Zeitschrift: Mitteilungen der Naturforschenden Gesellschaft in Bern
Herausgeber: Naturforschende Gesellschaft in Bern
Band: 48 (1991)

Artikel: Die Luftimmissionen im Stadtgebiet von Bern
Autor: Künzle, Thomas
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-318557

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: 01.05.2026

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

THOMAS KÜNZLE*

Die Luftimmissionen im Stadtgebiet von Bern

1. Einleitung und Problemstellung

Der Artikel 27 der eidgenössischen Luftreinhalte-Verordnung (LRV, 1985) verpflichtet die Kantone dazu, den Stand und die Entwicklung der Luftverunreinigung auf ihrem Gebiet zu überwachen. Der Ist-Zustand (1989/90) der Luftbelastung kann wie folgt zusammengefasst werden:

- Die Belastung mit Schwefeldioxid (SO_2) war in den letzten Jahren stark rückläufig. Diese Abnahme konnte mit der Reduktion des Schwefelgehaltes im Heizöl erreicht werden. Die Immissionsgrenzwerte werden heute im Kanton Bern kaum mehr überschritten.
- In den folgenden vier Regionen des Kantons treten flächenhaft übermässige Immissionen beim Stickstoffdioxid (NO_2) auf: Bern (22 Gemeinden), Biel (8 Gemeinden), Thun (5 Gemeinden) und Gemeinde Langenthal. In den Zwischengebieten werden entlang stark befahrener Verkehrsachsen sowie punktuell in grösseren Ortschaften die Grenzwerte ebenfalls überschritten.
- Beim Ozon (O_3) treten während des Sommerhalbjahres oftmals kantonsweit massive Grenzwertüberschreitungen auf (*Volkswirtschaftsdirektion*, 1990).

Die Immissionssituation in der Region Bern ist im Bericht des Kantonalen Amtes für Industrie, Gewerbe und Arbeit (KIGA, 1990a) umfassend dargestellt. Das Amt für Umweltschutz und Lebensmittelkontrolle der Stadt Bern hat für das Stadtgebiet von Bern eine Immissionsübersicht für die Jahre 1987–89 zusammengestellt (AfUL, 1990).

Im Artikel 31 der LRV (1985) ist festgehalten, dass bei übermässigen Immissionen die Behörden einen Massnahmenplan erstellen müssen. Der Massnahmenplan gibt an, welche Quellen verantwortlich sind und zeigt auf, welche Massnahmen zur Verhinderung oder Beseitigung der übermässigen Immissionen führen sollen:

- Bei stationären Anlagen (Feuerungen, industriellen und gewerblichen Anlagen) kommen als mögliche Massnahmen verkürzte Sanierungsfristen sowie ergänzende oder verschärfte Emissionsgrenzwerte in Betracht (Artikel 32 LRV).
- Beim Verkehr stehen nebst den vorsorglichen Emissionsbegrenzungen bauliche, betriebliche, verkehrslenkende oder -beschränkende Massnahmen im Vordergrund (Artikel 33 LRV).

* Adresse des Verfassers: THOMAS KÜNZLE, Geographisches Institut der Universität, KLIMET, Hallerstrasse 12, CH-3012 Bern

Die für die Region Bern geplanten Massnahmen sollen an dieser Stelle nicht im Detail erläutert werden. Sie sind in den Berichten des KIGA zusammengefasst (KIGA, 1990b–c; KIGA, 1991a).

Im vorliegenden Artikel sollen die Beziehungen zwischen den Emissionen (Schadstoffausstoss an den Quellen), der Transmission (Transport und Umwandlung) sowie den Luftimmissionen im Stadtgebiet von Bern aufgezeigt werden. Die wichtigsten Resultate der am Geographischen Institut der Universität Bern (GIUB) erstellten Immissionsanalysen werden zusammengefasst. Im Vordergrund der nachfolgenden Betrachtungen stehen die Stickoxide, da sie das Hauptproblem im Bereich der Luftverschmutzung im Stadtgebiet darstellen.

Bereits im Jahre 1986 wurde der Gemeinderat der Stadt Bern durch die Motion Guyer beauftragt, einen Situationsbericht bezüglich dem Lufthygienezustand abzufassen. Am GIUB wurden die Ausbreitungsberechnungen durchgeführt. Das Ziel der nachfolgend erstellten Arbeiten (AfUL, 1988; KÜNZLE, 1989a) war die Berechnung der Jahresmittelwerte von Stickstoffdioxid im Gebiet der Stadt Bern. Grundlage für die Arbeit war das von FILLIGER (1986) im Rahmen des interdisziplinären Projektes «Klima und Lufthygiene der Region Biel» entwickelte Gauss-Ausbreitungsmodell. Anhand von Prognosedaten auf der Emissionsseite wurden für die Jahre 1994 und 2000 die Auswirkungen der damals eingeleiteten Massnahmen aufgezeigt. Es wurde deutlich, dass bis 1994 die Einhaltung des Grenzwertes von 30 $\mu g/m^3$ vor allem entlang des Hauptverkehrsnetzes nicht erreicht werden kann, und dass in den Wohnquartieren die Prognosewerte erst im Bereich des Grenzwertes liegen.

WANNER (1983) hat in einem heuristischen Wirkungsgefüge die Ausbreitung von Luftschadstoffen dargestellt. Ausgegangen wird von der Emission, welche mit einer

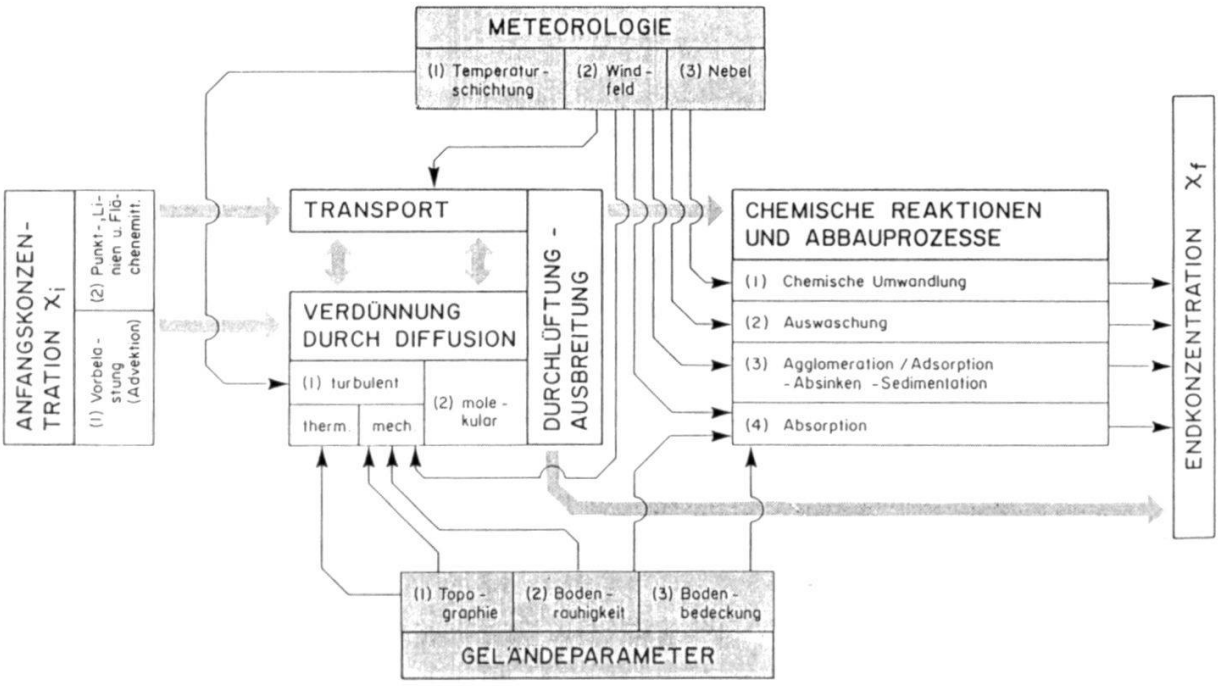
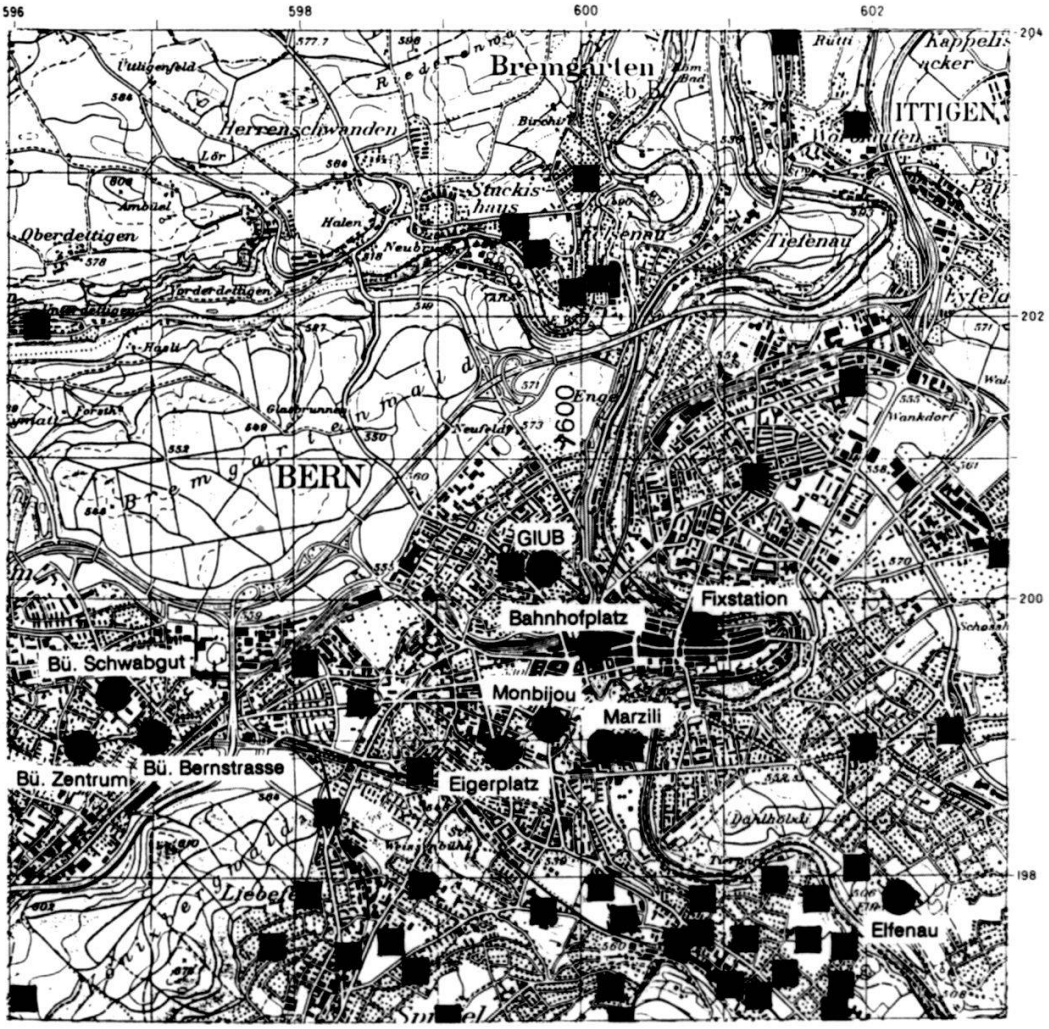


Abbildung 1: Heuristisches Wirkungsgefüge zur Ausbreitung von Luftfremdstoffen (WANNER, 1983).

bestimmten Menge und einem bestimmten Tages- und Jahresgang ausgestossen wird. Der Einfluss auf den Transport, die Umwandlung und die Verdünnung wird einerseits durch die meteorologischen und andererseits durch die Geländeparameter bewirkt. Die Geländeparameter sind vorwiegend stabile Elemente, die aber auch die meteorologischen Verhältnisse beeinflussen können.

Für die Durchlüftung eines Raumes ist die Temperaturschichtung, das Windfeld und die Turbulenz von entscheidender Bedeutung. Der Ausbreitungsraum ist bestimmt durch das Luftvolumen aus der gegebenen Reliefoberfläche, dem Strömungsfeld und der Mischungsschichthöhe. Diese Höhe mit freier Durchmischung ist abhängig von der Temperaturschichtung. Mit dem Windfeld, welches durch topographische Gegebenheiten beeinflusst wird, wird die Transportrichtung und die Verdünnungskapazität vorgegeben. Die ungeordnete Luftbewegung, welche der mittleren Luftströmung überlagert ist, wird als atmosphärische Turbulenz bezeichnet. Turbulenzen treten in verschiedenen Grössenordnungen auf und versuchen, bestehende Gegensätze von Eigenschaften bzw. Luftbeimengungen auszugleichen. Die Endkonzentration (Luftimmission) ist zudem abhängig von der



Reproduziert mit Bewilligung des Bundesamtes für Landestopographie vom 23.5.1991

Abbildung 2: Das Untersuchungsgebiet und Standorte der Luftimmissionsmessungen: Quadrat = Passivsammler-Messung, Kreis = Fixstation oder Messwagen (Ausschnitt aus der LK 243; Reduktion auf 71%).

Art und Intensität einer chemischen Umwandlung, Auswaschung, Sedimentation oder einer Absorption. Die chemischen Reaktionen und Umwandlungsprozesse sind, abgesehen von den rasch ablaufenden Umwandlungen (Oxidation von NO zu NO_2), für den relativ kleinen Untersuchungsraum von geringer Bedeutung. Die chemische Umwandlung der Stickoxide zu Salpetersäure (HNO_3), die Deposition und Auswaschung wird erst bei der Betrachtung von grösseren Untersuchungsgebieten wichtig.

Der Untersuchungsraum umfasst das Stadtgebiet von Bern mit einer Fläche von 49 km^2. In der Karte (Abb. 2) sind die Standorte der Immissionsmessstellen sowie des Geographischen Institutes eingetragen. An der Fixstation, welche sich an der Brunngasshalde befindet, werden seit dem Herbst 1987 die Luftschadstoffe analysiert. In der Zeitperiode von Herbst 1987 bis Dezember 1988 wurde zudem mit einem Messwagen an 8 verschiedenen Standorten im Stadtgebiet die Luftqualität untersucht. Seit 1989 werden an zahlreichen Standorten mit Passivsammlern die NO_2-Jahresmittelwerte ermittelt. Die Auswertungsergebnisse werden im Kapitel 4 besprochen. Nachfolgend soll zuerst in den Kapiteln 2 und 3 auf die Emissionssituation und die Ausbreitungsklimatologie im Untersuchungsgebiet eingegangen werden.

2. Die Emissionssituation

Für die Interpretation der aktuellen Luftimmissionen ist die Kenntnis der Menge ausgestossener Schadstoffe von entscheidender Bedeutung. Nachdem in einer Vorstudie (AfUL, 1988; Künzle, 1989a) aufgezeigt werden konnte, dass in der Stadt Bern die festgelegten Grenzwerte bis 1994 nur mit zusätzlichen Massnahmen eingehalten werden können, wurden in einer Hauptstudie neue Emissionskataster für das Stadtgebiet Bern und die umliegenden Gemeinden erarbeitet. Für diese Berechnungen wurde eine Ingenieurgemeinschaft (Infraconsult AG, Dr. Graf AG) beauftragt. In diesen Katastern wird angegeben, wieviele Kilogramm Stickoxide pro Hektare und Jahr von den Quellgruppen Verkehr, Hausbrand, Industrie und Gewerbe an die Umwelt abgegeben werden. Diese Schadstoffmengen wurden für den Ist-Zustand (1989/90) sowie für die Jahre 1995 und 2005 aufgrund der eingeleiteten und geplanten Massnahmen berechnet. Sie bilden nebst dem Meteodatensatz (Kapitel 3.4) die Grundlage für die Immissionsberechnung mit dem Ausbreitungsmodell des Geographischen Institutes.

In der Abbildung 3 sind die Stickoxid-Emissionen des Verkehrs für den Ist-Zustand und in Abbildung 4 die für das Jahr 2005 prognostizierten Emissionen dargestellt. Das Hauptverkehrsnetz ist deutlich erkennbar. Ein grosser Teil des Schadstoffausstosses erfolgt im Bereich der Autobahnen N12/N1/N6. Im Basisszenario werden Massnahmen berücksichtigt, die technisch machbar sind, die auf kantonaler Ebene realisiert werden können oder auf Bundesebene bereits näher geprüft werden (KIGA, 1991a). Mit verkehrsorganisatorischen und betrieblichen Massnahmen wird versucht, die Gesamtbelastung auf dem Verkehrsnetz zu verringern. Der Durchgangsverkehr soll auf ein Basisnetz kanalisiert werden. In den Quartierstrassen wird der Verkehr flächenhaft beruhigt. In Zukunft wird ein wachsender Anteil der NO_x-Emissionen des Verkehrs vom Schwerver-

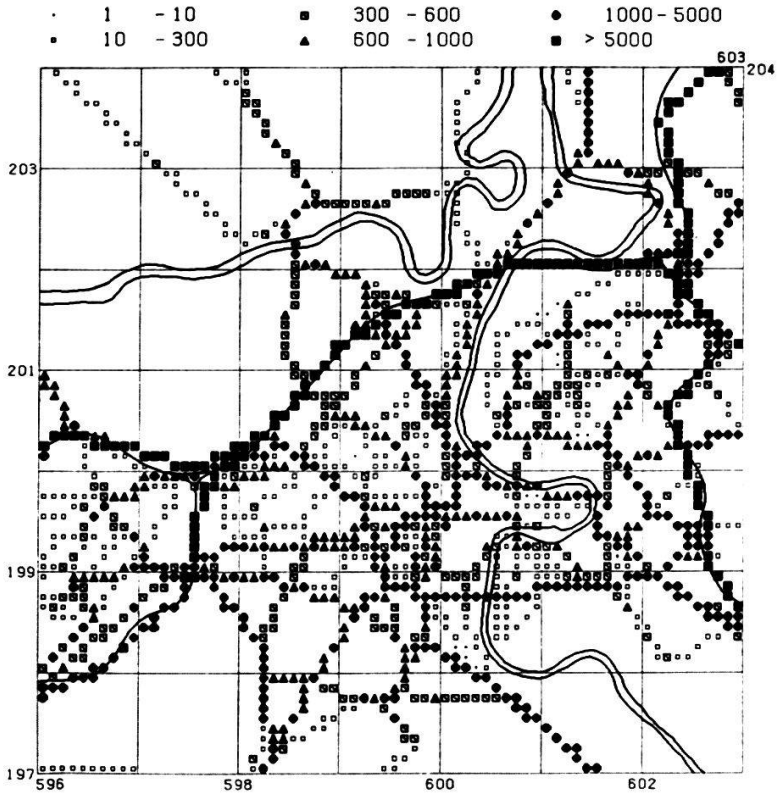


Abbildung 3: Stickoxid-Emissionen des Verkehrs im Ist-Zustand in kg pro Hektare und Jahr (Ausschnitt identisch mit Abb. 2; KÜNZLE, 1991b).

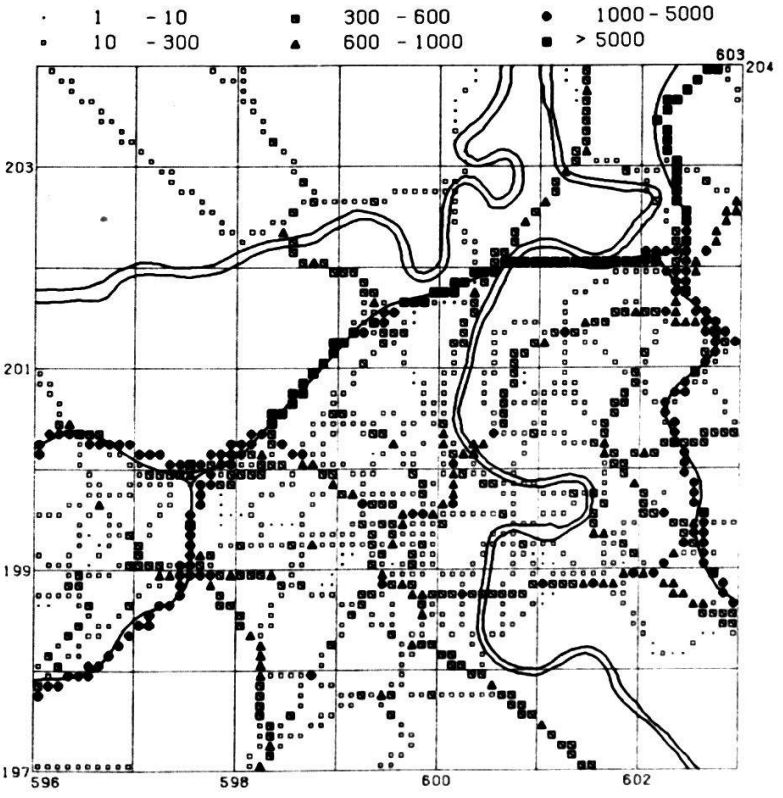


Abbildung 4: Stickoxid-Emissionen des Verkehrs im Jahre 2005 in kg pro Hektare und Jahr (Ausschnitt identisch mit Abb. 2; KÜNZLE, 1991b).

kehr stammen. Dies ist im wesentlichen auf die Einführung der Katalysatortechnik bei den Personenwagen zurückzuführen, die in den nächsten Jahren voraussichtlich zu einer Abnahme der NO_x-Emissionen führen wird.

Die Emissionen aus Feuerungsanlagen (Stickoxide aus Hausbrand, Industrie und Gewerbe) treten flächenhaft (teilweise punktuell; Abb. 5) auf. Dies im Gegensatz zur Linienquelle Verkehr.

Die Kehrichtverbrennungsanlage (Koordinate 598.2/199.5), der Grossemittent im Stadtgebiet, wird in den nachfolgenden Tabellen separat aufgeführt.

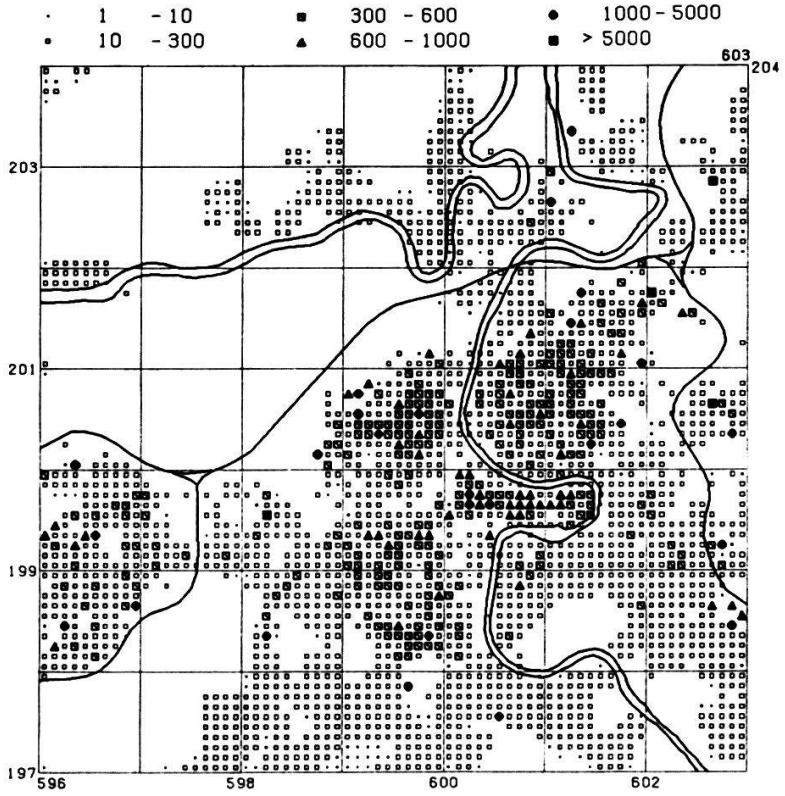


Abbildung 5: Stickoxid-Emissionen der Feuerungsanlagen im Ist-Zustand in kg pro Hektare und Jahr (Ausschnitt identisch mit Abb. 2; KÜNZLE, 1991b).

In der Tabelle 1 sind die Emissionswerte des Untersuchungsgebietes (49 km^2, gemäss Abb. 2) für die drei Zeitpunkte, getrennt nach Verursacher, zusammengestellt. Der Verkehr verursacht rund 80% der Stickoxid-Emissionen. Die Feuerungen haben heute einen Anteil von etwa 13% am Gesamtausstoss, die Kehrichtverbrennungsanlage (KVA) rund 8%. In Modellberechnungen (KÜNZLE, 1989a) konnte aufgezeigt werden, dass, trotz des massiven Schadstoffausstosses des Grossemittenten KVA, diese Quelle nur 1–2 $\mu g/m^3$ NO_2 zur totalen Luftbelastung in der nahen Umgebung beiträgt. Die Schadstofffracht wird durch die hohen Kamine in höhere Luftschichten abgegeben und von dort grossräumig verteilt und verdünnt.

Der Anteil des Verkehrs an der Gesamtemission wird sich in Zukunft nur leicht verringern. Die Feuerungsanlagen werden im Jahre 2005 gegen 20% der Stickoxide im Raum Bern ausstossen.

Tabelle 1: Stickoxidemissionen in kg pro Jahr im Ist-Zustand sowie in den Jahren 1995 und 2005 (Absolute Werte und Prozentwerte).

	Ist-Zustand		Jahr 1995		Jahr 2005	
Verkehr	2 465 059	79.5%	1 707 498	79,8%	1 005 724	76,7%
Feuerungen	397 570	12,8%	380 322	17,8%	253 749	19,3%
KVA	240 000	7,7%	52 000	2,4%	52 000	4,0%
Total	3 102 629	100,0%	2 139 820	100,0%	1 311 473	100,0%

Tabelle 2: Abnahme der Stickoxidemissionen vom Ist-Zustand bis 1995 resp. 2005 sowie von 1995 bis ins Jahr 2005 (Prozentwerte).

	Ist-Zustand		Jahr 1995		Jahr 2005
Verkehr	100,0%	→	69,3%	→	40,8%
			100,0%	→	58,9%
Feuerungen	100,0%	→	95,7%	→	63,8%
			100,0%	→	66,7%
KVA	100,0%	→	21,7%	→	21,7%
Total	100,0%	→	68,9%	→	42,3%
			100,0%	→	61,3%

In Abbildung 6 ist die prozentuale Abnahme der NO_x-Emissionen (vom Ist-Zustand bis 1995; oben sowie von 1995 bis 2005; unten) für die in Abbildung 3 gezeichneten Hektaren aufgezeigt. In über 27% der Hektaren wird der Schadstoffausstoss auf rund 70% des Ist-Zustandes reduziert. In diesem Bereich befinden sich die Hauptverkehrsachsen mit den grössten Emissionen (> 5000 kg/ha und Jahr; dunkle Balken). Für 112 Hektaren wird damit gerechnet, dass 1995 überhaupt keine Stickoxide mehr ausgestossen werden. In wenigen Hektaren wird infolge der mittleren Kanalisierung eine Zunahme auf über 120% des Ist-Zustandes erwartet. Im Jahre 2005 liegen die Emissionswerte des Verkehrs in der Grössenordnung zwischen 30% und 70% der Werte von 1995. Im Bereich der Autobahnen (> 5000 kg/ha und Jahr) wird mit einer Abnahme auf rund 65% des Zustandes von 1995 gerechnet.

Bis 1995 ist im Bereich der Feuerungen nur eine geringfügige, relativ konstante Abnahme in allen Hektaren um etwa 5% zu erwarten. Diese Verminderung erfolgt aufgrund von technischen Massnahmen sowie Massnahmen zur Reduktion des Energieverbrauches. Es wird erwartet, dass erst nach 1995 wirkungsvollere Reduktionen im Schadstoffausstoss erzielt werden können.

Bis zum Jahre 1995 wird durch die in den Teilmassnahmenplänen für die Region Bern (KIGA, 1990b–c; KIGA, 1991a) aufgeführten Massnahmen eine Verminderung der NO_x-Emissionen um rund 30% erreicht (Tab. 2). Bis 2005 beträgt die Minderung etwa 60% des Ist-Zustandes. Die Hauptziele der LRV (1985), nämlich die Einhaltung der Immissionsgrenzwerte für NO_2 bis 1994 und die Senkung der Emissionen auf den Stand der sechziger Jahre, können jedoch nur erreicht werden, wenn der Schadstoffausstoss bis 1995 um rund 60% reduziert wird.

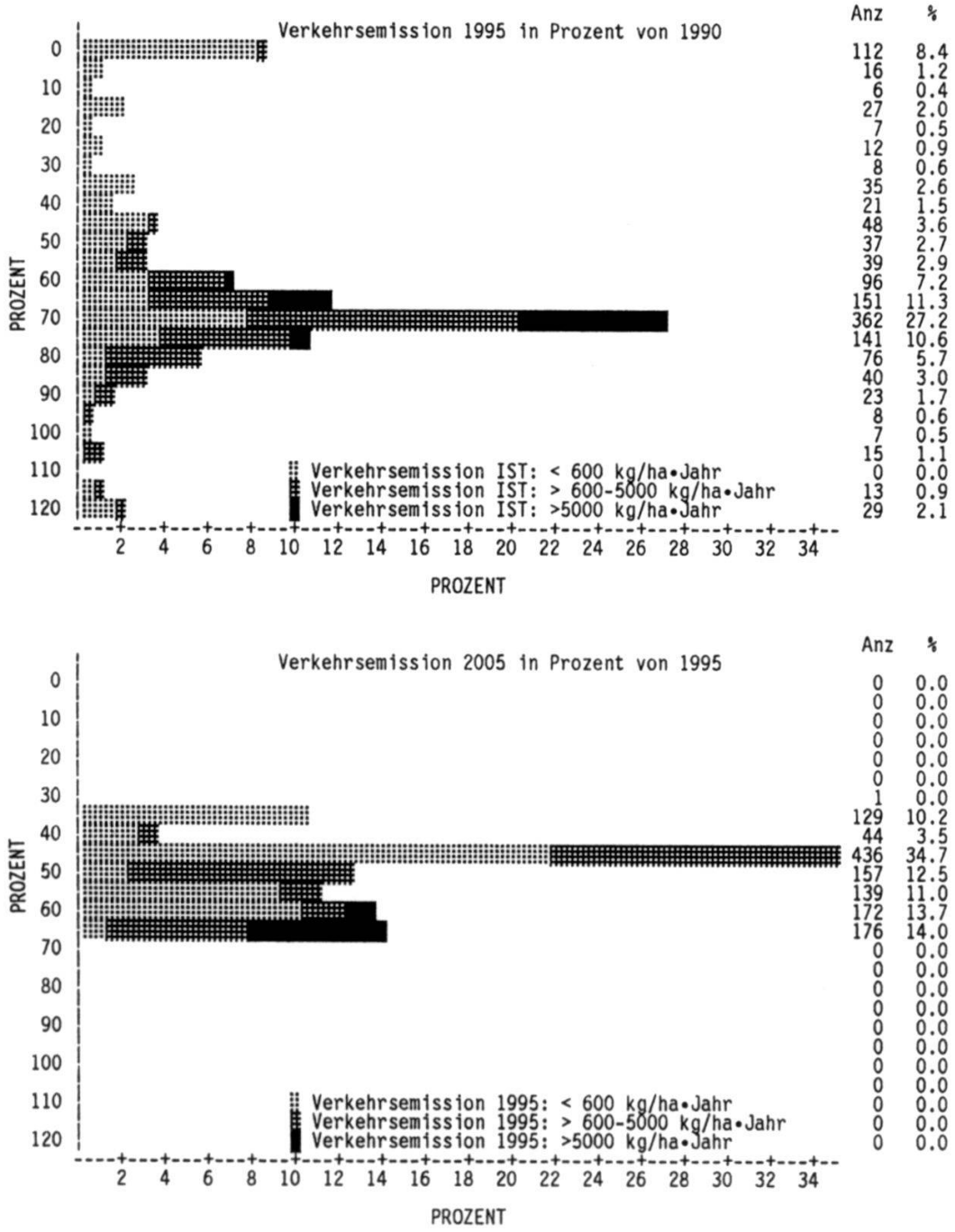


Abbildung 6: Prozentuale Abnahme der Verkehrsemissionen vom Ist-Zustand bis 1995 (oben; sowie von 1995 bis 2005; unten) in Prozent der Hektarflächen mit Verkehrsemissionen.

3. Das Ausbreitungsklima

Das Ausbreitungsklima spielt eine entscheidende Rolle in der Wirkungskette zwischen dem Schadstoffausstoss und der Luftbelastungssituation. Nachfolgend sollen als wichtigste Parameter das Windfeld (Windrichtung und -geschwindigkeit), die Temperaturschichtung sowie der Turbulenzzustand betrachtet werden.

3.1 Das Windfeld

Untersuchungen über das Windfeld im Stadtgebiet von Bern und der näheren Umgebung haben am Geographischen Institut der Universität Bern eine lange Tradition. Anfangs der siebziger Jahre wurde im Rahmen des Forschungsprogrammes KLIMUS (Klima und Umweltschutz) Datenmaterial für stadtklimatologische und lufthygienische Untersuchungen erhoben. Die Ergebnisse sind in der Reihe «Beiträge zum Klima der Region Bern» erschienen. Eine Zusammenfassung und Synthese ist im Schlussbericht (MATHYS et al., 1980) ersichtlich. Die Durchlüftungsverhältnisse im Aaretal wurden im weiteren von BAUMGARTNER (1981), BERLINCOURT (1980) und SCHORER (1983) untersucht.

Die Geschichte der Meteorologie und Klimatologie an der Universität Bern wurde von WANNER (1988) aufgearbeitet. Es wird aufgezeigt, in welchem Zeitraum an verschiedenen Standorten in Bern meteorologische Messungen erfolgten. Die offizielle Station der Schweizerischen Meteorologischen Anstalt (SMA) wurde im Jahre 1977 von der Sidlerstrasse (Institut für Exakte Wissenschaften) ins Liebefeld verlegt. Somit war in Bern keine eigentliche Stadtstation mehr vorhanden. Von der Gruppe für Klimatologie und Meteorologie wurde deshalb auf dem Dach des Geographischen Institutes eine eigene Wetterstation eingerichtet und betrieben.

Der Standort der GIUB-Messstelle an der Hallerstrasse befindet sich auf gleichem Höhenniveau wie die Dächer der umliegenden Gebäude. Die Messwerte dürfen als repräsentativ und aussagekräftig für eine Station in der Stadt angesehen werden. Die Windmessungen 10 m über Dachniveau sind ungestört durch Gebäude und andere Hindernisse. Seit 1987 werden vom Amt für Umweltschutz und Lebensmittelkontrolle nebst den Luftimmissionen auch meteorologische Parameter gemessen.

Die Ventilation in Bern wird geprägt durch die Gradientwinde im Mittelland (Nordost- und Südwestwinde) sowie vom Aaretalwind (Südostwinde). Die übergeordneten Windströmungen werden durch das Relief und die Bodenreibung modifiziert und kanalisiert. In Abbildung 7 sind die Stundenwindrosen für den Zeitraum Januar–Dezember 1989 aufgezeichnet. Die prozentuale Häufigkeit der Windrichtungen ist für die einzelnen Stunden für beide Meteostationen (GIUB, Fixstation AfUL) aufgezeichnet. Somit können die Unterschiede und Gemeinsamkeiten an den zwei Standorten (siehe Abb. 2) verglichen werden.

Die grosse Häufigkeit von schwachen Südostwinden in den frühen Morgenstunden ist sehr ausgeprägt und typisch für das Stadtgebiet von Bern. Sie ist mit der Berg- und Talwindzirkulation zu erklären. In der Nacht kühlt sich die hangnahe Luft im Berner Oberland und im Aaretal infolge der Ausstrahlung des Bodens stärker ab, als die Luft im gleichen Niveau der freien Atmosphäre. Daraus entwickeln sich unter dem Einfluss der Schwerkraft kalte Hangabwinde. Diese erzeugen nach dem Zusammenströmen im Talgrund einen gegen den Talausgang gerichteten Bergwind. Nach Sonnenaufgang setzen, infolge der Erwärmung der besonnten Hänge und des damit verbundenen thermischen Auftriebes der hangnahen Luft, Hangaufwinde ein. Diese entwickeln sich im Verlaufe des Tages zu einem Talwind, einer talaufwärts gerichteten Strömung. Mit grosser Regelmässigkeit wechselt gegen Mittag bei der Station an der Brunngasshalde (AfUL) die

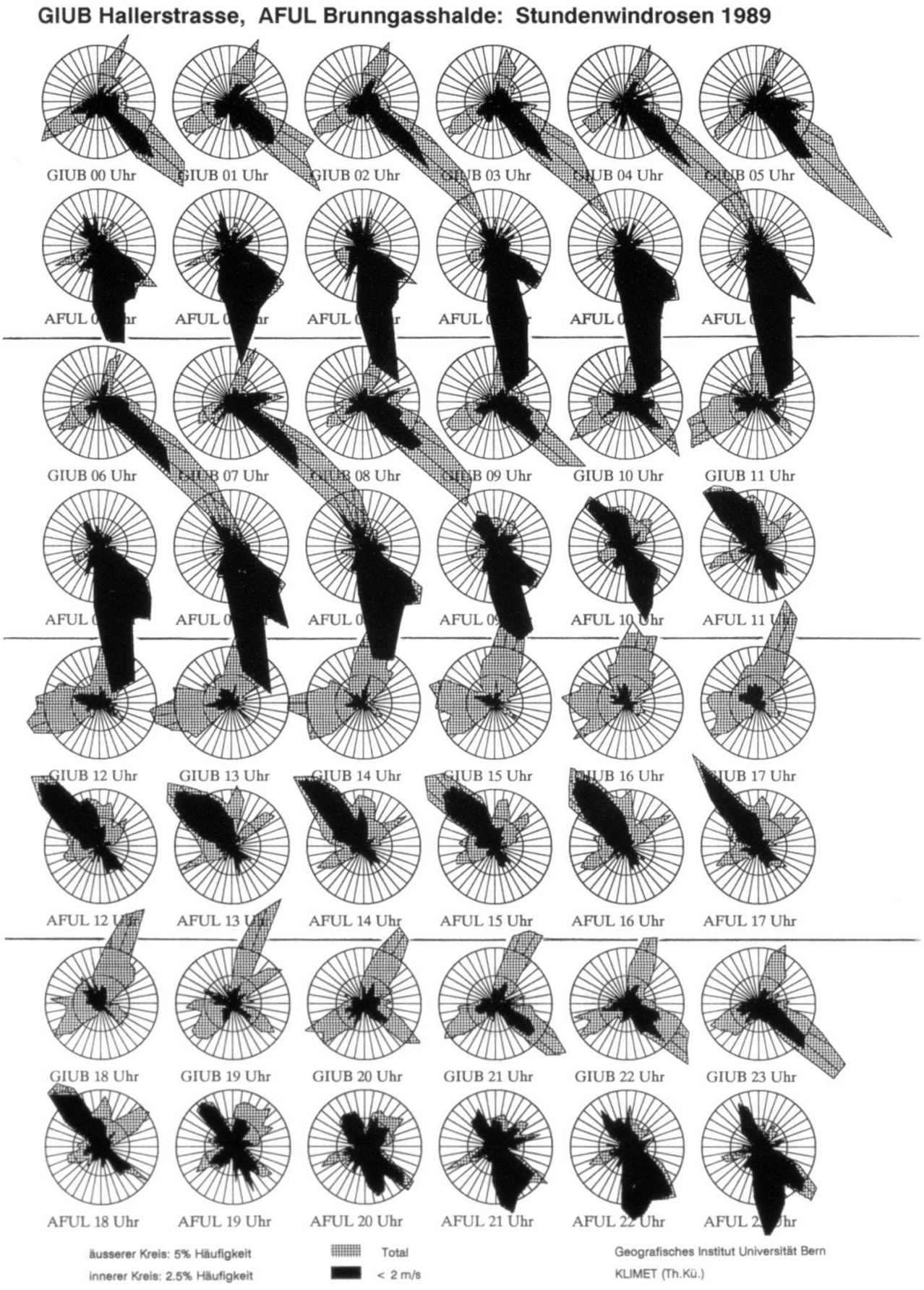


Abbildung 7: Stundenwindrosen an den Meteostationen GIUB und AfUL im Jahre 1989.

Windrichtung fast schlagartig von Südost auf Nordwest. Der Talwind wird bei der Messstation in der Altstadt (AfUL) am Nachmittag als Nordwestwind registriert. Am Standort GIUB werden bei diesen Bedingungen WNW- oder Nordwinde festgestellt. Die Südwestwinde sind an Schlechtwetterperioden gekoppelt. Ostwinde (Bise) werden meistens bei schönem Wetter erfasst. Der Einfluss der lokalen Topographie bewirkt Unterschiede in der Windherkunft.

3.2 Die Temperaturschichtung

Nebst der Windrichtung und der Windgeschwindigkeit spielt die Inversionshöhe bei der Schadstoffausbreitung eine wichtige Rolle. Normalerweise nimmt die Temperatur mit zunehmender Höhe ab (negativer Temperaturgradient). Eine Temperaturumkehr oder Inversion liegt bei zunehmender Temperatur mit der Höhe vor (positiver Temperaturgradient). Als Sperrschicht in der Atmosphäre bildet sie wegen der in ihr herrschenden grossen Vertikalstabilität der Temperaturschichtung für alle konvektiven oder turbulenten Bewegungen, Austauschprozesse und Durchmischungsvorgänge eine nahezu undurchdringliche Grenzfläche. Die Höhe der Sperrschicht variiert in der Natur stark. Sie kann in Extremfällen sehr bodennah sein, bei stark konvektiven Situationen jedoch weit höher als 1 km liegen. Die Obergrenze der Inversion (Mischungsschicht) ist in der Natur als Dunst- oder Nebelobergrenzen ersichtlich.

In Abbildung 8 (oben) ist der prozentuale Anteil der Inversionshöhen im Tagesverlauf aufgezeichnet. Der Anteil der tiefliegenden Inversionshöhen (100 m) ist um Mitternacht maximal und nimmt in den frühen Morgenstunden rasch ab. Die tiefen Sperrschichten haben ihr Maximum hauptsächlich im Windrichtungsbereich Südost (127 Grad; Abb. 8 unten). Die nächtlichen Kaltluftabflüsse aus dem Aaretal bewirken eine wenig mächtige Luftschicht, in der die Ausbreitungskapazität beschränkt ist. Bei der Inversionshöhe 300 m sind die prozentualen Unterschiede im Tagesgang und in der Unterteilung nach der Windrichtung geringer. Die 300 m Inversionshöhen können bei tagelangen Hochnebellagen sowie im Übergangsbereich zwischen Tag und Nacht vorkommen. Eine gut durchmischte Atmosphäre mit einer Obergrenze der atmosphärischen Grenzschicht von 1 km wird v.a. für die Zeit um Mittag (Westwindbereich, Bisenlagen) festgestellt, mit einem Maximum für die Stunden von 14 bis 16 Uhr.

3.3 Der Turbulenzzustand

Man unterscheidet zwei Arten von Turbulenzen: Die dynamische (mechanische) Turbulenz wird ausgelöst durch die Reibung an der Erdoberfläche. Die Intensität hängt von der Windgeschwindigkeit, der Stabilität sowie von der Grösse und der Beschaffenheit der Hindernisse an der Erdoberfläche ab. Die thermische Turbulenz wird ausgelöst, sofern die Erdoberfläche infolge der Sonneneinstrahlung wärmer ist, als die darüberliegende Luftschicht. Es entstehen ungeordnete Vertikalbewegungen, indem erwärmte Luft in Form von

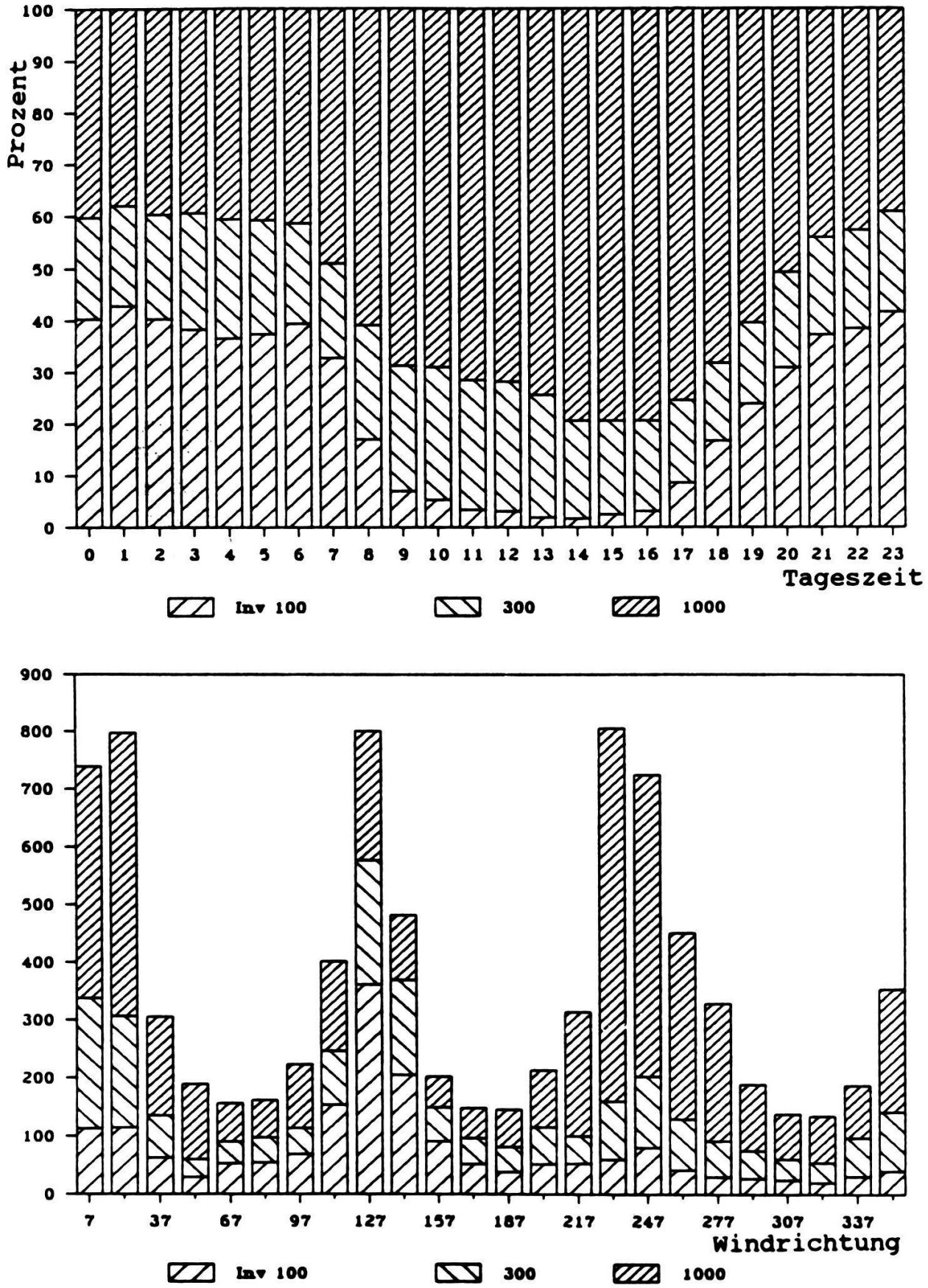


Abbildung 8: Prozentuale Anteile von Inversionshöhen im Tagesgang (oben) und Anzahl Stunden, unterteilt nach der Windrichtung (unten; KÜNZLE, 1989a).

warmen Luftblasen durch die kältere Atmosphäre aufsteigt. Die Intensität ist abhängig von der Temperaturschichtung.

Der Turbulenzzustand der Atmosphäre wird bei der Immissionsberechnung mit der Windrichtungsfluktuation (Standardabweichung) als Mass für den Austausch von Schadstoffen in der Ebene sowie der Vertikalwindgeschwindigkeitsfluktuation (Funktion der Strahlungsbilanz und der Windgeschwindigkeit) als Mass für die vertikale Austauschkapazität berücksichtigt. Aus diesen Werten werden die Ausbreitungsparameter bestimmt, welche in der Berechnung mit dem Gaussmodell die Verdünnung der Schadstoffe mit zunehmender Distanz von der Quelle bestimmen.

3.4 Der Datensatz für die Ausbreitungsmodellierung

Als Input für die Modellierung mit dem Gauss-Ausbreitungsmodell werden die stündlichen Kombinationen von Windrichtung, Inversionshöhe, Windrichtungsfluktuation und Vertikalwindgeschwindigkeitsfluktuation benötigt. Theoretisch sind mit den 36 Windrichtungs- sowie den 3 Inversionshöhen- und je 4 Fluktuationsklassen 1728 Kombinationen möglich. Es wird daher nur mit 24 Richtungsklassen gearbeitet, pro Windrichtungsklasse also 15 Grad. Von diesen $24 \cdot 3 \cdot 4 \cdot 4 = 1152$ möglichen Kombinationen kommen über 800 vor. Bei sehr vielen dieser Kombinationen gibt es jedoch nur einzelne Beobachtungen. Diese müssen umklassiert werden. Der Grund liegt im Programmaufbau des Modells sowie im Zeitaufwand für die Modellberechnung, denn für jede Kombination wird anhand des Emissionskatasters ein Konzentrationsmuster gerechnet. Zuerst wird die Windrichtungsfluktuation zusammengefasst, weil die daraus berechneten Ausbreitungsparameter im Gaussmodell wenig sensitiv reagieren (FILLIGER, 1986), dann folgen die Windrichtung und die Inversionshöhe. Die Vertikalwindgeschwindigkeitsfluktuation wird nicht umklassiert, da dieser Wert in der Modellberechnung am meisten Bedeutung hat. Der Datensatz wird so aufbereitet, dass zu allen rund 220 resultierenden Kombinationen der obigen vier Parameter die entsprechenden Stundenwerte der Lufttemperatur und der Windgeschwindigkeit der Messstation GIUB abgespeichert werden. Die Modellresultate werden im Kapitel 4.3 erläutert.

4. Die Immissionssituation

4.1 Der mittlere Tagesgang von Luftfremdstoffen

In diesem Kapitel wird aufgezeigt, zu welchem Zeitpunkt im Mittel über den Zeitraum eines halben Jahres die höchsten bzw. tiefsten Luftimmissionswerte (Schadstoffkonzentrationen in $\mu g/m^3$) an der Fixstation Brunngasshalde registriert werden. In der Abbildung 9 sind die mittleren Tagesgänge der Stickoxide und von Ozon aufgezeichnet. Dabei erfolgt eine Unterteilung in Winter- (Oktober–März) und Sommerhalbjahr 1989 (April–Septem-

ber). Die Tagesgänge der Werktage (Montage–Freitage), Samstage und Sonntage sind getrennt dargestellt.

Die für kurze Zeitperioden berechneten Mittelwerte (Stunden- und Tagesmittelwerte) können je nach der aktuellen Wettersituation sehr hohe, aber auch tiefe Konzentrationen aufweisen. Im Winterhalbjahr steigen die Stickoxide bei langandauernden Inversionslagen auf zum Teil sehr hohe Werte. An regnerischen Sommertagen bleiben z.B. die Ozonwerte gering. An warmen, sonnigen Tagen muss jedoch mit hohen Ozonkonzentrationen gerechnet werden. Bei der Interpretation von Luftimmissionsdaten eines längeren Zeitraumes (Jahresmittelwert, Mittelwerte pro Halbjahr) kann davon ausgegangen werden, dass sich die meteorologischen Bedingungen ausgleichen. Die dargestellten, durchschnittlichen Belastungen können nicht mit verschiedenen Ausbreitungsbedingungen erklärt werden, sondern veranschaulichen die generelle Situation, bedingt durch den Schadstoffausstoss und die anschliessende Umwandlung.

4.11 Stickstoffmonoxid (NO)

Als Stickoxide (NO_x) wird die Summe aus Stickstoffmonoxid (NO) und Stickstoffdioxid (NO_2) verstanden. Der Verkehr ist zu rund 80% für deren Ausstoss verantwortlich. Die aus Verbrennungsprozessen stammenden Stickoxide werden zu über 90% als Stickstoffmonoxid ausgestossen. Anschliessend erfolgt eine Umwandlung zu Stickstoffdioxid (NO_2). Die Intensität dieser Umwandlung ist von meteorologischen und chemischen Bedingungen in der bodennahen Luftschicht abhängig. Die gemessenen und dargestellten Stickstoffmonoxid-Immissionswerte können also direkt den Schadstoffquellen in der näheren Umgebung der Immissionsmessstation zugeordnet werden.

Werktags (Montag–Freitag) ist nach 6 Uhr ein markanter Anstieg der gemessenen Luftimmissionen festzustellen. Die Morgenspitze erreicht um 8 Uhr das Maximum. Im Winterhalbjahr (Abb. 9; links) bleiben die NO-Konzentrationen auch um die Mittagszeit und am Nachmittag hoch. Gegen Abend ist ein zweiter deutlicher Anstieg der Stickstoffmonoxid-Immissionen bedingt durch den Abendverkehr zu erkennen.

NO wird vor allem durch Ozon zu Stickstoffdioxid umgewandelt. Im Winterhalbjahr treten jedoch kaum hohe Ozonkonzentrationen auf. Wenn im Stadtgebiet das Ozonangebot aufgebraucht ist, kann sich Stickstoffmonoxid in der Luft anreichern. Dies ist der Grund für die hohen NO-Immissionswerte am Nachmittag und in den Abendstunden des Winterhalbjahres. Im Sommerhalbjahr (Abb. 9; rechts) ist die Morgenspitze der mittleren NO-Immissionen ebenso deutlich erkennbar wie im Winter, die NO-Konzentrationen sind am Nachmittag und Abend jedoch deutlich tiefer. Der Grund für die tieferen NO-Konzentrationen gegenüber dem Winterhalbjahr ist in der chemischen Umwandlung von NO zu NO_2 zu suchen. Mit zunehmender Sonneneinstrahlung im Verlaufe des Morgens beginnt der Ozonbildungsprozess. Bei diesen Bedingungen erfolgt eine rasche Reaktion der ausgestossenen Schadstoffe zu Folgeprodukten. Da das Stickstoffmonoxid durch Ozon zu NO_2 umgewandelt wird, steigen die mittleren NO-Werte erst wieder am späten Abend an, wenn der grösste Teil des Ozons abgebaut ist.

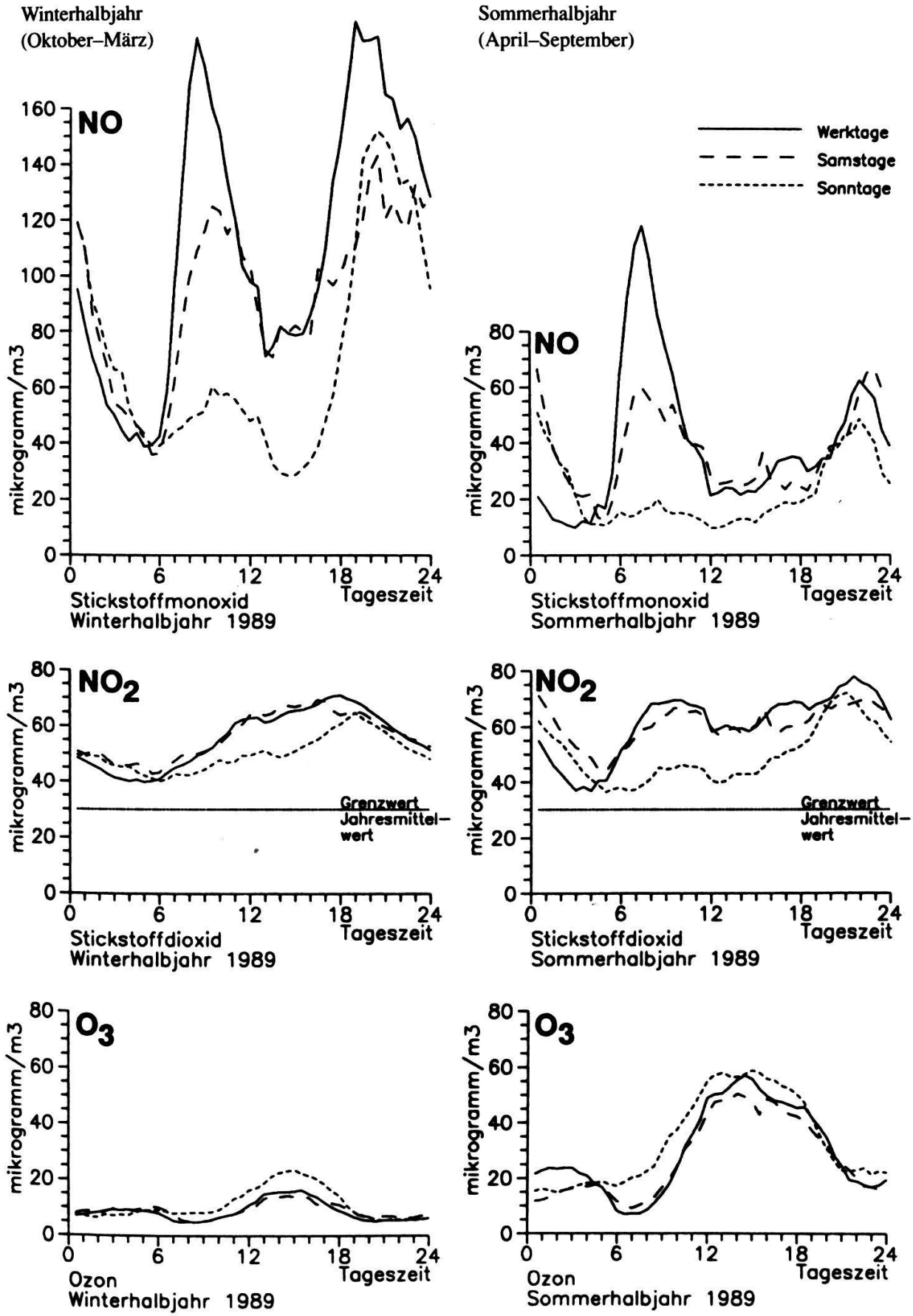


Abbildung 9: Mittlere Tagesgänge von Luftfremdstoffen an der Fixstation Brunngasshalde.

Die Zeitangaben in der Abbildung 9 beziehen sich immer auf Mitteleuropäische Zeit (MEZ). Im Sommerhalbjahr wird der Anstieg der Luftimmissionswerte bereits ab 5 Uhr MEZ (entspricht 6 Uhr Sommerzeit) registriert. Die Zeitverschiebung um eine Stunde (Sommerzeit–1 Stunde = MEZ) ist aus den Luftfremdstoffmessungen deutlich erkennbar.

Die NO-Immissionen sind an Samstagen tiefer als an den Werktagen. Sonntags sind sie nochmals markant niedriger. Da die für die Schadstoffausbreitung verantwortlichen meteorologischen Bedingungen keine Unterschiede in der Intensität des Auftretens zwischen den Werktagen und dem Wochenende zeigen, muss die unterschiedliche Luftimmissionsstruktur mit der unterschiedlichen Menge an ausgestossenen Schadstoffen erklärt werden.

Die Feuerungsanlagen in der Umgebung der Messstation laufen an den Wochenenden kaum gedrosselter, abgesehen von einigen Geschäfts- oder Bürolokalen. Deshalb die Annahme, dass die tieferen Stickstoffmonoxid-Immissionen am Wochenende und vor allem das Fehlen einer Morgenspitze durch das niedrigere Verkehrsaufkommen (s. Abb. 10) zu erklären sind. Es ist eine deutliche Beziehung zwischen dem zeitlichen Auftreten der NO-Immissionen und dem Verkehrsaufkommen zu erkennen.

Am Sonntagmorgen (6–12 Uhr) herrscht in der Stadt allgemein wenig Verkehr. Demzufolge fehlt der an den übrigen Tagen deutliche Anstieg der Stickstoffmonoxidkonzentration. Zu diesem Zeitpunkt werden möglicherweise an anderen Messstellen, z.B. an Verkehrsachsen zu Erholungsgebieten, höhere Luftbelastungswerte registriert.

Der Tagesgang sowie das Ausmass des Schadstoffausstosses und der Luftbelastung ist vom Standort der Messung abhängig. Die oben aufgeführten Interpretationen sind also nur für Standorte gültig, welche ein ähnliches Verkehrsaufkommen wie an der Brunngasshalde und in der näheren Umgebung aufweisen. Vereinfacht gesagt gilt dies für die Hauptverkehrsachsen im Stadtgebiet. Die Messstation an der Brunngasshalde ermittelt die Luftimmissionen im Zentrum von Bern. Die verkehrsbedingte Luftbelastung ist geprägt durch das Verkehrsnetz in der näheren Umgebung. Auf den zentrumsnahen Stadtstrassen werden nicht so stark ausgeprägte Verkehrsspitzen festgestellt wie an Strassenverbindungen vom Umland in das Stadtzentrum, wo infolge des Pendlerverkehrs zwei markante Verkehrsspitzen (am Morgen und am Abend) mit entsprechend hohem Schadstoffausstoss festzustellen sind.

Verkehrszählungen an der Postgasshalde durch das Stadtplanungsamt der Stadt Bern ergeben den abgebildeten Tagesgang des Verkehrsaufkommens. Es sind die prozentualen Anteile für die Werktage, Samstage und Sonntage aufgezeichnet (Abb. 10). Es muss betont werden, dass der durchschnittliche Tagesverkehr (Anzahl Fahrzeuge) am Wochenende klar niedriger ist (Werktage = 100%, Samstage = 95%, Sonntage= 66%).

4.12 Stickstoffdioxid (NO_2)

Mit zunehmendem Schadstoffausstoss steigen nach 6 Uhr auch die gemessenen Stickstoffdioxid-Immissionen. Die NO_2-Luftbelastung in den nachfolgenden Stunden ist bedingt durch die Umwandlung des NO zu NO_2. Peroxyradikale und das Ozon sind zu einem wesentlichen Teil für diese Reaktionen verantwortlich. Im Sommerhalbjahr kann im

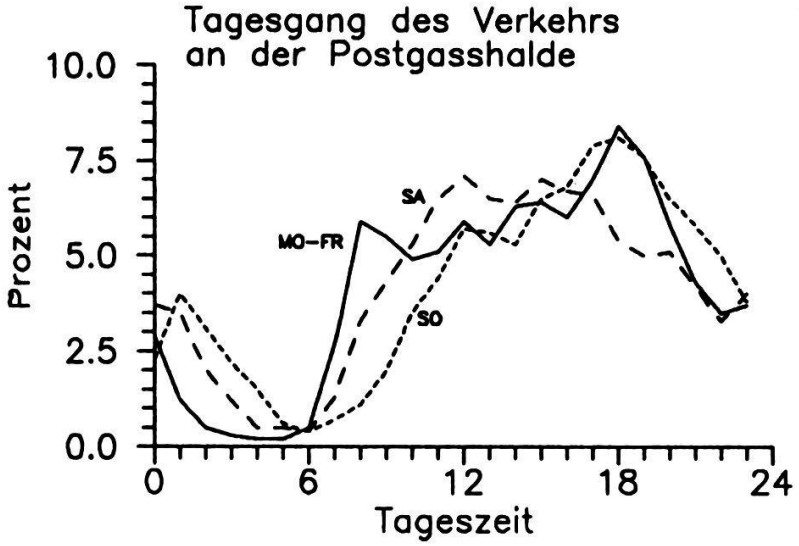


Abbildung 10: Der Tagesgang des Verkehrsaufkommens in der Nähe der Fixstation Bern.

Unterschied zum Winterhalbjahr keine Abnahme der NO_2-Konzentration am späten Abend festgestellt werden. Der von den Schadstoffquellen verursachte NO-Ausstoss wird fortlaufend mit dem in der Stadtluft vorhandenen Ozon zu NO_2 umgewandelt. Dieser Prozess dauert bis gegen Mitternacht. Zu dieser Zeit sind auch die niedrigsten Ozonwerte zu verzeichnen. Man stellt fest, dass die durchschnittlichen Konzentrationen meistens massiv über dem Grenzwert von 30 $\mu g/m^3$ für das Jahresmittel liegen.

Am Sonntag werden im Mittel über die Zeitperiode eines halben Jahres deutlich tiefere NO_2-Konzentrationen gemessen. Der reduzierte Schadstoffausstoss hat eine direkte und sofortige Auswirkung auf die Luftbelastung. Dies unterstreicht die Tatsache, dass die Luftbelastung mit Stickstoffdioxid, dem wichtigsten Problemgas im Stadtgebiet, zum grossen Teil durch lokale Verursacher erklärt werden kann. In den frühen Morgenstunden (0 bis 4 Uhr) der Samstage und Sonntage sind die Stickoxidwerte deutlich höher als an den übrigen Werktagen. Kann dies mit dem längeren Aufenthalt der Bevölkerung im Stadtzentrum erklärt werden? Am Freitag- und Samstagabend fahren viele Stadtbesucher erst nach Mitternacht nach Hause. Verkehrszählungsdaten unterstützen diese Hypothese. Die direkte Beziehung zwischen der Anzahl Fahrzeuge und der Luftbelastung kann somit deutlich aufgezeigt werden.

4.13 Ozon (O_3)

Die mittleren Ozonkonzentrationen sind im Winterhalbjahr tief. Das natürlich vorkommende Ozon in der Stratosphäre (15–35 km Höhe) kann durch starke Umwälzungen in die unteren Luftschichten heruntergemischt werden. Diese Prozesse können jedoch nur bei starken Stürmen im Frühjahr und Herbst beobachtet werden und tragen zur Ozonkonzentration in Bodennähe nur unbedeutend bei.

Ozon kann im Sommerhalbjahr zu einem problematischen Luftfremdstoff werden. Vor allem an ländlichen Messstationen werden oftmals die in der Luftreinhalte-Verordnung

festgelegten Grenzwerte überschritten. Im Stadtgebiet werden dagegen deutlich weniger hohe Ozonwerte registriert, weil Ozon bei der Umwandlung von Stickstoffmonoxid (NO) zu Stickstoffdioxid (NO_2) verbraucht und dementsprechend abgebaut wird. Man beobachtet die tieferen Ozonmittelwerte genau im gleichen Zeitraum (6 bis 9 Uhr) wie die hohen Stickstoffmonoxid-Immissionen. Das Ozon oxidiert das NO zu NO_2 und wird dabei vermindert. Mit dem Einsetzen des Stickoxidausstosses am Morgen wird im Sommerhalbjahr bei verstärkter Sonneneinstrahlung der Ozonbildungsprozess in Gang gebracht. Ozon wird aus den Vorläufersubstanzen (Stickoxide und flüchtige organische Verbindungen) gebildet. Man erkennt in den Nachmittagsstunden deutlich ein Maximum der gemessenen Konzentrationen. Nach Sonnenuntergang wird die Ozonproduktion gestoppt. Es folgt ein Ozonabbau im Stadtgebiet. Wie oben beschrieben, bewirkt der Schadstoffausstoss des Abendverkehrs einen Abbau des Ozons. Im Sommer 1990 wurde in Bern während 53 Stunden der Grenzwert für den höchsten Stundenmittelwert überschritten. An ländlichen Messstationen ist die Dauer der Grenzwertüberschreitungen jedoch wesentlich höher. Das Ozonproblem betrifft somit vor allem die Bevölkerung abseits der Stadtgebiete. Im ländlichen Gebiet kann das Ozon am Abend weniger stark abgebaut werden, da in diesen Gebieten die für den Abbau erforderlichen Primärschadstoffe (NO) niedriger sind. Die in den Grafiken dargestellten Mittelwerte können nicht direkt mit den in der Luftreinhalte-Verordnung festgelegten Grenzwerten (höchster Stundenmittelwert von 120 $\mu g/m^3$, 98%-Wert) verglichen werden. Hier sind die durchschnittlichen Halbstundenmittelwerte aufgezeichnet.

Es kann kein grosser Unterschied der mittleren Ozonkonzentrationen zwischen den Werktagen und dem Wochenende festgestellt werden. Die mittleren Ozon-Immissionen sind am Sonntag eher höher als an den Werktagen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass am Sonntag allgemein weniger Stickoxide ausgestossen werden, welche das Ozon abbauen. Der Lufttransport aus dem Stadtumland, wo die Ozonkonzentrationen höher als im Zentrum sind, bewirkt die höheren mittleren Ozonwerte. Dies verdeutlicht die Problematik, dass eine Reduktion der Stickoxide nicht eine sofortige Ozonreduktion zur Folge haben muss, da im Stadtgebiet die Ozonkonzentrationen allgemein tiefer sind als in der übrigen bodennahen Luftschicht.

Im Sommer belasten nebst hohen NO_2-Werten v.a. auch hohe Ozonkonzentrationen die Luft. Wollen in Zukunft diese Immissionen reduziert werden, so müssen sowohl der Ausstoss der Stickoxide als auch der flüchtigen organischen Verbindungen gesenkt werden. Diese Reduktion muss grossräumig und massiv erfolgen.

4.2 Schadstoffrosen und Schadstoffdosisrosen

In Abbildung 11 sind Schadstoff-Windrosen (links) und Schadstoff-Dosis-Windrosen (rechts) von Stickstoffmonoxid (NO), Stickstoffdioxid (NO_2) und Ozon (O_3) für das Winter- und Sommerhalbjahr 1988 dargestellt. Jeder Schadstoff-Halbstundenmittelwert wird der im gleichen Messintervall herrschenden Windrichtung (Standort AfUL) zugeordnet. Für alle 36 Windrichtungssektoren werden anschliessend die Mittelwerte der Kon-

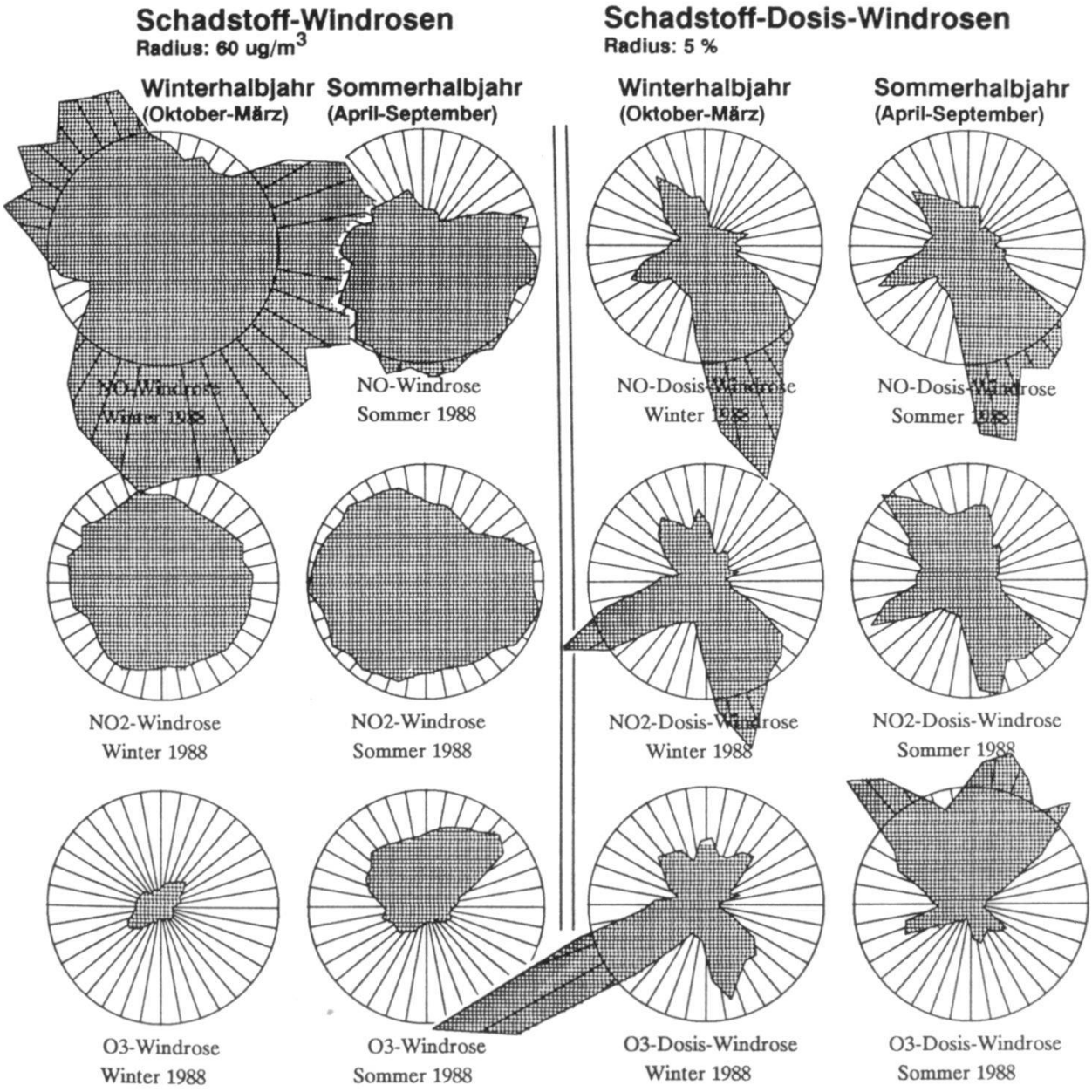


Abbildung 11: Schadstoff-Windrosen und Schadstoff-Dosis-Windrosen an der Messstation Bern Brunngasshalde.

zentrationen gebildet. Trägt man diese Mittelwerte in Kreiskoordinaten über die Windrichtung auf, so erhält man nach BAUMBACH (1990) die sogenannte Schadstoff-Windrose. Treten in bestimmten Sektoren der Schadstoff-Windrose Ausbeulungen der Konzentrationskurve auf, dann bedeutet dies, dass bei Wind aus dieser Richtung erhöhte Luftverunreinigungs-Konzentrationen auftreten oder herantransportiert werden. Aus den dargestellten Schadstoff-Windrosen kann man folgendes erkennen: Die höchsten NO-Konzentrationen treten im Winterhalbjahr (Oktober–März) bei Wind aus Südosten auf. Im Kapitel 3.1 wurde dargelegt, dass diese SE-Winde vor allem nachts und in den frühen Morgenstunden auftreten. Die Morgenspitze der Verkehrsemissionen liegt in dieser Zeitperiode mit häufigen, tiefliegenden Inversionen und Schwachwindlagen. Bei Süd-

westwinden und Nordostwinden (Bise) sind im Mittel die niedrigsten Konzentrationen anzutreffen. Dies kann aufgrund der höheren Windgeschwindigkeit (bessere und raschere Durchmischung) in diesen beiden Sektoren erklärt werden. Die mittleren NO-Immissionen sind im Sommerhalbjahr generell deutlich tiefer. Bei Wind aus NW bis NE sind die mittleren Konzentrationen markant niedriger als bei Südwind. Der Grund liegt in der Tatsache, dass bei NW-Winden (Talwinde in Richtung Aaretal) im Ozonbildungsprozess das Stickstoffmonoxid zu Stickstoffdioxid umgewandelt wird. Die SE-Winde blasen in der Nacht bis in die frühen Morgenstunden. Während dieser Zeit erfolgt die Umwandlung der starken Stickoxidemissionen (Morgenverkehr) langsamer als am Nachmittag und Abend. Die Schadstoff-Windrosen wurden von KÜNZLE (1990) auch für verschiedene Windgeschwindigkeitsklassen dargestellt. Die mittleren NO-Konzentrationen sind bei Schwachwindsituationen deutlich höher als bei Perioden mit guter Durchmischung.

Die von den Quellen (Auspuff oder Kamin) ausgestossenen Stickoxide müssen auf dem Transportweg bis zum Luftimmissionsanalysegerät noch zu NO_2 oxidiert werden. Die Grundbelastung mit Stickstoffdioxid ist im Gegensatz zu NO recht hoch. Die vom Umland ins Stadtgebiet transportierten Luftmassen weisen im Jahresmittel einen Wert im Bereich von über 20 $\mu g/m^3$ auf. Dies entspricht den Messwerten an quellfernen, ländlichen Standorten (KÜNZLE, 1989b; KIGA, 1990a). Die mittlere Belastung ist aus diesen Gründen in allen Windrichtungssektoren ungefähr gleich gross. Zudem können keine wesentlichen Unterschiede zwischen dem Winter- und Sommerhalbjahr festgestellt werden. Die Abnahme der mittleren Konzentrationen ist bei der Unterscheidung von verschiedenen Windgeschwindigkeiten weniger markant als beim NO.

Erhöhte Ozonkonzentrationen können im Winterhalbjahr bei starken Umwälzungen der Atmosphäre festgestellt werden. Es handelt sich dabei um ein Einmischen von Ozon aus höheren Luftschichten der Troposphäre und aus natürlichem Ozon des Schutzschildes der Stratosphäre. Diese Prozesse können nur bei Kaltfrontdurchgängen (Südwestwind) oder starken Windgeschwindigkeiten aus Nordosten (Bise) festgestellt werden. Das Ozon ist vor allem im Sommerhalbjahr ein problematischer Luftschadstoff im unteren Bereich der atmosphärischen Grenzschicht. Aus den Vorläufersubstanzen (Stickoxide und flüchtige organische Verbindungen) kann Ozon bei Hochdruckwetterlagen gebildet werden. Da an diesen Tagen in Bern mit grosser Regelmässigkeit Nordwest- bis Nordostwinde (Talwinde) in Richtung Aaretal wehen, sind in diesen Windsektoren die hohen mittleren Ozonbelastungen festzustellen. Im Zeitraum mit Südwind, also vor allem nachts, bleiben die Ozonwerte gering. Infolge der raschen chemischen Umwandlung von NO mit Ozon, können sowohl hohe Stickstoffmonoxid- als auch hohe Ozonwerte nicht vorkommen. In den Windsektoren mit durchschnittlich höheren Ozonkonzentrationen sind daher niedrigere Stickstoffmonoxidwerte zu beobachten.

Die Schadstoff-Windrosen geben noch keinen Aufschluss darüber, wie häufig die in den einzelnen Sektoren ermittelten Konzentrationen auftreten. Im Kapitel 3.1 ist ersichtlich, dass an der Fixstation (AfUL) vorwiegend Winde aus SE, SW, NW und NE registriert werden. Werden die Konzentrationen aus der Schadstoff-Windrose mit der entsprechenden Häufigkeit der Windrichtung, also der Einwirkungsdauer, multipliziert und durch den Gesamtmittelwert des Messzeitraumes dividiert, so erhält man Schadstoff-Dosis-Wind-

rosen. Diese Werte geben an, welchen prozentualen Beitrag ein Windrichtungssektor zur mittleren Luftbelastung am Messort liefert. Durch die Gewichtung mit der Häufigkeit der Windrichtung tragen auch die geringen Konzentrationen zur Ausbeulung der Dosis-Kurve bei, wenn sie nur häufig genug vorkommen (BAUMBACH, 1990; KÜNZLE, 1990).

Die hohen NO-Immissionen werden in der Zeit zwischen 6 und 9 Uhr gemessen (vgl. Abb. 9). Zu dieser Zeit wehen mit grosser Regelmässigkeit seichte Aaretalwinde über das Stadtgebiet. Es erstaunt deshalb nicht, dass der SE-Sektor die höchsten Dosiswerte aufweist. Die aus den Sektoren um 90 Grad gemessenen Konzentrationen kommen so selten vor, dass sie in der Dosis-Windrose praktisch nicht erscheinen.

Da die mittlere NO_2-Konzentration über alle Windrichtungssektoren ausgeglichen ist, sehen die NO_2-Dosis-Windrosen den Windrosen sehr ähnlich. Die kaum vorkommenden Windrichtungen verlieren bei der Dosis-Windrose die falsche, vorgetäuschte Wichtigkeit.

Die starken Südwestwinde bewirken eine gute Durchmischung der Atmosphäre. Da dies eine erhöhte Ozonkonzentration bewirken kann, und die SW-Winde v.a. im Winterhalbjahr häufig sind, resultiert ein hoher O_3-Dosiswert. Im Sommerhalbjahr treten die hohen Ozonkonzentrationen zum Zeitpunkt der regelmässig vorhandenen Nordwestwinde (Talwinde am Nachmittag) auf.

4.3 Die Jahresmittelwerte von Stickstoffdioxid

Anhand der im Kapitel 2 beschriebenen Emissionswerte und dem in Kapitel 3 erläuterten Ausbreitungsklima werden mit einem Gauss-Ausbreitungsmodell die NO_2-Immissionen

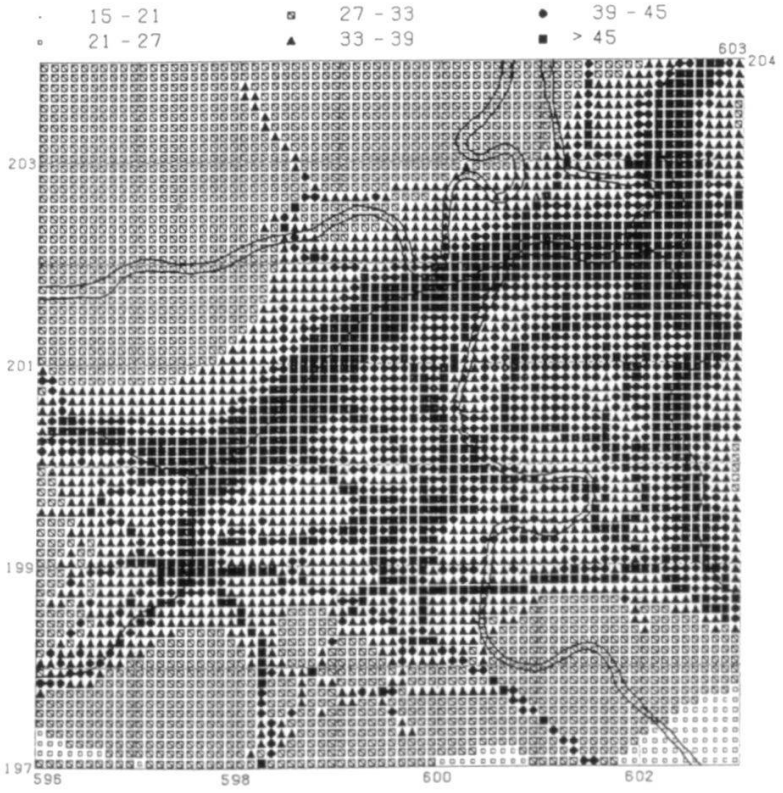


Abbildung 12: Jahresmittel der NO_2-Immissionskonzentration in $\mu g/m^3$ im Ist-Zustand mit einer Grundbelastung von 22 $\mu g/m^3$ (Ausschnitt identisch mit Abb. 2; KÜNZLE, 1991b).

für alle Hektaren im Untersuchungsgebiet berechnet. In Abbildung 12 ist die Belastung mit Stickstoffdioxid im Ist-Zustand (1989/90) dargestellt. Die Gebiete entlang der Autobahnen und der Hauptverkehrsachsen im Stadtgebiet weisen deutlich die höchsten NO_2-Jahresmittelwerte auf. In den Wohnquartieren der dicht bebauten Innenstadt werden Stickstoffdioxidwerte von über 33 $\mu g/m^3$ im Jahresmittel berechnet. Angrenzend an die dichte Bebauung sinken abseits der Verkehrsachsen die NO_2-Werte in der Bereich von 27–33 $\mu g/m^3$. Im Ist-Zustand wird eine Grundbelastung von 22 $\mu g/m^3$ NO_2 berücksichtigt. Es ist dies derjenige Konzentrationswert, mit der die Luftmassen aus dem ländlichen, weitgehend unbelasteten Gebiet, in den Raum Bern herantransportiert werden.

Zur Verifikation der mit dem Gauss-Ausbreitungsmodell berechneten Jahresmittelwerte von NO_2 stehen nebst den Luftimmissionsdaten der Fixstation (AfUL) auch Daten einer Messkampagne mit einem Messwagen zur Verfügung. Im Jahre 1988 wurde an acht verschiedenen Messstellen (s. Abb. 2) periodisch während einer Woche Luftanalysen vorgenommen (Künzle, 1990). Vom KIGA werden zudem seit dem Jahre 1989 mit Passivsammlern die NO_2-Immissionen erfasst.

Für das Untersuchungsgebiet in Bern stehen für 55 Standorte NO_2-Jahresmittelwerte zur Verfügung. In Abbildung 13 sind diese 55 gemessenen Werte (sortiert nach der Konzentration) und die entsprechenden, modellierten Werte aufgezeichnet. Es zeigt sich, dass die berechneten NO_2-Jahresmittel meistens im Bereich von ± 10% der gemessenen Werte liegen. Die Modellergebnisse in Abbildung 12 dürfen somit als gute Wiedergabe der heutigen Situation angesehen werden.

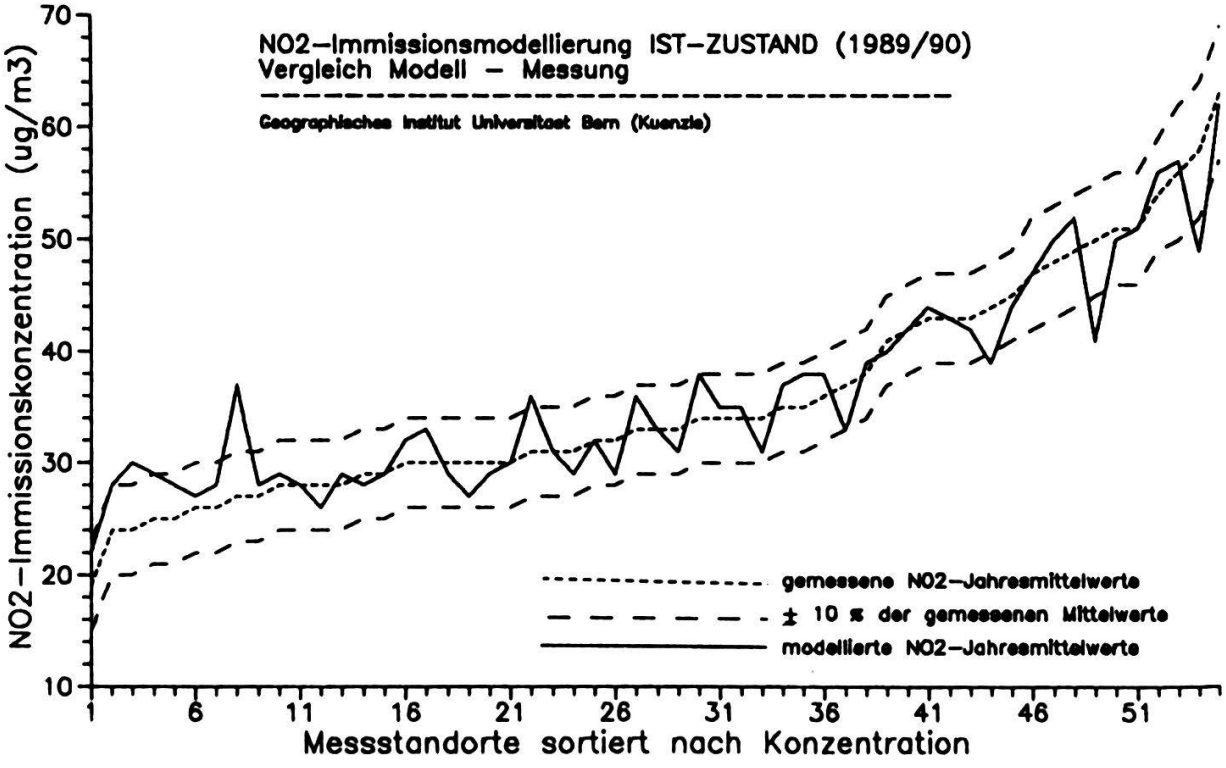


Abbildung 13: Vergleich der gemessenen und der modellierten NO_2-Jahresmittelwerte im Ist-Zustand (Künzle, 1991b).

Tabelle 3: Liste der 55 Immissions-Messstandorte.

(a)	(b)	(c)	(d)	(e) (f)	(a)	(b)	(c)	(d)	(e) (f)
1	19	22	R	Grünenboden (Köniz)	33	34	31	Q	Parkstrasse (Seftigenstr.)
2	24	28	R	Elfenau (AfUL)	34	35	37	Q	Steigerhubel (AfUL)
3	24	30	R	Könizbergwald (Köniz)	35	35	38	Q	Könizstrasse (Köniz)
4	25	29	R	Elfenauweg (AfUL)	36	36	38	Q	Waldeck (Ostermundigen)
5	25	28	R	Granitstrasse (Köniz)	37	37	33	Q	Quartier (Bremgarten)
6	26	27	R	Viktoriastr. (Seftigenstr.)	38	38	39*	Q	Waldegg (Köniz)
7	26	28	R	Lindenweg (Seftigenstr.)	39	41	40	Q	Altikofen (Ittigen)
8	27	37	Q	Felsenau (AfUL)	40	42	42	V	Bernstrasse (Zollikofen)
9	27	28	Q	Giessenweg (Seftigenstr.)	41	43	44	V	Schlossstrasse (AfUL)
10	28	29	Q	Neuhausweg (Köniz)	42	43	43	V	Breitenrain (AfUL)
11	28	28	Q	Chaumontweg (Köniz)	43	43	42	V	Marzilistr. (AfUL)
12	28	26	R	Ried (Köniz)	44	44	39	V	Bümpliz Zentrum (AfUL)
13	28	29	Q	Bahnlinie (Seftigenstr.)	45	45	44	V	Seftigenstr. (Seftigenstr.)
14	29	28	Q	Weyerstrasse (Seftigenstr.)	46	47	47*	V	Winkelriedstrasse (AfUL)
15	29	29	Q	Aumatt (Wohlen)	47	48	50*	V	Ostring Autobahn (AfUL)
16	30	32	Q	Bremgarten (Bremgarten)	48	49	52*	V	Bahnhofplatz (AfUL)
17	30	33	Q	Chalchacher (Bremgarten)	49	50	41	V	Weissensteinstr. (AfUL)
18	30	29	Q	Kindergarten (Köniz)	50	51	50*	V	Länggasse (AfUL)
19	30	27	Q	Lindenweg (Seftigenstr.)	51	51	51	V	Bümpliz Bernstr. (AfUL)
20	30	29	Q	Unt. Bächtelen (Seftigenstr.)	52	54	56	V	Monbijou (AfUL)
21	30	30	Q	Pappelweg (Seftigenstr.)	53	56	57	V	Eigerplatz (AfUL)
22	31	36	Q	Marzili (AfUL)	54	58	49	V	Fixstation (AfUL)
23	31	31	Q	SMA Liebefeld (Köniz)	55	63	62	V	Thunstrasse (AfUL)
24	31	29	Q	Eichholzstr. (Seftigenstr.)					
25	32	32	Q	Hessgut (Köniz)	(a) Nummer des Messstandortes gem. Abb. 13				
26	32	29	Q	Looserstrasse (Seftigenstr.)	(b) gemessener NO_2-Jahresmittelwert				
27	33	36	Q	Bümpliz Schwabgut (AfUL)	(c) modellierter NO_2-Jahresmittelwert				
28	33	33	Q	Morillon (Köniz)	(d) Standortcharakteristik: R = Stadtrand,				
29	33	31	Q	Dorfstrasse (Seftigenstr.)	Q = Quartiergebiet, V = Verkehrsachse				
30	34	38	Q	Seftau (Bremgarten)	(e) Messstandort				
31	34	35	Q	Lebermatt (Köniz)	(f) Gemeinde, Messprojekt				
32	34	35	Q	Funkstrasse (Köniz)	* Mittelwert aus mehreren Hektaren				

In Tabelle 3 sind die 55 Standorte aufgelistet, an denen NO_2-Jahresmittelwerte vorliegen. Die Reihenfolge der Standorte entspricht derjenigen von Abbildung 13. Die Messstellen im Randbereich des städtischen Bebauungsgebietes und abseits der Verkehrsachsen (R) weisen NO_2-Jahresmittel von deutlich unter 30 $\mu g/m^3$ auf. In Quartierzonen (Q) liegen die Werte zwischen 30 und 40 $\mu g/m^3$ NO_2. Entlang von Verkehrsachsen werden NO_2-Jahresmittelwerte von über 40 $\mu g/m^3$ ermittelt. Dies ist aus Abbildung 12 deutlich erkennbar. Die detaillierten Beschreibungen und Auswertungen sind Künzle (1991b) zu entnehmen.

Die in Kapitel 2 beschriebenen Stickoxid-Prognosedaten für die Jahre 1995 und 2005 dienen als Grundlagen für die Berechnung der Modellergebnisse in den Abbildungen 14 und 15. Im Jahre 1994 müssen gemäss Luftreinhalte-Verordnung die NO_2-Jahresmittelwerte unter 30 $\mu g/m^3$ liegen. Weite Teile des Stadtgebietes werden 1995 (Abb. 14) NO_2-Konzentrationen im Bereich dieses Grenzwertes aufweisen. Entlang der Hauptverkehrs-

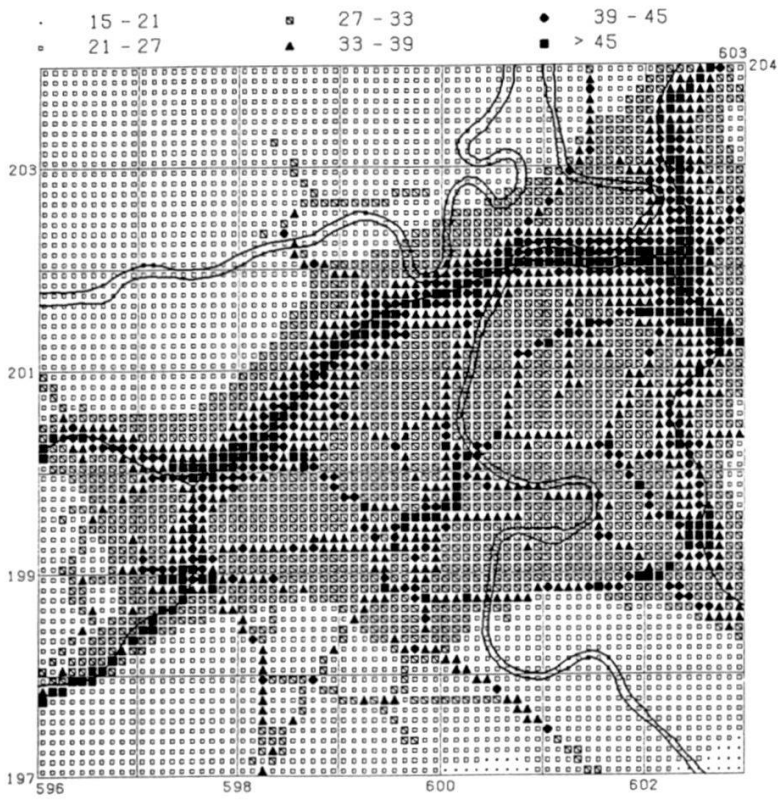


Abbildung 14: Jahresmittel der NO_2-Immissionskonzentration in µg/m³ im Jahre 1995 mit einer Grundbelastung von 18 µg/m³ (Ausschnitt identisch mit Abb. 2; KÜNZLE, 1991b).

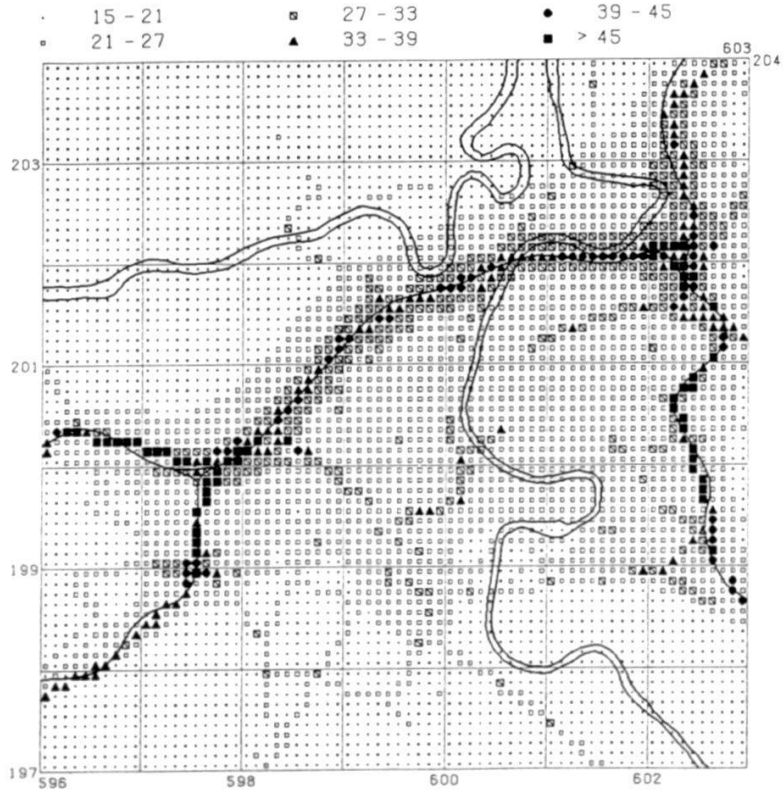


Abbildung 15: Jahresmittel der NO_2-Immissionskonzentration in µg/m³ im Jahre 2005 mit einer Grundbelastung von 15 µg/m³ (Ausschnitt identisch mit Abb. 2; KÜNZLE, 1991b).

achsen wird der Grenzwert noch überschritten werden. Es besteht somit ein Handlungsbedarf für zusätzliche Massnahmen auf der Emissionsseite.

Im Jahre 2005 (Abb. 15) werden anhand der vorliegenden Stickoxid-Emissionswerte die NO_2-Jahresmittel grösstenteils unterhalb von 30 $\mu g/m^3$ liegen. Nur entlang der Autobahnen und punktuell auf dem Hauptverkehrsnetz sind noch Überschreitungen des Grenzwertes zu erwarten. Der Wert der Grundbelastung mit NO_2 wird für die Prognosejahre reduziert (1995: 18 $\mu g/m^3$; 2005: 15 $\mu g/m^3$).

Die Immissionskarten (Abb. 12, 14 und 15) werden im Schlussbericht der Massnahmenplanung zur Luftreinhaltung in der Region Bern (KIGA, 1991b) zusammen mit Immissionsmodellierungen für die umliegenden Gemeinden des Untersuchungsgebietes publiziert. Dieser Bericht wird aufzeigen, welche zusätzlichen Massnahmen zu treffen sind, um die Grenzwerte der Luftreinhalte-Verordnung einhalten zu können.

5. Zusammenfassung und Fazit

Da feststeht, dass in der Region Bern übermässige Luftimmissionen auftreten, ist der Kanton verpflichtet, mit einem Massnahmenplan aufzuzeigen, wie diese übermässigen Immissionen verhindert oder beseitigt werden können. Aufgrund der Teilmassnahmenpläne werden Immissionsprognosen erstellt. Daraus sind diejenigen Gebiete erkennbar, in denen die Grenzwerte überschritten werden und somit ein Handlungsbedarf besteht.

Der Verkehr verursacht rund 80% der Stickoxid-Emissionen. Aus den Immissionsanalysen wird deutlich, dass die Luftbelastung mit Stickoxiden vom Ausmass des Verkehrsaufkommens abhängt.

Es bleibt zu hoffen, dass die vorgesehenen Massnahmen durchgesetzt werden können. Dazu wird es jedoch auch Einschränkungen eines jeden Einzelnen benötigen.

Abkürzungen

AfUL Amt für Umweltschutz und Lebensmittelkontrolle der Stadt Bern
GIUB Geographisches Institut der Universität Bern
KIGA Kantonales Amt für Industrie, Gewerbe und Arbeit

Literatur

AfUL, 1988: Grundlagen für ein Luftreinhaltekonzept der Stadt Bern. Vorstudie, Amt für Umweltschutz und Lebensmittelkontrolle, 30 S.

AfUL, 1990: Luftimmissionen Bern 1987–1989. Amt für Umweltschutz und Lebensmittelkontrolle, 10 S.

Baumbach, G., 1990: Luftreinhaltung. Entstehung, Ausbreitung und Wirkung von Luftverunreinigungen – Messtechnik, Emissionsminderung und Vorschriften. Springer, Berlin, 431 S.

Baumgartner, M., 1981: Die Durchlüftung des Aaretals zwischen Bern und Thun bei ausgewählten Wetterlagen. Mit einem Anhang von ERNI, Th.: Versuch einer regionalen Klassifikation durchlüftungsarmer Wetterlagen. Diplomarbeit Geogr. Inst. Univ. Bern, 168 S.

Berlincourt, P., 1980: Les conditions de ventilation dans les vallées de l'Aar et de la Gurbe lors des situations

météorologiques convectives de haute pression et de répartition indifférente des pressions. Diplomarbeit Geogr. Inst. Univ. Bern, 133 S.

FILLIGER, P., 1986: Die Ausbreitung von Luftschadstoffen – Modelle und ihre Anwendung in der Region Biel. Geographica Bernensia, G14, 154 S.

KIGA, 1990a: Massnahmenplanung zur Luftreinhaltung in der Region Bern. Immissionsübersicht. Volkswirtschaftsdirektion des Kantons Bern, 122 S.

KIGA, 1990b: Massnahmenplanung zur Luftreinhaltung in der Region Bern. Teilmassnahmenplan Feuerungen. Volkswirtschaftsdirektion des Kantons Bern, 36 S.

KIGA, 1990c: Massnahmenplanung zur Luftreinhaltung in der Region Bern. Teilmassnahmenplan Industrie und Gewerbe. Volkswirtschaftsdirektion des Kantons Bern, 45 S.

KIGA, 1991a: Massnahmenplanung zur Luftreinhaltung in der Region Bern. Teilmassnahmenplan Verkehr. Volkswirtschaftsdirektion des Kantons Bern, 77 S.

KIGA, 1991b: Massnahmenplanung zur Luftreinhaltung in der Region Bern. Schlussbericht. Volkswirtschaftsdirektion des Kantons Bern, in Vorbereitung.

KÜNZLE, Th., 1989a: Die Ausbreitung von Stickstoffdioxid im Raum Bern. Diplomarbeit Geogr. Inst. Univ. Bern, 86 S.

KÜNZLE, Th., 1989b: Die Backgroundbelastung mit Stickstoffdioxid im Raum Bern. Geogr. Inst. Univ. Bern, 37 S.

KÜNZLE, Th., 1990: Analyse von Luftschadstoffmessungen der Stadt Bern unter Einbezug von meteorologischen Daten. Geogr. Inst. Univ. Bern, 60 S.

KÜNZLE, Th., 1991a: Stickoxide und Ozon. Unipress, Pressestelle der Universität Bern, S. 29–35.

KÜNZLE, Th., 1991b: NO_2-Immissionsmodellierung Stadt Bern. Geogr. Inst. Univ. Bern, 18 S.

LRV, 1985: Luftreinhalte-Verordnung. Eidg. Dep. des Innern, Bern, 66 S.

MATHYS, H./MAURER, R./MESSERLI, B./WANNER, H./WINIGER, M., 1980: Klima und Lufthygiene im Raum Bern. Resultate des Forschungsprogrammes KLIMUS und ihre Anwendung in der Raumplanung. Geogr. Inst. Univ. Bern, 40 S.

MAURER, R., 1976: Das regionale Windgeschehen. Beitrag zum Klima der Region Bern, Nr.2, 153 S.

SCHORER, M., 1983: Theoretische Abschätzung der Durchlüftung aufgrund von Geländeparametern. Diplomarbeit Geogr. Inst. Univ. Bern, 181 S.

Volkswirtschaftsdirektion, 1990: Massnahmenplanung im Kanton Bern. 11 S.

WANNER, H., 1983: Eine Detailanalyse der Durchlüftung in der Schweiz – Konzept und erste Resultate. Tagungsbericht der 17. Internationalen Tagung für Alpine Meteorologie. Berchtesgaden, 21. bis 25. September 1982, S. 218–220.

WANNER, H., 1988: Geschichte der Meteorologie und Klimatologie an der Universität Bern. Geogr. Inst. Univ. Bern, Vorabdruck, 21 S.