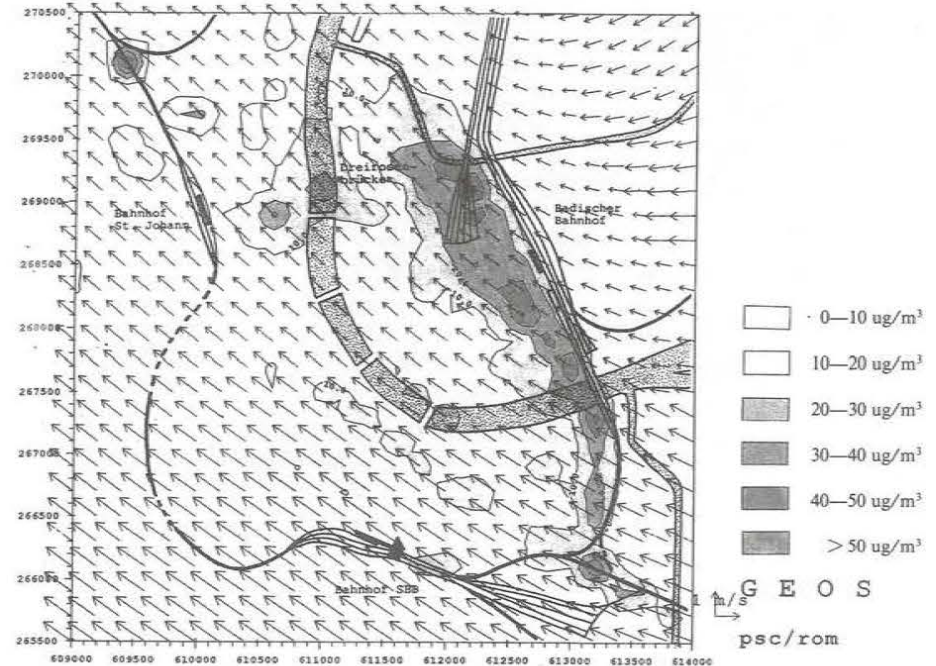


Abb. 6b: Konzentrationen  $\text{NO}_2$ , 7 Uhr

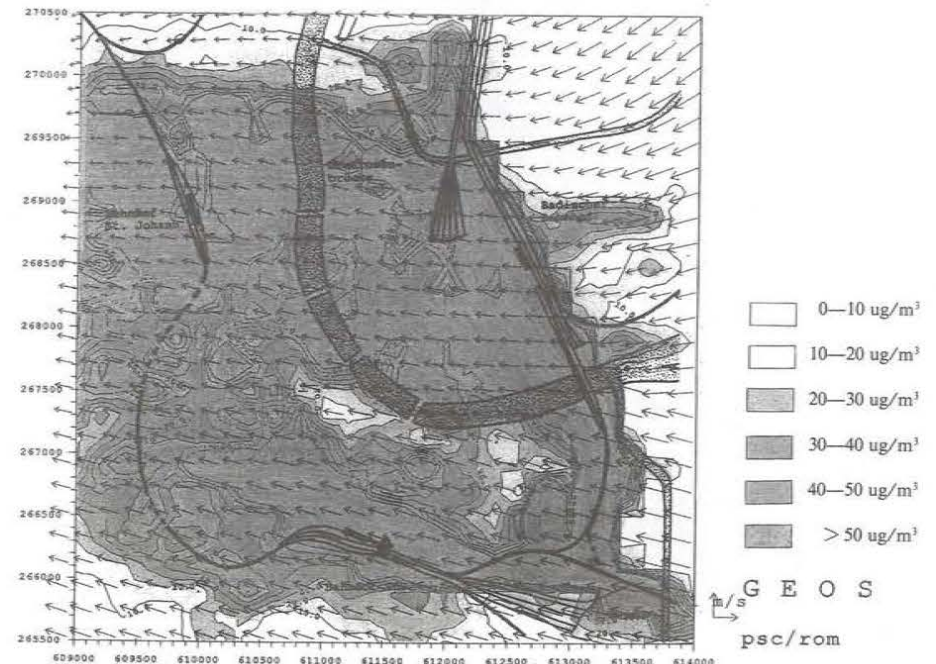


Abb. 6c: Konzentrationen NO<sub>2</sub>, 8 Uhr

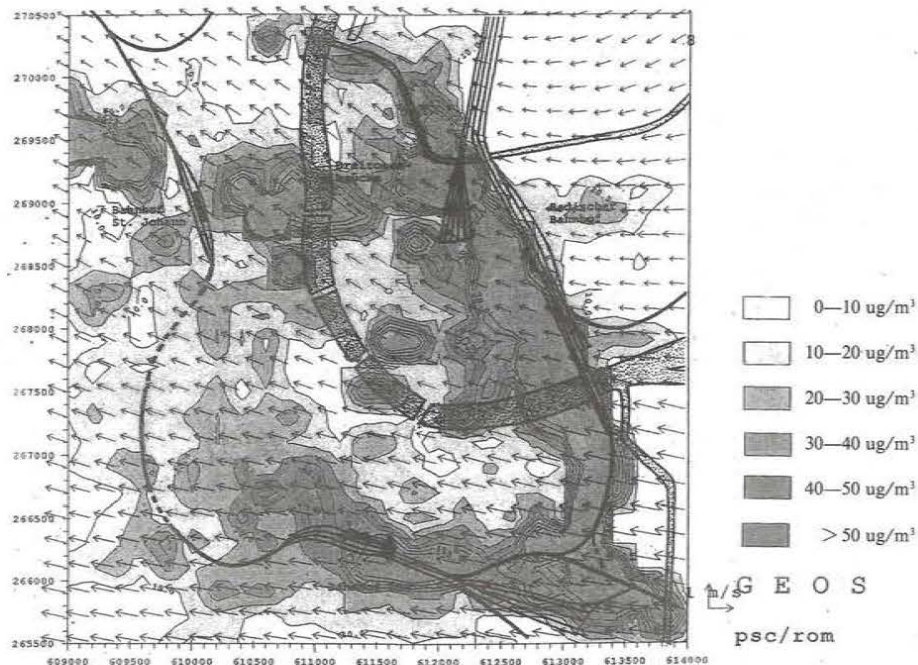


Abb. 6e: Konzentrationen NO<sub>2</sub>, 13 Uhr

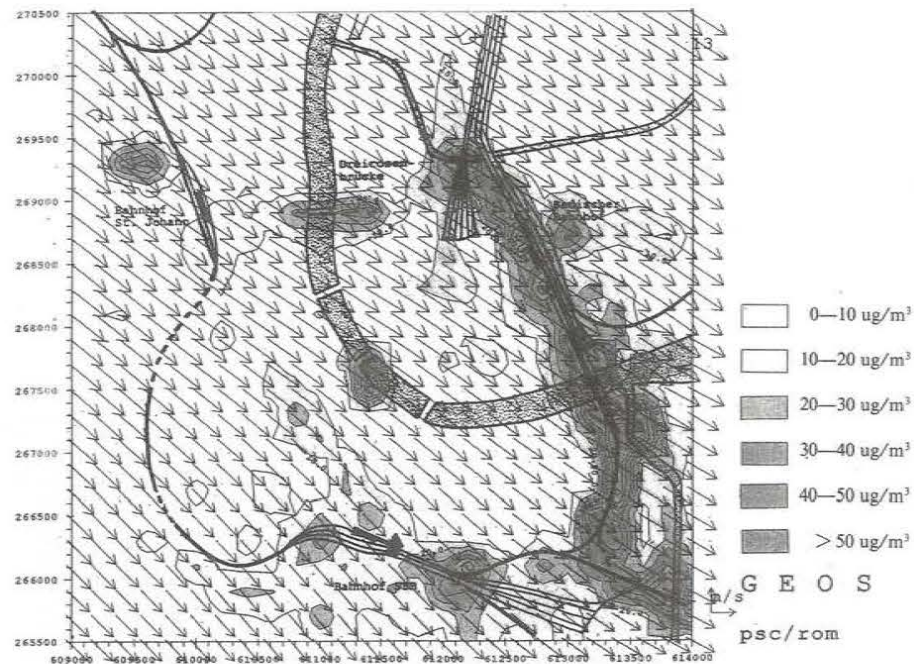


Abb. 6d: Konzentrationen NO<sub>2</sub>, 10 Uhr

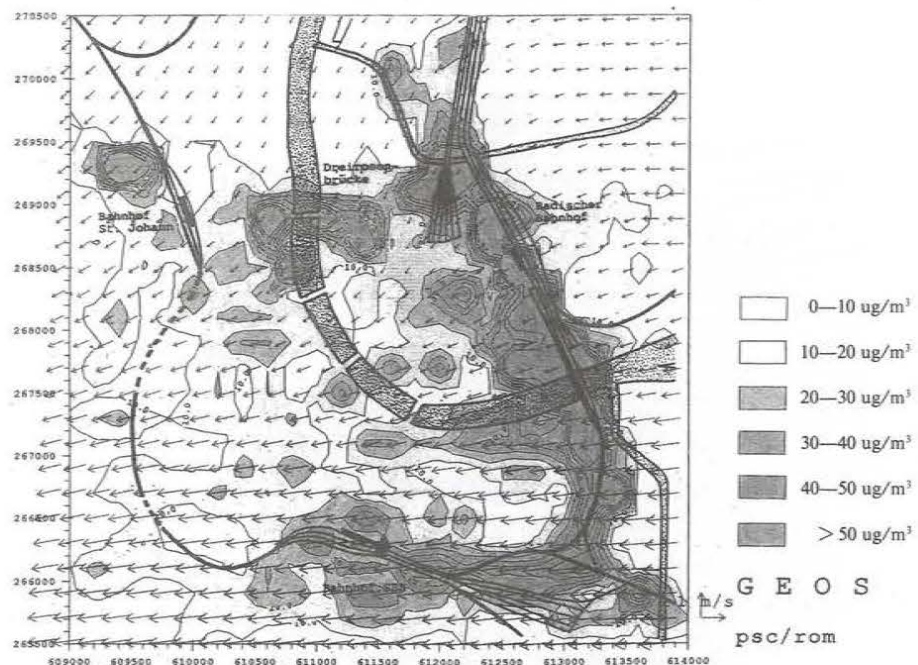


Abb. 6f: Konzentrationen NO<sub>2</sub>, 16 Uhr

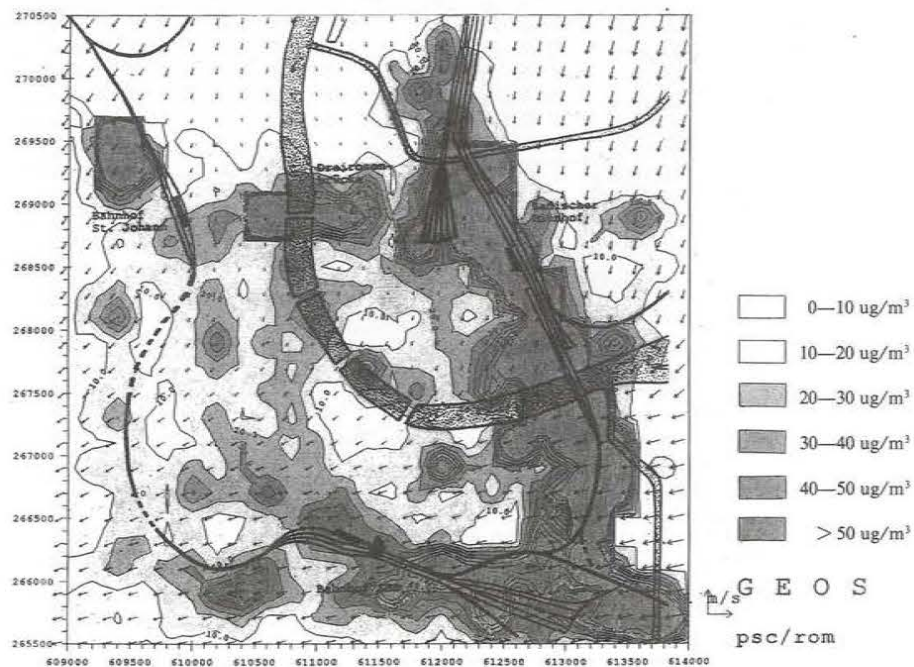
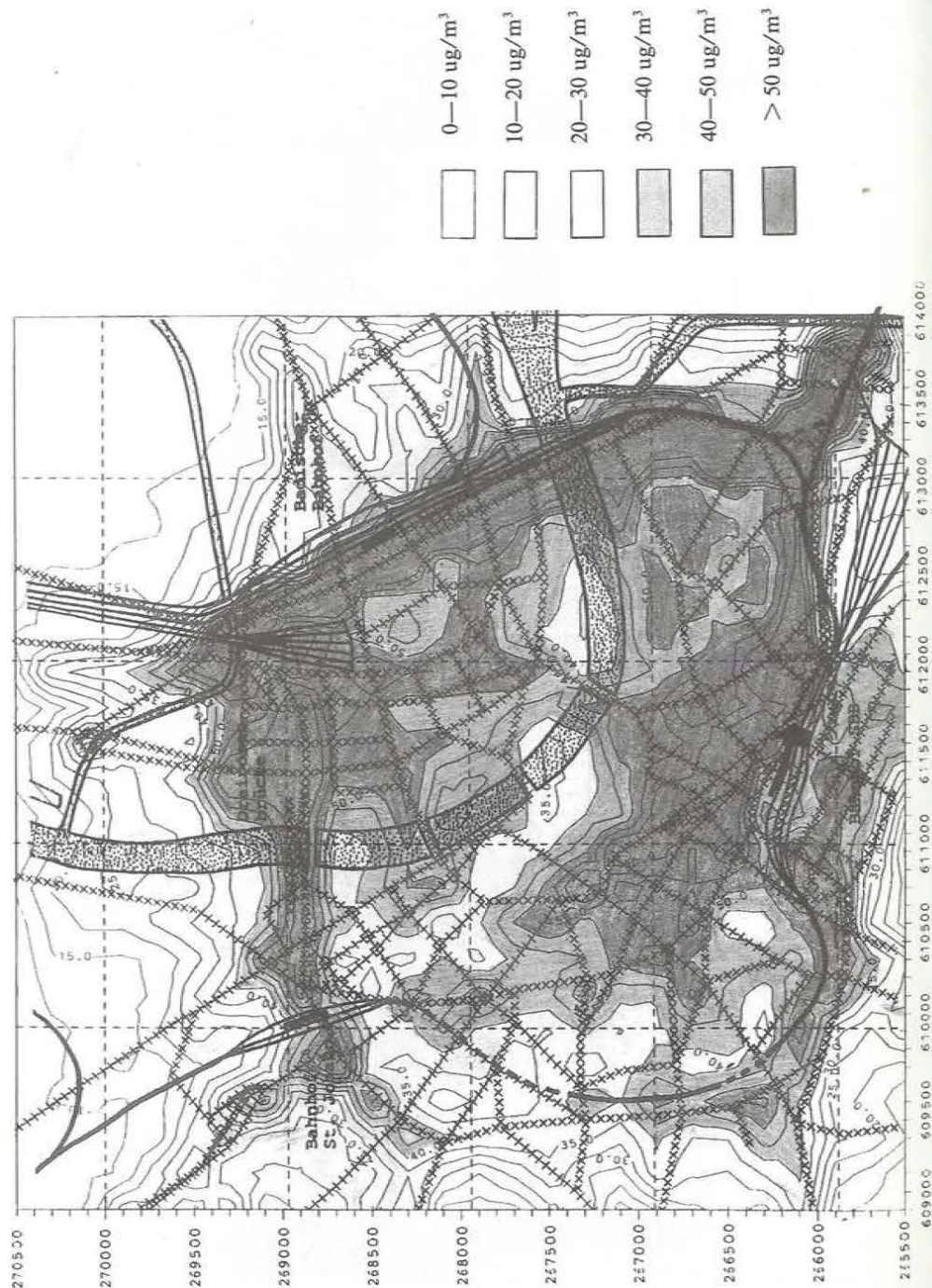




Abb. 7: Jahresmittel  $\text{NO}_2$  der Gesamtimmission (Volumenmittel der untersten 10 m über Boden in  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )



taillierte Bestandesaufnahme, als auch für die laufende Projektierung und ermöglichen nun einen Vergleich zwischen den gemessenen und den numerisch berechneten Immissionsverhältnissen.

Aus Abbildung 7 wurde an den Meßstandorten die berechnete  $\text{NO}_2$ -Immission herausgelesen und in Tabelle 3 den Meßergebnissen gegenübergestellt.

Die berechneten Immissionen liegen innerhalb der Meßgenauigkeit der Immissionsmessungen. Durch die getrennte Berechnung der Emittentengruppen Hausbrand, Verkehr und Industrie wurde die Nicht-Linearität der Umwandlung von  $\text{NO}_x$  zu  $\text{NO}_2$  nicht voll berücksichtigt, was trendmäßig zu einer leichten Überschätzung führte. Die größte Abweichung (Eglisee) befindet sich am Rand des Modellgebietes, wo der Einfluß außerhalb liegender Emittenten nicht mehr berücksichtigt ist.

Tab. 3: Vergleich der Meß- und der Modellresultate

	Passivsammler [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ]	Modell [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ]	Modellabweichung
IWB	49,1	52	+ 6,1 %
Rhypark	56,0	60	+ 7,1 %
Unterer Rheinweg	42,1	42	0,0 %
Dreirosengarten	58,4	61	+ 4,4 %
Matthäuskirche	50,5	52	+ 3,0 %
Horburg Park	49,7	52	+ 5,1 %
Güterbahnhof	55,8	61	+ 5,7 %
Horburg	58,6	62	+ 5,9 %
Eglisee	45,8	33	- 33,0 %
Wettsteinbrücke	47,0	44	+ 6,6 %

Wie die Tabelle 3 zeigt, besteht zwischen den Ergebnissen der Immissionsmodellierung und den gemessenen Immissionsverhältnissen eine sehr gute Übereinstimmung. Dies dürfte darauf zurückzuführen sein, daß die Ergebnisse der meteorologischen Analyse konsistent in die Modelle eingebracht werden konnten, das heißt, es wurden Modelle verwendet, die in der Lage sind, die beobachteten Windfeldabläufe abzubilden. Es kann daraus der Schluß gezogen werden, daß mit Hilfe der Windfeldanalyse und einer modelltechnisch adäquaten Umsetzung auch in schwierigen Situationen, wie es das Windfeldverhalten in Basel darstellt, weitaus befriedigendere Ergebnisse bei Immissionsberechnungen erreicht werden können, als dies mit der gegenwärtigen Praxis der Gauss-Modellierung der Fall ist.

## 9. Bedeutung der Immissionsituation für die Lebensqualität im Raum Basel und geplante Maßnahmen

Wie die Abbildung 7 zeigt, ist die heutige  $\text{NO}_2$ -Immissionsbelastung sehr groß. In der ganzen Stadt wird der Jahresmittelgrenzwert der Luftreinhalteverordnung von  $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$  überschritten, zum Teil massiv bis über  $55 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . In bezug auf die Luft ist die Lebensqualität in der Stadt Basel schlecht. Dabei tragen von den Emissionen Hausbrand und Industrie etwa die Hälfte des  $\text{NO}_x$ -Ausstoßes, die andere Hälfte stammt vom Verkehr. Immissionsseitig dagegen verursacht der Verkehr etwa 70–80 Prozent der  $\text{NO}_2$ -Gesamtbelastung (Kanton Basel-Stadt, 1991).

Zur Verbesserung der Luftqualität in der Stadt Basel bestehen verschiedene planerische Absichten. Dazu gehört die in diesem Artikel schon erwähnte Nordtangente, eine Verbindung zwischen der französischen A 35 und der schweizerischen N 2. Mit diesem Autobahnverbindungsstück soll der Transitverkehr sowie ein Teil des städtischen Verkehrs, der heute durch die Wohnquartiere im Norden von Basel führt, kanalisiert werden, damit die betroffenen Wohngebiete möglichst entlastet werden.

Weiter soll im Zusammenhang mit der Neugestaltung des Bahnhofareals mit dem sogenannten Masterplan unter anderem ein Ausbau des öffentlichen Verkehrs der ganzen Region erfolgen (Baudepartement Kanton Basel-Stadt 1986).

Auf kantonaler Ebene liegt seit Februar 1990 ein Luftreinhalteplan vor. Mit dessen Umsetzung wird die Einhaltung der in der Luftreinhalte-Verordnung festgelegten Grenzwerte angestrebt. Im Bereich Verkehr besteht ein Maßnahmenbündel darin, daß die erlaubten Höchstgeschwindigkeiten — abgestuft nach Straßenkategorie und unterstützt durch bauliche Begleitmaßnahmen — herabgesetzt werden. Im weiteren soll das Umsteigen auf die öffentlichen Verkehrsmittel konsequent gefördert werden.

## 10. Schlußfolgerungen

Die Qualität des Lebensraumes von Basel wird durch die lokalen Klimateigenschaften mitbeeinflusst. Mittels Spezialmessungen wurde das bestehende meteorologische Meßnetz verdichtet. Die Auswertungen folgten dem Ansatz eines Klimakatasters und wurden verwendet, den Immissionszustand numerisch zu berechnen. Das Ergebnis, das gut mit den gemessenen Immissionswerten übereinstimmt, zeigt, daß die Luftbelastung in Basel groß ist und die gesetzlichen Grenzwerte überschreitet. Verschiedene raumwirksame Vorhaben sind geplant, die dazu beitragen sollen, den lufthygienischen Zustand zu verbessern.

## 11. Zusammenfassung

Im Rahmen einer Umweltverträglichkeitsprüfung werden im Gebiet der Stadt Basel meteorologische Messungen durchgeführt und zusammen mit bestehenden

Stationen ausgewertet. Die Windfeldanalyse weist den Ansatz eines Katasters auf mit Gliederung nach Jahreszeit, Witterungslage und tageszeitlichen Variationen. Für eine lokale Windfeldklassifikation werden 12 Windfeldmuster ausgeschieden, die aufgrund der quantitativen Beschreibung für eine numerische Immissionsmodellierung verwendet werden können.

Mit Hilfe von numerischen Modellen und den Ergebnissen der lokalen Windfeldklassifikation wird die jährliche  $\text{NO}_2$ -Gesamtimmissionsbelastung aus Hausbrand, Verkehr und Industrie berechnet. Ein Vergleich mit den gleichzeitig durchgeführten Immissionsmessungen zeigt, daß die heutige  $\text{NO}_2$ -Immissionsbelastung in Basel im Rahmen der Meßgenauigkeit mit dem hier vorgestellten methodischen Ansatz modelliert werden können.

## Danksagung

Die hier beschriebenen Messungen, Analysen und numerischen Berechnungen wurden im Auftrag des Tiefbauamts des Kantons Basel-Stadt im Rahmen der Umweltverträglichkeitsuntersuchungen zum Projekt Nordtangente N 2 Basel durchgeführt.

Dem Lufthygieneamt beider Basel danken wir für die Zurverfügungstellung vorhandener Daten.

Prof. Dr. A. Ohmura, Geographisches Institut der ETH Zürich, danken wir für die Durchsicht des vorliegenden Artikels.

## Literatur

- BIDER, M., HERRENSCHNEIDER, A., von RUDOLFF, H. u. W. SCHÜEPP 1984: Die klimatischen Verhältnisse in der weiteren Basler Region. *Regio Basiliensis*, XXV/1, pp 53—83.
- EIDG. KOMMISSION METEOROLOGIE 1981: Möglichkeiten regionaler Klimaveränderungen durch menschliche Einwirkungen. Schlußbericht Projekt CLIMOD, Bern.
- GEOS Research AG 1991: Projekt Nordtangente, Nationalstraße N 2, Umweltverträglichkeitsbericht Teil A. Gesamtprojekt, Fachbereich Luft. Interner Bericht des Baudepartements Basel-Stadt, Tiefbauamt, 87 pp.
- KAMBER, K. 1986: Klimaökologische Untersuchungen im Hochrheintal östlich Basel: Lokalwettertypen, Ausbreitungsbedingungen, Immissionsituation. Diplomarbeit ausgeführt am Geographischen Institut der Universität Basel, 202 pp.
- KANTON BASEL-STADT, Baudepartement 1986: Ratschlag betreffend Masterplan Bahnhof SBB Basel, Konzept 86. Baudepartement, Basel-Stadt, 61 pp.
- KANTON BASEL-STADT, Baudepartement, Tiefbauamt 1991: Umweltverträglichkeits-Bericht SN 2 Nordtangente. Tiefbauamt, Basel.
- KANTON BASEL-STADT und KANTON BASEL-LANDSCHAFT 1990: Luftreinhalteplan beider Basel.
- MOSER, H. R. 1985: Beziehungen zwischen Klima und Lufthygiene. *Regio Basiliensis*, XXVI/3, pp 213—222.
- MOSER, H. R. 1988: Grundsätzliche Aspekte von Klima und Lufthygiene in der Region Basel. *Geographica Helvetica*, Nr. 2. pp 83—91.
- NIEUWSTADT, F. T. M. u. H. von DOP (ed.) 1982: Atmospheric turbulence and air pollution modelling. D. Reidel Publishing Company, Dordrecht, 388 p.
- SCHÜEPP, M. 1979: Witterungsklimatologie. *Klimatologie der Schweiz*, Band 3, Schweizerische Meteorologische Anstalt Zürich.
- SCHÜEPP, W. 1982 a: Untersuchungen über die Windverhältnisse in der Nordwestschweiz. *Geographica Helvetica*, Nr. 4, 208—209.
- SCHÜEPP, W. 1982 b: Das Klima der Basler Region als Bestandteil des menschlichen Lebensraumes. *Regio Basiliensis*, XXIII/1 + 2, pp 28—44.
- SCHUHMACHER, P. 1991: Messung und numerische Modellierung des Windfeldes über einer Stadt in komplexer Topographie. ETH Zürich, Dissertation Nr. 9390.
- van ULDEN, A. P. u. A. A. HOLSTEG 1985: Estimation of atmospheric boundary layer parameters for diffusion applications. *J. Cli. Appl. Meteor.*, 24, 1196—1207.