

Luftreinhaltung

Endbericht 297 85 079

Kritische Luftschadstoff-Konzentration und Eintragsraten sowie ihre Überschreitung für Wald und Agrarökosysteme sowie naturnahe waldfreie Ökosysteme

Teil 2: Kartierung von Critical Levels

Dipl. Geogr. Th. Gauger

Dipl. Geogr. R. Köble

Dipl. Geogr. F. Anshelm

Institut für Navigation
der Universität Stuttgart
Institutsleiter: Prof. Dr.-Ing. A. Kleusberg

IM AUFTRAG DES
UMWELTBUNDESAMTES

Juni 2000

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	1
2	Datenbedarf und Datenakquisition.....	2
3	Klassifizierung der Meßstationen entsprechend des Einflusses von Verkehrs- emissionen.....	5
4	Immission von O₃, SO₂ und NO_x	9
	4.1 Ozon-Immission.....	9
	4.2 SO ₂ -Immission	10
	4.3 NO _x -Immission.....	10
5	Critical Levels für SO₂, NH₃, NO_x und O₃	12
6	Kartierung der Überschreitung von Critical Levels für Ozon.....	15
	6.1 Der AOT40-Wert	15
	6.2 Kartierungsmethode	17
	6.3 Ergebnisse.....	19
	6.3.1 AOT40-Werte für landwirtschaftliche Nutzpflanzen und naturnahe Öko- systeme	20
	6.3.2 AOT40-Werte in Waldökosystemen	21
	6.3.3 Überschreitung der Critical Levels für Ozon	22
7	Kartierung der Überschreitung der Critical Levels für SO₂	24
	7.1 Flechten	24
	7.2 Waldökosysteme und natürliche Vegetation.....	25
	7.3 Landwirtschaftliche Nutzpflanzen	26
8	Kartierung der Überschreitung der Critical Levels für NO_x	27
9	Fazit und Ausblick	28

II

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Critical Levels	13
Abbildung 2: AOT40-Berechnung.....	16
Abbildung 3: Verfahrensablauf der Kartierungsarbeiten	18
Abbildung 4: Beginn und Ende der Zeitspanne mit Globalstrahlung > 50 W/m ²	19

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Immissionsdatenbestand mit eindeutiger Kennung der Immissionsstationen	2
Tabelle 2: Übersetzung für die Bundeslandkennzeichnung in NATCOD und INSCOD.....	3
Tabelle 3: Datei zur Charakterisierung der Immissionsmeßstationen.....	4
Tabelle 4: Entscheidungskriterienkatalog für die Beurteilung der Belastungssituation der Immissionsmeßstationen durch Verkehrsemissionen.....	7
Tabelle 5: Lage der Ozon-Meßstationen zur Emissionsquelle Verkehr.....	8
Tabelle 6: Anzahl der zu den Interpolationen herangezogenen Meßstationen	9
Tabelle 7: Ozon – AOT40-Werte für landwirtschaftliche Nutzpflanzen – Flächenanteile	20
Tabelle 8: Ozon – AOT40-Werte für Waldökosysteme – Flächenanteile.....	21
Tabelle 9: Ozon – Flächenanteil der Gebiete mit Überschreitung des Critical Levels für landwirtschaftliche Nutzpflanzen.	22
Tabelle 10: Überschreitung des Critical Levels für Waldökosysteme	23
Tabelle 11: SO ₂ – Flächenanteil der Gebiete mit Überschreitung des Critical Levels für Flechten.....	24
Tabelle 12: SO ₂ – Flächenanteil der Gebiete mit Überschreitung des Critical Levels für Waldökosysteme und natürliche Vegetation.....	25
Tabelle 13: SO ₂ – Flächenanteil der Gebiete mit Überschreitung des Critical Levels für landwirtschaftliche Nutzpflanzen.	26
Tabelle 14: NO _x – Flächenanteile der Gebiete mit Überschreitung des Critical Levels.....	27

Kartenverzeichnis

Karte 1: Ozon-Meßstationen 1991-1995	33
Karte 2: Ozon-Immission 1991-1995.....	34
Karte 3: SO ₂ -Meßstationen 1985-1990	35
Karte 4: SO ₂ -Meßstationen 1991-1995	36
Karte 5: SO ₂ -Immission 1985-1990.....	37
Karte 6: SO ₂ -Immission 1990-1995.....	38
Karte 7: NO ₂ -Meßstationen 1985-1990.....	39
Karte 8: NO ₂ -Meßstationen 1991-1995.....	40
Karte 9: NO ₂ -Immission 1985-1990	41
Karte 10: NO ₂ -Immission 1991-1995	42
Karte 11: NO-Meßstationen 1992-1995.....	43
Karte 12: NO _x -Meßstationen 1992-1995	44
Karte 13: NO _x -Immission 1992-1995.....	45
Karte 14: Zuordnung der Critical Levels für Ozon zur Rezeptoroberfläche	46
Karte 15: Ozon - AOT40-Werte in Agrargebieten 1991-1995	47
Karte 16: Ozon - AOT40-Werte in Waldgebieten 1991-1995.....	48
Karte 17: Ozon - Überschreitung der Critical Levels 1991-1995	49
Karte 18: SO ₂ – Überschreitung des Critical Levels für Flechten 1985-1990.....	50
Karte 19: SO ₂ - Überschreitung des Critical Levels für Flechten 1991-1995.....	51
Karte 20: SO ₂ - Überschreitung des Critical Levels für Waldökosysteme und natürliche Vegetation 1985-1990.....	52
Karte 21: SO ₂ - Überschreitung des Critical Levels für Waldökosysteme und natürliche Vegetation 1991-1995.....	53
Karte 22: SO ₂ - Überschreitung des Critical Levels für landwirtschaftliche Nutzpflanzen 1985-1990	54
Karte 23: SO ₂ - Überschreitung des Critical Levels für landwirtschaftliche Nutzpflanzen 1991-1995	55
Karte 24: NO _x - Überschreitung des Critical Levels 1992-1995.....	56

1 Einführung

Critical Levels sind die quantitative Abschätzung der Konzentration von Schadstoffen in der Atmosphäre, oberhalb derer direkte Schadeffekte an Rezeptoren nach derzeitigem Wissen zu erwarten sind (NAGEL & GREGOR 1998). **Rezeptoren** können Wälder, natürliche Ökosysteme, landwirtschaftliche Nutzpflanzen, Flechten oder aber auch Menschen, Tiere oder Materialien sein. Die zu beobachtenden **Schadeffekte** müssen auf **direkten Einfluß der Schadgase** zurückzuführen sein. Wirkungen von Luftverunreinigungen, die über indirekte Pfade, beispielsweise über den Boden erzielt werden, werden von den Critical Levels nicht berücksichtigt. Direkte Schadeffekte durch Luftverunreinigungen können sich in Form von Wachstumsstörungen oder verminderter Vitalität einzelner Individuen, Veränderungen in der Artenzusammensetzung eines Ökosystems, in Form gesundheitlicher Beeinträchtigung von Mensch und Tier oder frühzeitig auftretender Materialschäden bemerkbar machen. Im Rahmen der UN ECE Konvention über weitreichende, grenzüberschreitende Luftverschmutzung (Long Range Transboundary Air Pollution) wurden Critical Levels (kritische Luftschadstoffkonzentrationen) für die Schadgase Schwefeldioxid (SO₂), Stickoxide (NO_x), Ammoniak (NH₃) und Ozon (O₃) vereinbart (UN ECE 1992, UN ECE 1996a).

Grundlage der Kartierung von Critical Levels sind Meßdaten der Immission. Im folgenden soll daher zunächst auf die Akquisition und Aufbereitung der Daten zur Luftschadstoffimmission eingegangen werden. Das Verfahren, das zur Klassifizierung der Immissionsmeßstationen entsprechend ihrer Lage zur Emissionsquelle Verkehr angewandt wurde wird detailliert beschrieben. Daran anschließend werden die Kartierungsergebnisse zur Immission von Ozon, Schwefeldioxid, Stickstoffmonoxid, Stickstoffdioxid sowie zu NO_x vorgestellt. In Kapitel 5 werden die derzeit geltenden Critical Levels für Schwefeldioxid (SO₂), Stickoxide (NO_x), Ammoniak (NH₃) und Ozon (O₃) erläutert. Dem Kartierungsverfahren für Critical Levels für Ozon (Berechnung der AOT40-Werte) ist ein eigenständiges Kapitel gewidmet. Schließlich werden die Ergebnisse der Kartierungsarbeiten zur Überschreitung von Critical Levels für Ozon, Schwefeldioxid und Stickoxide in ausführlicher Form beschrieben und interpretiert. Für Ammoniak konnte mangels Datenmaterial zur NH₃-Immission keine Kartierung der Critical Levels vorgenommen werden.

2 Datenbedarf und Datenakquisition

Der Bedarf an Daten zur Schadstoff-Immission orientiert sich am Zeitbezug der zu kartierenden Critical Levels. Für die verschiedenen Schadgase werden Daten in unterschiedlicher zeitlicher Auflösung benötigt. Die Berechnung der AOT40-Werte für Ozon erfordert als Dateninput Stundenmittel der Ozon-Konzentration. Für die Kartierung der Überschreitung der Critical Levels für Schwefeldioxid werden Jahresmittelwerte benötigt. In Tabelle 1 ist der aktuell zur Verfügung stehende Immissionsdatensatz dargestellt. Die Daten wurden von den Meßstellenbetreibern der einzelnen Bundesländer an das Umweltbundesamt übermittelt und dort, dies betrifft nur die Daten der Ozonmessungen, auf eine einheitliche Bezugsbasis (293 K und 1013 hPa) umgerechnet und dem Auftragnehmer für dieses Forschungsprojekt zur Verfügung gestellt.

Tabelle 1: Immissionsdatenbestand mit eindeutiger Kennung der Immissionsstationen

Gas	Zeitbezug	K ^{**}	hPa [®]	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	
NO ₂	Jahresmittelwerte	293	1013	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
	Monatsmittelwerte												x		x
	Halbstundenwerte													x	x
NO	Halbstundenwerte*											x	x	x	
SO ₂	Jahresmittelwerte	273		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
	Monatsmittelwerte													x	x
O ₃	Jahresmittelwerte	293					x	x	x	x	x	x	x	x	
	Stundenmittelwerte									x	x	x	x	x	x

*nicht alle Bundesländer, [†]Bezugstemperatur [‡]Bezugsluftdruck

Da die jeweiligen Meßstationsbetreiber der Länder individuelle Kennungen für die einzelnen Meßstationen zuweisen und dies in einem gesamtdeutschen Datensatz vor allem bei Änderungen (Standort, Kennung etc.) zu Zuordnungsschwierigkeiten führt, wurde vom Umweltbundesamt eine 5stellige Kennung (z.B. BW053) vergeben, die aus dem Länderkürzel z.B. BW für Baden-Württemberg und 053 für die Meßstation Künzelsau besteht. Die überwiegende Anzahl der Daten ist so gekennzeichnet und eindeutig einer Meßstationkenndatendatei zuordenbar. In den Fällen, bei denen trotz der UBA-Kennung keine eindeutige Zuordnung zu einer Meßstationkenndatendatei möglich war, mußten die zu den Daten gehörigen Stationsangaben mittels aufwendiger Zuordnungsverfahren über Stationsname, Koordinaten (beide unter Umständen nicht eindeutig!) etc. ermittelt werden.

Stationen, die keiner UBA-Kennung zuzuordnen waren, erhielten die allgemeine Kennung DDR plus 2stelligem Zahlencode, sofern es sich um ehemalige DDR-Stationen handelte, die nach der

Wende aufgegeben wurden. Allen übrigen nicht zuordenbaren Stationen wurde die Kennung BRD plus 2stelligem Zahlencode zugewiesen.

Die Stationskenndatendatei basiert auf einer international harmonisierten Stationsbeschreibung, die für die Ozonmeßstationen von den Meßstellenbetreibern und dem Umweltbundesamt erstellt wurde. Die hierin enthaltenen Stationsangaben sind in Tabelle 3 (Punkt 2 bis 34) aufgelistet. Es handelt sich um Angaben zu Stationskennzeichnung, geographischer Lage der Station, Adresse, Umgebungsbeschreibung (nah / fern) und Meßmethodik.

Nicht für alle bundesdeutschen Immissionsmeßstationen liegt diese umfassende Beschreibung vor. Diesen weiteren Stationen wurden die aus den Stationsangaben der Betreiber erhältlichen Informationen zugeordnet. Da vor allem die Umgebungsbeschreibung nur ungenau den Klassen aus der Ozonmeßstationendatei zugeordnet werden konnte, wurden hierfür separate Klassen (Tabelle 3, Punkt 35 bis 45, Wohngeb. etc.) gebildet.

Weiterhin wurde die 5stellige alphanumerische Kennung (NATCOD, Tabelle 3: Punkt 2) des Umweltbundesamtes in eine 5stellige numerische Kennung (INSCOD, Tabelle 3 Punkt 1) übersetzt, da eine rein numerische Kennung im geographischen Informationssystem einige Vorteile bietet. Die statt der Bundeslandkennzeichnung eingesetzten numerischen Werte können Tabelle 2 entnommen werden.

Der letzte Schritt zur Kontrolle der Stationskenndaten war eine visuelle Überprüfung der Koordinaten in ArcView. Eindeutig falsche Koordinaten (z.B. Lage außerhalb der Deutschlandgrenzen oder innerhalb eines „falschen“ Bundeslandes) wurden, insofern möglich, korrigiert.

Tabelle 2: Übersetzung für die Bundeslandkennzeichnung in NATCOD und INSCOD

Vorschau.
d an einen
gedruckt, aber nicht
en.

4

Tabelle 3: Datei zur Charakterisierung der Immissionsmeßstationen

PT

k wurde nicht gespeichert
nen Vorschau.

k wird an einen
er gedruckt, aber nicht
ertypen.

3 Klassifizierung der Meßstationen entsprechend des Einflusses von Verkehrsemissionen

Neben der Speicherung der Angaben der Positionsdaten der Meßstationen dient die Stationskenndatendatei vor allem als Basis zur Selektion von Stationen, die ein oder mehrere bestimmte Kriterien erfüllen, z. B. Höhenlage > 1000m oder Stationen, die in Siedlungsbereichen liegen.

Die Lage der Meßstation ist unter anderem auch entscheidend für die räumliche Gültigkeit der dort gemessenen Immissionswerte. Im Hinblick auf die Erfassung der flächenhaften Verteilung der Ozon AOT40-Werte und der NO-Werte spielt die Exposition der Meßstationen gegenüber der Emissionsquelle Verkehr eine wesentliche Rolle, da emittentennahe Stationen nur Meßwerte geringer räumlicher Gültigkeit liefern (hohe Ozonabbaurate durch NO). Allein aus der bisher bestehenden Information über das nähere Umfeld der Stationen (Tabelle 3: Punkt 22 bis 29 und Punkt 35 bis 45) läßt sich keine zuverlässige Aussage hinsichtlich des direkten Einflusses von Verkehrsemissionen an der Meßstation treffen. Daher wurde das nachstehend beschriebene Klassifizierungsverfahren entwickelt.

In Tabelle 4 ist der Kriterienkatalog aufgeführt, der zur Klassifizierung der Meßstationen in die 5 Klassen erarbeitet wurde. Folgende Klassen werden unterschieden:

- kaum/nicht direkt belastet
- vermutlich kaum/nicht direkt belastet
- direkt und/oder stark belastet
- vermutlich direkt und/oder stark belastet
- keine Angabe (den ersten 4 Klassen nicht zuordenbare Stationen)

Das Ziel war möglichst viele Stationen möglichst exakt zu klassifizieren, um bei der Interpolation der Meßdaten (AOT40, NO_x) einen maximalen Datensatz, der mit größtmöglicher Sicherheit nur Stationen der Klassen (1) und (2) enthält, zu verwenden.

Beurteilungsbasis war eine Kombination aus Stationsbeschreibung, Stickstoffimmissionsdaten und dem Tagesverlauf der Ozonkonzentration. Der Ansatz baut auf einem bereits in Gauger et al. (1997) vorgestellten Verfahren, das allerdings nur auf der Betrachtung der NO- und NO₂-Konzentration beruhte, auf.

Der Kriterienkatalog (Tabelle 4) ist folgendermaßen anzuwenden: Um eine Station der Klasse (1) - kaum/nicht direkt belastet – zuordnen zu können, muß sie eine von 5 Kriterienkombinationen erfüllen, z.B.

- es handelt sich um eine UBA-Station
- das minimale NO₂-Jahresmittel (1991-95) muß $\leq 20\mu\text{g}/\text{m}^3$, das maximale NO₂-Jahresmittel (1991-95) muß $\leq 30\mu\text{g}/\text{m}^3$ liegen, die Anzahl der Meßjahre (NO₂) muß > 1 sein und das Verhältnis von NO₂/NO darf nicht ≤ 1.5 betragen
- das minimale NO₂-Jahresmittel (1991-95) muß $\leq 20\mu\text{g}/\text{m}^3$, das maximale NO₂-Jahresmittel (1991-95) muß $\leq 30\mu\text{g}/\text{m}^3$ liegen und das Verhältnis von NO₂/NO muß ≥ 2 sein

- die Stationsbeschreibung darf als TYPE nicht S ausweisen und IMENV1 darf nicht mit I1a, I1b, I2a, I2b, I3a oder I3b bezeichnet sein. Die Kriterien für die mittleren AOT40-Werte müssen erfüllt sein
- die Stationsbezeichnung muß als TYPE Rhi haben und das NO₂/NO-Ratio darf nicht ≤ 1.5 betragen.

Entsprechend wird die Zuordnung zu den anderen Klassen anhand der jeweils definierten Kriterienkombinationen durchgeführt.

Folgende Annahmen waren für die Kriterienfindung entscheidend:

- es gibt eindeutige Aussagen in der Stationsbeschreibung, so ist z. B. das UBA-Meßnetz auf die Erfassung der „Hintergrundbelastung“ ausgerichtet. Diese Stationen sind nie direkt von Verkehrsemissionen beeinflusst. Dasselbe gilt für die mit Rhi (= Reinluft Hintergrund) gekennzeichneten Stationen (vgl. Tabelle 4). Dagegen bedeutet die Kennzeichnung TYPE S immer Straßennähe.
- Wenn an der Station die Kriterien der Critical Levels für NO_x erfüllt sind und/oder wenn die NO₂-Konzentration in der Luft weit über dem NO-Anteil liegt, kann von einer höchstens geringen Belastung ausgegangen werden (und umgekehrt).
- Die Ozonkonzentration weist häufig einen stationstypischen mittleren Tagesgang auf. Hierbei spielen neben den klimatischen Faktoren vor allem die Exposition bezüglich NO-Emittenten und die Höhenlage ü. NN eine Rolle. Analysen an Stationen mit bekanntem Verkehrseinfluß ergaben, daß der Vergleich der AOT40-Werte als Halbjahressumme (Apr. – Sept.) zwischen 4 und 6 Uhr morgens und als Halbjahressumme (Apr.-Sept.) zwischen 13 und 15 Uhr mittags als Kriterium für NO-Emittentennähe/-ferne herangezogen werden kann. Stationen in großer Höhenlage und Emittentenferne erreichen sowohl in den frühen Morgenstunden als auch in der Mittagszeit hohe mittlere AOT40-Werte. Die Einstrahlung ist hoch und für den nächtlichen Ozonabbau fehlt NO. Emittentennahe Stationen in geringen bis mittleren Höhenlagen zeigen deutlich höhere AOT40-Werte um die Mittagszeit als früh morgens. Das Niveau der AOT40-Werte ist durchschnittlich niedriger als an unbelasteten Stationen in denselben Höhenlagen. Dort fehlt der nächtliche Ozonabbau mittels NO und der Tagesverlauf ist nicht so deutlich ausgeprägt. Die ermittelten Grenzkriterien sind in Tabelle 4 aufgeführt.

Als Ergebnis der Klassifizierung anhand der Kriterien in Tabelle 4 enthält die Stationskennendatei die Spalte 46 „**Verkehrseinfluß**“, in der den Stationen eine der fünf bereits erwähnten Klassen zugeordnet wird. Tabelle 5 zeigt das Ergebnis der Anwendung des Klassifizierungsverfahrens auf die Datensätze der Jahre 1991 bis 1995.

Tabelle 4: Entscheidungskriterienkatalog für die Beurteilung der Belastungssituation der Immissionsmeßstationen durch Verkehrsemissionen

: wird an einen
er gedruckt, aber nicht
artypen.

Abkürzungen:

TYPE = Stationstyp, **S** = Station an einer Straße mit > 2000 Kfz/Tag, **Rhi** = ländliche Hintergrundstation,
IMENV1 = Umgebungssituation in einem Radius von 0 bis 100m, **I92** = Wiese, **I8** = Bäume, **I2d** = Weg, Fußgängerzone, **I2c** = kleine Straße mit geringem Verkehr, **I1a**
= große Straße mit viel Verkehr, **I1b** = große Straße mit mittlerem Verkehrsaufkommen, **I2a** = kleine Straße mit viel Verkehr, **I2b** = kleine Straße mit mittlerem Verkehr r-
aufkommen, **I3a** = Straßenschlucht mit viel Verkehr, **I3b** = Straßenschlucht mit mittlerem Verkehrsaufkommen
LOCENV1 = Umgebungssituation in einem Radius von 100m bis mehreren km, **L1Ca** = große Straße mit starkem Verkehr

Tabelle 5: Lage der Ozon-Meßstationen zur Emissionsquelle Verkehr

	1991	1992	1993	1994	1995
Gesamtdatensatz	228	271	315	319	354
Meßdaten ohne Lageinformation	24	28	45	45	49
vermutlich von Verkehrsemissionen beeinflusst	96	118	128	125	138
nicht direkt von Verkehrsemissionen beeinflusst	108	125	142	149	167

4 Immission von O₃, SO₂ und NO_x

Die an den Meßstationen gemessene Immission der Schadgase SO₂, NO, NO₂ und O₃ ist die Basis der Kartierungsarbeiten. Eine exakte Beschreibung der Immissionssituation in Deutschland ist daher unerlässlich. Unter diesem Aspekt sind die in den Kapiteln 2 und 3 vorgestellten Arbeiten zur möglichst genauen Identifizierung und Charakterisierung der Meßstationen zu sehen. Im Mittelpunkt des folgenden Kapitels stehen die anhand der Immissionsdaten der Meßstationen interpolierten Karten der flächenhaften Schadstoff-Immission. Die räumliche Interpolation der Meßdaten wurde unter Anwendung des Kriging-Verfahrens durchgeführt.

Von entscheidender Bedeutung für die Güte der flächenhaften Interpolation der Meßdaten ist die Dichte des Meßnetzes im jeweiligen Jahr. Je dichter das Meßnetz, desto sicherer ist die räumliche Gültigkeit der interpolierten Werte. Bei der Auswertung der Karten der flächenhaften Schadstoff-Immission können die Informationen zur Meßnetzdicke in der jeweiligen Region eine wertvolle Interpretationshilfe sein.

4.1 Ozon-Immission

Die Kartierung der flächenhaften Ozon-Immission in Deutschland konnte für die Jahre 1991 bis 1995 durchgeführt werden. Im Vergleich zur Interpolation der Karten der flächenhaften SO₂-Immission stehen deutlich weniger Meßwerte zur Verfügung (Tabelle 6). Die geringere Zahl an Meßwerten und die damit verbundene geringere Dichte des Meßnetzes geht zu Lasten der räumlichen Gültigkeit der Interpolationsergebnisse. Karte 1 zeigt die räumliche Verteilung der Meßorte.

Tabelle 6: Anzahl der zu den Interpolationen herangezogenen Meßstationen

Jahr	SO ₂	O ₃	NO ₂	NO	NO _x
1985	289	-	178	-	-
1986	308	-	195	-	-
1987	380	-	234	-	-
1988	413	-	239	-	-
1989	492	-	213	-	-
1990	405	-	329	-	-
1991	491	108	348	-	-
1992	496	125	336	213	212
1993	503	142	358	257	257
1994	516	149	409	176	175
1995	492	167	437	318	318

Eine Ursache für die relativ geringe Anzahl der zur Verfügung stehenden Datensätze ist in der ausschließlichen Berücksichtigung der Daten verkehrsfern gelegener Meßstationen zu suchen. Da Ozonmessungen an verkehrsnah gelegenen Stationen aufgrund hoher Ozonreduktionsraten durch NO-Emissionen des Verkehrs nur die lokale Situation beschreiben, sollten diese, in Anbetracht der Zielsetzung einer flächenhaften Darstellung für das gesamte Bundesgebiet, bei der Interpolation nicht berücksichtigt werden. Demzufolge ist eine Klassifizierung der Ozon-Meßstationen in Abhängigkeit ihrer Lage zum Verkehr notwendig. Die Klassifizierung wird anhand eines von KÖBLE, SMIA TEK & GAUGER (1997) entwickelten Verfahrens vorgenommen. Dieses Verfahren wurde in Kapitel 3 näher erläutert. Für die Berechnung der Karten

der flächenhaften Ozon-Immission stehen die Daten von 108 (1991) bis 167 (1995) verkehrsfertigen Meßstationen zur Verfügung. Im betrachteten Zeitraum 1991 bis 1995 ist eine stetige Verbesserung der Datenbasis festzuhalten.

Karte 2 zeigt die Resultate der Kartierungsarbeiten zur flächenhaften Ozon-Immission in Deutschland im Überblick. Bei Betrachtung der Kartierungsergebnisse für die Einzeljahre werden starke jährliche Schwankungen erkennbar bezüglich der räumlichen Verteilung von Gebieten mit hohen, beziehungsweise niedrigen Werten. Diese Schwankungen sind in starkem Maße von den Wetterbedingungen im Sommer des jeweiligen Jahres abhängig. Im Jahresmittel werden Ozon-Konzentrationen von bis zu $92 \mu\text{g}/\text{m}^3$ festgestellt. Hohe Werte werden insbesondere auch an Bergstationen gemessen (z. B. Schauinsland im Südschwarzwald oder Wank und Zugspitze in der Nähe von Garmisch-Partenkirchen).

4.2 SO₂-Immission

Die Kartierung der flächenhaften SO₂-Immission in Deutschland konnte für die Jahre 1985 bis 1995 durchgeführt werden. In Tabelle 6 ist die Anzahl der für das jeweilige Jahr zur Verfügung stehenden Datensätze der SO₂-Immission aufgeführt. Von 1985 bis 1989 ist ein stetiger Anstieg der Anzahl der Meßstationen zu konstatieren. Die damit einhergehende Verdichtung des SO₂-Immissionsmeßnetzes kann den Karten 3 und 4 entnommen werden. Im Zuge der deutschen Wiedervereinigung kam es 1990 infolge der Aufgabe von Meßstationen auf dem Gebiet der ehemaligen DDR zu einer vorübergehenden Auslichtung des Meßnetzes. Allerdings war bereits 1991 der Stand von 1989 wieder erreicht. Seither stehen für jedes Jahr die gemessenen Daten der SO₂-Immission von circa 500 Meßstationen zur Verfügung.

Die Karten 5 und 6 zeigen die Kartierungsergebnisse zur interpolierten flächenhaften Immission von SO₂. Auffällig ist zunächst der starke Rückgang der SO₂-Immission innerhalb des betrachteten 11-Jahreszeitraums. Während bis 1987 noch in großen Teilen Deutschlands SO₂-Werte $> 30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ gemessen wurden, so beschränken sich die Gebiete mit SO₂-Immissionen $> 30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ seit 1988 vornehmlich auf das Territorium der neuen Bundesländer. Seit 1991 ist auch hier ein merklicher Trend zu abnehmender SO₂-Immission erkennbar. Das Konzentrationsniveau liegt in den alten Bundesländern seit 1988 großflächig unter $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Lediglich in einigen industriellen Ballungsräumen blieb hier das Konzentrationsniveau zunächst noch über $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Ruhrgebiet, Großraum Saarbrücken). In den Jahren 1994 und 1995 waren jedoch auch in diesen Räumen keine Werte $> 30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ feststellbar. In den neuen Bundesländern ist seit Beginn der 90er Jahre ein deutlicher Trend zu abnehmender SO₂-Immission erkennbar. Das Konzentrationsniveau liegt inzwischen auch hier großflächig bei $< 30 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Relativ hohe Werte der SO₂-Immission sind nach wie vor in Sachsen und den an Sachsen grenzenden Regionen der Länder Thüringen, Sachsen-Anhalt und Brandenburg festzustellen. Im Jahr 1995 bleiben die Gebiete mit SO₂-Immissionen $> 30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ nahezu ausschließlich auf das Territorium Sachsens beschränkt. Der Immissionswert der TA-Luft ($149 \mu\text{g}/\text{m}^3$ Jahresmittelwert) wird jedoch auch hier deutlich unterschritten.

4.3 NO_x-Immission

Stickstoffoxide (NO, NO₂) werden vornehmlich als Stickstoffmonoxid emittiert. Großräumig tritt jedoch nur Stickstoffdioxid in Erscheinung, da Stickstoffmonoxid relativ rasch durch den Luftsauerstoff und insbesondere durch Ozon zu Stickstoffdioxid oxidiert wird. Auf die räumliche Interpolation der NO-Meßwerte wird daher verzichtet. In die Berechnung der NO_x-Immissionswerte gehen die NO-Meßwerte jedoch mit ein. Hierzu werden allerdings nur die

Meßdaten der nicht direkt von Emissionen des Verkehrs beeinflussten Meßstationen verwendet. An verkehrsnah gelegenen Meßstationen werden relativ hohe NO-Immissionswerte gemessen. Deren räumliche Gültigkeit ist jedoch aufgrund der raschen Umsetzung von NO zu NO₂ nur gering. Für die Berechnung der flächenhaften NO_x-Immission sollten diese Daten daher nicht verwendet werden. Auf das Verfahren, anhand dessen verkehrsnah gelegene von nicht direkt von Emissionen des Verkehrs beeinflussten Stationen getrennt werden können, wurde in Kapitel 3 näher eingegangen.

Stickstoffdioxid tritt großräumig in Erscheinung. Die Gesamtzahl der zur Verfügung stehenden NO₂-Immissionsmessungen stieg im betrachteten Zeitraum (1985 – 1995) von 178 auf 437 (Tabelle 6). Bis 1990 liegen für das Gebiet der ehemaligen DDR nahezu keine Daten vor (Karte 7). In den 90er Jahren hat sich die Meßnetzdicke in den neuen Bundesländern der in den alten Bundesländern angeglichen (Karte 8). Die Karten 9 und 10 zeigen die interpolierte flächenhafte NO₂-Immission in Deutschland für die Jahre 1985 bis 1995. Außerhalb der Ballungsräume werden Jahresmittelwerte von 30 µg/m³ kaum überschritten. In den Ballungsräumen kann das Jahresmittel der NO₂-Immission Werte von circa 70 µg/m³ erreichen.

Daten zur Stickstoffmonoxid-Immission stehen für die Jahre 1992 bis 1995 zur Verfügung. Die Anzahl der pro Jahr zur Verfügung stehenden Meßdaten ist Tabelle 6 zu entnehmen. Karte 11 zeigt die Lage der Meßstationen, an denen in den Jahren 1992 bis 1995 die NO-Immission gemessen wurde. Das NO-Meßnetz ist im Vergleich zum NO₂-Meßnetz weitaus weniger dicht. Insbesondere im Jahr 1994 ist die Datenbasis mit recht schmal, wobei weniger die Gesamtzahl der zur Verfügung stehenden Meßdaten denn die ungleichmäßige Verteilung der Meßstationen problematisch ist. Für Bayern, Thüringen und Rheinland-Pfalz sind für dieses Jahr keine Meßdaten verfügbar.

Die Berechnung von NO_x basiert auf der Addition von NO₂ und NO in ppb. Die Summe wird als NO₂ in die Konzentrationsangabe µg/m³ rückgerechnet und im weiteren als NO_x angegeben. Formel 4.1 zeigt den Umrechnungsvorgang:

$$\text{NO}_x [\mu\text{g}/\text{m}^3] = (\text{NO}_2 [\mu\text{g}/\text{m}^3] / 2.05 + \text{NO} [\mu\text{g}/\text{m}^3] / 1.34) * 2.05 \quad (4.1)$$

Die Berechnung von NO_x erfolgt anhand der Daten aller nicht direkt von Emissionen des Verkehrs beeinflussten Stationen, für die sowohl NO- als auch NO₂-Werte vorliegen. Mit Ausnahme von zwei Stationen liegen für alle Stationen mit NO-Daten auch NO₂-Meßwerte vor, sodaß die Anzahl der zur Interpolation verfügbaren NO_x-Werte in etwa der Anzahl der nicht direkt von Verkehrsemissionen beeinflussten NO-Meßstationen entspricht (Tabelle 6). Das der Interpolation der NO_x-Werte zugrunde liegende Meßnetz mit berechneten NO_x-Werten ist in Karte 12 dargestellt. Karte 13 zeigt die flächenhafte NO_x-Immission für die Jahre 1992 bis 1995. Die NO_x-Immission erreicht Werte von bis zu 330 µg/m³. NO_x-Werte von 100 µg/m³ werden jedoch nur kleinräumig überschritten. Das Konzentrationsniveau liegt 1992 und 1993 großflächig unter 75 µg/m³, in den Jahren 1994 und 1995 großflächig unter 50 µg/m³.

5 Critical Levels für SO₂, NH₃, NO_x und O₃

Abbildung 1 zeigt die Entwicklung der Critical Levels für SO₂, NH₃, NO_x und O₃. Gemäß Gre-
gor (1993) ist bei der Festlegung von Critical Levels & Loads die ständige Neubewertung des
Wissensstandes ein wesentlicher Teil des Konzepts. Demzufolge erfuhren die meisten Critical
Levels im Laufe der Zeit eine Neubewertung entsprechend dem Fortschreiten des Wissensstan-
des auf dem Gebiet der Wirkungsforschung. Die Entscheidungen, die zur Definition von Critical
Levels geführt haben, basieren auf den Ergebnissen wissenschaftlicher Arbeiten, die auf den
internationalen Workshops in Bad Harzburg (UN ECE 1988), Egham (UN ECE 1992), Bern
(UN ECE 1993a) und Kuopio (UN ECE 1996a) vorgestellt wurden. Alle derzeit aktuellen Criti-
cal Levels sind in Abbildung 1 durch Fettdruck gekennzeichnet. Nur sie sollen im folgenden
näher erläutert werden.

Bei der Festlegung der Critical Levels wurde die spezifische Sensitivität der Rezeptoren gegen-
über den Schadgasen berücksichtigt. Art und Dauer der Einwirkung der Schadgase auf die Re-
zeptoren spielen bei der Bewertung des Gefährdungspotentials der Rezeptoren eine entschei-
dende Rolle. So sind zum Beispiel für die Beurteilung der Wirkung von Ozon auf die menschi-
che Gesundheit, sowie auf Flora und Fauna nicht Jahresmittelwerte, sondern kurzzeitige Spit-
zenkonzentrationen (Stundenmittel, Tageshöchstwerte, etc) und die Häufigkeit ihres Auftretens
von entscheidender Bedeutung (ELSTNER 1996). Die Critical Levels orientieren sich an Zeit-
bezügen, die diese rezeptorspezifische Sensitivität gegenüber den Schadgasen berücksichtigen.

Für SO₂ gelten nach wie vor die bereits auf dem UN ECE Workshop in Egham (1992) definier-
ten Critical Levels für Flechten (10 µg/m³), Waldökosysteme und natürliche Vegetation (15
bzw. 20 µg/m³), sowie für landwirtschaftliche Nutzpflanzen (30 µg/m³). Für Flechten ist das
Jahresmittel der SO₂-Immission entscheidend. Dieses darf 10 µg/m³ nicht überschreiten. Für
Waldökosysteme und natürliche Vegetation gilt ein Critical Level von 20 µg/m³. Dieser darf
weder im Jahresmittel, noch im Halbjahresmittel (Oktober-März) übertroffen werden. Beträgt
die effektive Jahressumme der Temperatur über 5 °C (Tagesmitteltemperatur) weniger als 1000
°C-Tage, so darf ein Jahresmittel der SO₂-Immission von 15 µg/m³ nicht überschritten werden.
Damit wird der besonderen Sensitivität vieler in hohen Lagen wachsender Pflanzen gegenüber
SO₂-Immissionen Rechnung getragen. Landwirtschaftliche Nutzpflanzen gelten als etwas weni-
ger empfindlich gegenüber SO₂-Immissionen. Für sie gilt, daß Jahresmittel und Halbjahresmittel
(Oktober-März) der SO₂-Immission 30 µg/m³ nicht überschreiten dürfen.

Eine ähnliche Differenzierung auf Rezeptorebene kann für die Critical Levels des Schadgases
NO_x derzeit nicht vorgenommen werden. Hier mangelt es an Untersuchungen über Dosis-
Wirkungsbeziehungen für einzelne Vegetationstypen. Es existieren lediglich Critical Levels für
die gesamte Vegetation. Ein Jahresmittel der NO_x-Immission von 30 µg/m³ darf nicht über-
schritten werden. Die Feststellung verminderter Nettophotosyntheseraten bei kurzfristig hohen
Belastungen führte zur Definition eines Kurzzeit-Schwellenwertes. Im 4-h-Mittel dürfen
95µg/m³ nicht überschritten werden.

Auch für NH₃ existieren Critical Levels mit unterschiedlichen Zeitbezügen. Differenzierungen
auf Rezeptorebene sind bisher nicht möglich. Das Jahresmittel der NH₃-Immission sollte 8
µg/m³ nicht übersteigen. Gleichzeitig darf ein maximales Monatsmittel von 23 µg/m³, ein ma-
ximales 24h-Mittel von 270 µg/m³ und ein maximales 1h-Mittel von 3300 µg/m³ nicht über-
schritten werden.

II Critical Levels für SO₂, NH₃, NO_x und O₃

Schadgas	Critical Levels ^a			Zeitbezug	Rezeptor
	1988	1992	1993		
SO ₂ [µg/m ³]	70 ^b	-	-	maximales 24h-Mittel	Gesamte Vegetation
	20	10	-	Jahresmittel	Flechten
		-	-	Jahresmittel	Waldökosysteme und Natürliche Vegetation
		20	-	Jahresmittel und Halbjahresmittel (Oktober - März)	
		15	-	Jahresmittel, wenn die effektive Temperatursumme über 5°C (Tagesmitteltemperatur) weniger als 1000 °C-Tage beträgt	
		30	-	Jahresmittel	Landwirtschaftliche Nutzpflanzen
NO _x [µg/m ³]		30	30	Jahresmittel und Halbjahresmittel (Oktober - März)	Gesamte Vegetation
		95	-	maximales 4h-Mittel	
		30	-	Jahresmittel	Gesamte Vegetation
		1000	3300	maximales 1h-Mittel	
NH ₃ [µg/m ³]		600	270	maximales 24h-Mittel	
		100	23	maximales Monatsmittel	
		8	-	Jahresmittel	
		150	-	maximales 1h-Mittel	Gesamte Vegetation
O ₃ [µg/m ³]	60	-	-	maximales 8h-Mittel in den Intervallen 1-8 Uhr, 9-16 Uhr und 17-24 Uhr	
	50	-	-	maximales 7h-Mittel; 9-16 Uhr in der Vegetationsperiode (evtl. April - September)	
		300	-	Vegetationsperiode, während der Tageslichtstunden zwischen astronomischem Sonnenaufgang und -untergang	
			5300	3 Monate der Hauptwachstumsphase (evtl. Mai - Juli), während Tageslichtstunden ^d	Landwirtschaftliche Nutzpflanzen und naturnahe Ökosysteme
			700	3 aufeinanderfolgende Tage, während Tageslichtstunden	Landwirtschaftliche Nutzpflanzen
			500	5 aufeinanderfolgende Tage, während Tageslichtstunden mit einem Dampfdruck sättigungsdefizit > 1,5 kPa (Mittel 9.30-16.30 Uhr)	
O ₃ AOT40 ^e [ppb-h]				5 aufeinanderfolgende Tage, während Tageslichtstunden mit einem Dampfdruck sättigungsdefizit < 1,5 kPa (Mittel 9.30-16.30 Uhr)	
			10000	6 Monate höchster Sensitivität des Rezeptors (evtl. April - September), ganztags	Waldökosysteme
				6 Monate höchster Sensitivität des Rezeptors (evtl. April - September), während Tageslichtstunden	
			10000		

^a Die Critical Levels wurden festgelegt aufgrund der Ergebnisse der Workshops in Bad Harzburg (UN ECE 1988), in Egham (UN ECE 1992), in Bern (UN ECE 1993) und in Kuopio (UN ECE 1996). ^b Kursiv gekennzeichnete Critical Levels wurden revidiert, aktuell gültige Critical Levels sind fett gedruckt. ^c Accumulated Exposure Over a Threshold of 40 ppb (Erläuterung s. Text); Tageslichtstunden sind definiert als der Zeitraum mit einer Globalstrahlung >50 W/m²

Abbildung 1: Critical Levels

Während die Critical Levels für SO_2 , NO_x und NH_3 seit dem UN ECE Workshop in Egham (1992) unverändert fortbestehen, wurden bei den Critical Levels für Ozon sowohl auf dem Workshop in Bern (UN ECE 1993a) als auch 1996 in Kuopio (UN ECE 1996a) Veränderungen beschlossen. Seit 1993 kann auf der Rezeptorebene differenziert werden zwischen landwirtschaftlichen Nutzpflanzen und naturnahen Ökosystemen einerseits und Waldökosystemen andererseits. Zudem wurden Kurzzeit-Schwellenwerte für landwirtschaftliche Nutzpflanzen beschlossen. Seit 1992 (UNECE 1992) bildet der AOT40-Wert (Accumulated exposure Over a Threshold of 40 ppm) die Basis der Critical Levels für Ozon.

Basis der AOT40-Berechnung sind die 1h-Mittel der Ozon-Immission. Als Zeitbezug sollten die Monate höchster Rezeptorsensitivität berücksichtigt werden. Der Zeitraum höchster Rezeptorsensitivität entspricht in etwa der Hauptwachstumsphase der Pflanzen. Für in Deutschland gelegene Waldökosysteme sind dies die Monate April bis September. In diesen sechs Monaten werden während der Tageslichtstunden (Globalstrahlung $> 50 \text{ W/m}^2$) sämtliche 1-h-Mittel der Ozon-Immission oberhalb der cut-off-line von 40 ppb zum AOT40 summiert. Die Summe der 1h-Mittel sollte den Critical Level von 10000 ppb-h nicht überschreiten.

Für landwirtschaftliche Nutzpflanzen und naturnahe Ökosysteme gilt ein Critical Level von 3000 ppb-h. Dieser AOT40-Wert darf während der drei Monate der Monate Mai bis Juli nicht übertroffen werden. Entsprechend der im Vergleich zu Waldökosysteme kürzeren Hauptwachstumsphase wird hier für die AOT40-Berechnung nur ein Zeitraum von drei Monaten berücksichtigt. Wiederum werden während der Tageslichtstunden die 1h-Mittel der Ozon-Immission oberhalb der cut-off-line von 40 ppb zum AOT40 addiert. Für landwirtschaftliche Nutzpflanzen und naturnahe Ökosysteme wurden darüber hinaus zwei, vom Dampfdrucksättigungsdefizit der Luft abhängige, Kurzzeit Critical Levels definiert. Während der Tageslichtstunden von fünf aufeinanderfolgenden Tagen mit einem Dampfdrucksättigungsdefizit $> 1,5 \text{ kPa}$ (Mittel 9.30 – 16.30 Uhr) darf ein AOT40-Wert von 500 ppb-h nicht überschritten werden. Ist das Dampfdrucksättigungsdefizit der Luft $< 1,5 \text{ kPa}$ gilt im gleichen Zeitraum der AOT40-Wert von 200 ppb-h als Critical Level. In trockener Luft (Dampfdrucksättigungsdefizit $> 1,5 \text{ kPa}$) nehmen landwirtschaftliche Nutzpflanzen weniger Ozon auf, weil die Spaltöffnungen zum Zwecke des Verdunstungsschutzes geschlossen bleiben. Daher ist in trockener Luft ein höherer Schwellenwert akzeptabel.

6 Kartierung der Überschreitung von Critical Levels für Ozon

Die Kartierung der Langzeit Critical Levels für Ozon konnte für die Jahre 1991 bis 1995 durchgeführt werden. Zunächst steht der AOT40-Wert und dessen Berechnung im Mittelpunkt, anschließend wird auf die Kartierungsmethode eingegangen, um abschließend die Ergebnisse der Kartierungsarbeiten vorzustellen und zu diskutieren.

6.1 Der AOT40-Wert

Die auf dem UN ECE Workshop in Bad Harzburg festgelegten Critical Levels für Ozon (UN ECE 1988) basierten auf der Bestimmung maximaler Kurzzeitmittelwerte sowie auf längerfristigen saisonalen Mittelwerten. Es zeigte sich jedoch bald, daß das Regenerationspotential der meisten Pflanzenarten ausreicht, um kurzzeitige Spitzenkonzentrationen zu kompensieren und, daß die Schadwirkung von Ozon nicht allein von der mittleren Konzentration des Schadgases innerhalb eines längeren Zeitraums abhängig ist (NAGEL & GREGOR 1998). Auf dem UN ECE Workshop in Egham (UN ECE 1992) wurde den neuen Erkenntnissen mit der Einführung des sogenannten AOT40-Wertes (Accumulated exposure Over a Threshold of 40 ppb) Rechnung getragen.

Die Definition der akkumulierten Dosis oberhalb eines Schwellenwertes von 40 ppb (AOT40) als Bezugsbasis der Critical Levels für Ozon gründet auf den Ergebnissen von Begasungsversuchen an unterschiedlichen Pflanzenarten. Diese ließen einen hohen korrelativen Zusammenhang von Schädigungen bzw. Biomasseverlusten an Pflanzen und der kumulativen Überschreitung eines Stundenmittelwertes von 40 ppb Ozon erkennen. Das Limit von 40 ppb ist somit nicht als Grenzwert, sondern als statistisch ermittelte „cut-off-line“ zu verstehen. Gemäß seiner Definition berücksichtigt der AOT40-Wert sowohl die Höhe der Spitzenkonzentrationen an Ozon, als auch deren Häufigkeit (SMIATEK & KÖBLE 1998).

Bei der Berechnung des AOT40 werden in einer definierten Periode alle Überschreitungen eines Stundenmittels von 40 ppb summiert, sofern gleichzeitig drei weitere Bedingungen erfüllt sind. Zunächst muß das 1h-Mittel der Globalstrahlung größer 50 W/m^2 sein, das heißt für die Berechnung des AOT40 wird nur die Ozon-Immission während der Tageslichtstunden berücksichtigt. Hinter dieser Forderung steht die Überlegung, daß der jeweilige Rezeptor während des für die Berechnung des AOT40-Wertes entscheidenden Zeitraums zur Ozon-Aufnahme befähigt sein sollte. Dies ist bei Pflanzen nur dann der Fall, wenn die Stomata geöffnet sind. Bei einer Globalstrahlung $> 50 \text{ W/m}^2$ sind die Stomata geöffnet, sofern kein anderer limitierender Faktor die Öffnung der Stomata verhindert. An einen solchen weiteren limitierenden Faktor ist die zweite Vorbedingung für die Aufsummierung aller ppb-Stunden oberhalb 40 ppb geknüpft. Die Bodenfeuchte darf während des für die Berechnung des AOT40-Wertes entscheidenden Zeitraums keinen begrenzenden Faktor darstellen. Die dritte und letzte Vorbedingung für die Aufsummierung aller Ozon-Immissionswerte oberhalb der cut-off-line von 40 ppb ist die Beschränkung des Berechnungszeitraums auf die Zeitspanne der höchsten Sensitivität der Rezeptoren gegenüber Schadstoffwirkungen, nämlich den Zeitraum der Hauptwachstumsphase. Die Summe aller Überschreitungen eines Stundenmittels von 40 ppb, ausgedrückt in ppb-Stunden (ppb-hours), entspricht dem AOT40.

Am Beispiel der an der Station Balingen am 6. Mai 1992 gemessenen Ozon-Werte soll die Berechnung des AOT40-Wertes näher erläutert werden (Abbildung 2). Es gilt die Annahme, daß die Bodenfeuchte an diesem Tag keinen limitierenden Faktor darstellte. Die Säulen geben das Stundenmittel der Ozonkonzentration (ppb) von 1 Uhr bis 24 Uhr an. Die gepunktete Fläche im Hintergrund zeigt die Globalstrahlung (W/m^2) im Tagesverlauf. Die cut-off-line von 40 ppb wurde an jenem 6. Mai 1992 in der Zeit zwischen 11 und 21 Uhr, und damit von zehn 1h-Mitteln der Ozon-Immission, überschritten. Da aber die Globalstrahlung (gepunktete Fläche; rechte Skala) bereits um 20 Uhr auf einen Wert $< 50 W/m^2$ sank, werden die Werte der Ozon-Immission aus der Zeit nach 20 Uhr für die Berechnung des AOT40-Wertes nicht berücksichtigt. In die Berechnung des AOT40 gehen somit nur neun der zehn möglichen Stundenmittel dieses Tages ein (Kreuzschraffur). Von diesen neun 1h-Mitteln werden die ppb-Werte oberhalb der cut-off-line von 40 ppb addiert. Für den 6. Mai 1992 ergibt sich ein AOT40-Wert von 383 ppb-h. Analog dazu werden die AOT40-Werte aller in der Hauptwachstumsphase des Rezeptors gelegenen Tage ermittelt und zu einem Wert aufsummiert. Dieser Wert kann dann in Beziehung gesetzt werden zum, für den jeweiligen Rezeptor gültigen, Critical Level. Die derzeit aktuellen Critical Level sind Abbildung 1 zu entnehmen. Sie wurden in Kapitel 5 bereits näher erläutert.

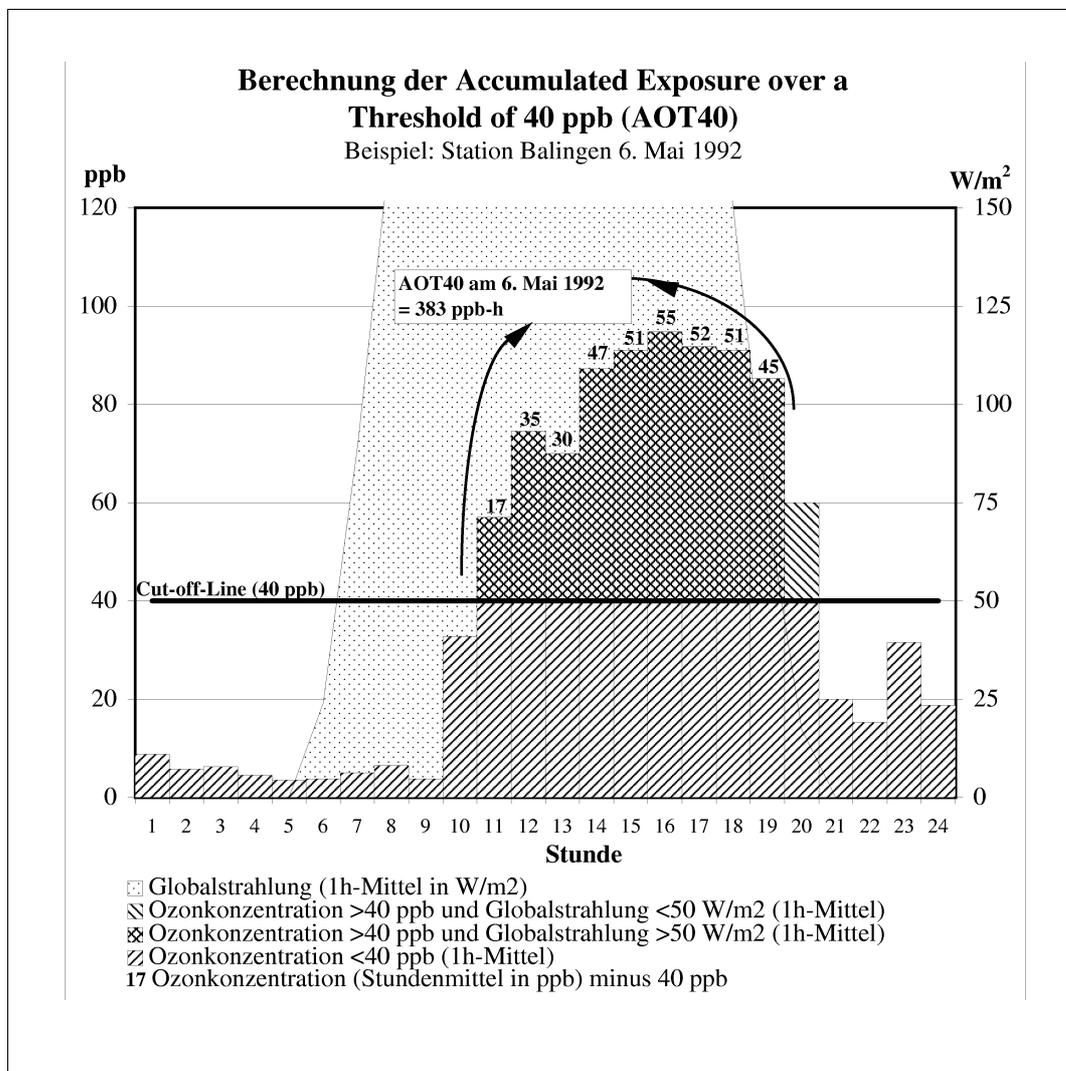


Abbildung 2: AOT40-Berechnung

6.2 Kartierungsmethode

Abbildung 3 zeigt die zur Kartierung der Überschreitung der Critical Levels für Ozon erforderlichen Arbeitsschritte in ihrem zeitlichen Ablauf. Am Beginn der Kartierungsarbeiten steht die Akquisition der Daten der Ozon-Immission, Solarstrahlung und Landnutzung. Die Daten der Ozonmeßstationen (Stundenwerte) werden zunächst hinsichtlich der Anzahl der Meßausfälle untersucht. Stationen mit einem Anteil an Meßausfällen von $> 30\%$, bezogen auf die Gesamtzahl der an dieser Station gemessenen Daten, werden nicht berücksichtigt. Alle Stationen mit Meßausfällen $< 30\%$ werden dem in GAUGER & KÖBLE (1997) beschriebenen Klassifizierungsverfahren unterzogen, um deren Lage zu Verkehrsemissionen festzustellen. Für die Berechnung der AOT40-Werte werden lediglich die Daten der gering oder nicht verkehrsbeeinflussten Stationen verwendet. In Tabelle 5 (siehe Kapitel 3) ist die Anzahl der für die Jahre 1991 bis 1995 insgesamt zur Verfügung stehenden Ozonmessungen, sowie die Anzahl der direkt, bzw. nicht direkt von Verkehrsemissionen beeinflussten Ozonmessungen dieser Jahre dargestellt. Karte 1 zeigt die nicht direkt von Verkehrsemissionen beeinflussten Stationen mit weniger als 30% Meßausfällen in ihrer räumlichen Verteilung.

Für die Berechnung der AOT40-Werte ist gemäß Kartierrichtlinie nur die während der Tageslichtstunden (Globalstrahlung $> 50 \text{ W/m}^2$) gemessene Ozon-Immission zu berücksichtigen (UN ECE 1996b). Strahlungsdaten liegen jedoch nicht für alle Meßstationen vor. Deshalb wird an dieser Stelle von den Vorgaben des Mapping Manuals (UN ECE 1997b) abgewichen.

GAUGER, KÖBLE & SMIATEK (1997) untersuchen auf der Basis von 16 deutschen Meßstationen den Einfluß des täglichen Berechnungszeitraums auf die Höhe des AOT40-Wertes. Die Ergebnisse zeigen überwiegend sehr geringe Abweichungen (im Mittel $2,6\%$), sodaß es angesichts fehlender Globalstrahlungsdaten vertretbar erscheint an dieser Stelle von der Kartiervorschrift des Mapping Manuals (UN ECE 1997b) abzuweichen und für die AOT40-Berechnung statt des Zeitraums mit Globalstrahlungsdaten $> 50 \text{ W/m}^2$ durchgehend den Zeitraum von 6.00 – 18.00 Uhr zu betrachten.

Abbildung 4 zeigt, erarbeitet auf Basis der Daten von 16 deutschen Meßstationen, den Verlauf von morgendlichem Beginn und abendlichem Ende der Tageslichtstunden im Zeitraum April bis September. Die täglichen Variationen (graue Linie) sind in Abhängigkeit vom Bewölkungsgrad sehr hoch. Im Monatsmittel (schwarze Balken) für Mai, Juni und Juli – der definierten Berechnungsphase für die AOT40-Werte für landwirtschaftliche Nutzpflanzen – ergibt sich jedoch ein sehr einheitlicher Verlauf. Der morgendliche Beginn des Zeitraums mit Globalstrahlungsdaten $> 50 \text{ W/m}^2$ liegt bei 6 Uhr, das abendliche Ende bei 18 Uhr. Für Waldgebiete wird der Zeitraum April – September betrachtet. Hier sind die monatlichen Schwankungen von Beginn und Ende des Zeitraums mit Globalstrahlungswerten $> 50 \text{ W/m}^2$ aufgrund des längeren Betrachtungszeitraums deutlicher ausgeprägt. Der Beginn liegt zwischen 6.00 Uhr und 7.15 Uhr, das Ende zwischen 16.30 Uhr und 18.00 Uhr.

Für alle Ozon-Meßstationen wird, unabhängig von der tatsächlichen Landnutzung, sowohl der AOT40-Wert für Waldökosysteme (April – September; 6-18 Uhr) als auch der AOT40-Wert für landwirtschaftliche Nutzpflanzen (Mai – Juli; 6-18 Uhr) berechnet. Die Zuordnung der AOT40-Werte zur Verteilung der tatsächlichen Landnutzung erfolgt in einem weiteren Arbeitsschritt. Die räumliche Verteilung von Wald und landwirtschaftlich genutzten Flächen wird den Landnutzungsdaten der CORINE Landuse Map entnommen. Den verschiedenen Landnutzungsclassen werden die entsprechenden Critical Levels zugeordnet (Karte 14).

Kartierung von Critical Levels für Ozon

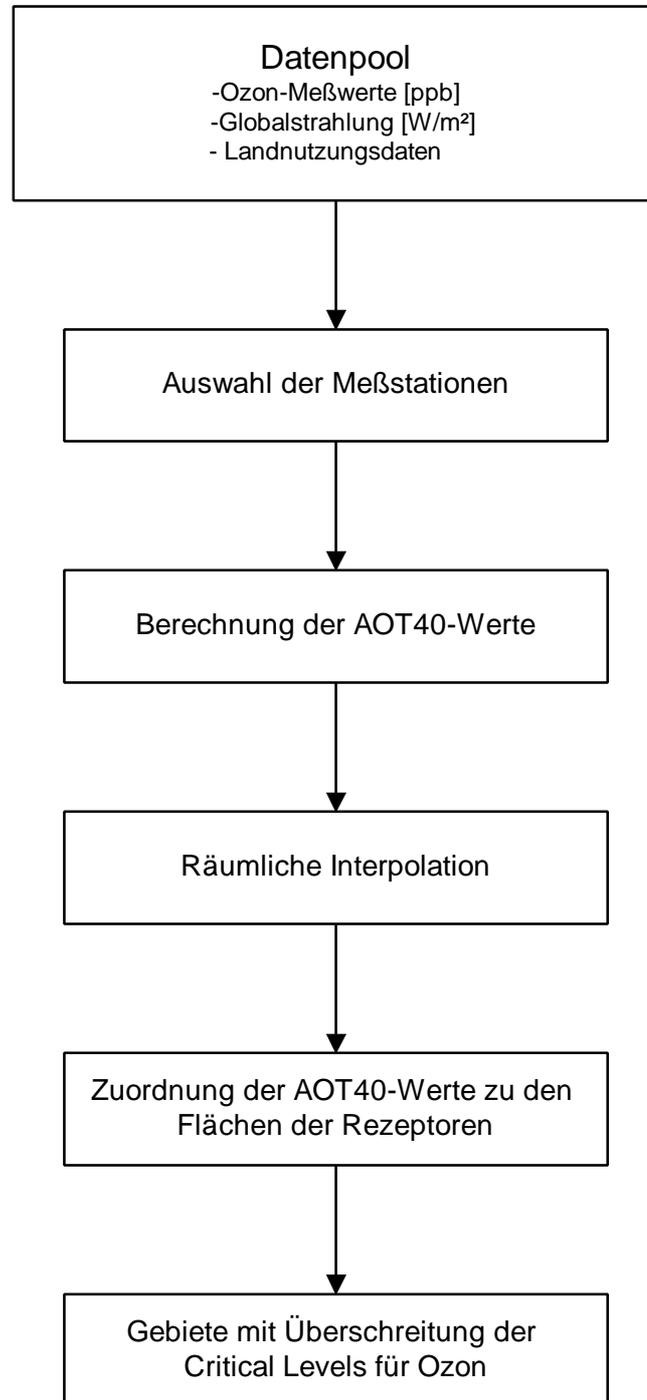


Abbildung 3: Verfahrensablauf der Kartierungsarbeiten

Anhand der AOT40-Werte aller nicht direkt von Verkehrsemissionen beeinflussten Stationen wird eine räumliche Interpolation der AOT40-Werte für die Gesamtfläche der BRD in einer Auflösung von $1 \cdot 1 \text{ km}^2$ durchgeführt. Hierbei wird unter ARC/INFO das Kriging-Verfahren angewendet. Die Interpolationsergebnisse lassen sich, wiederum mit Hilfe der Daten der CORINE Landuse Map, den Flächen der verschiedenen Rezeptoren zuordnen. In einem letzten Arbeitsschritt wird durch Verschneidung der Critical Levels-Karte mit den AOT40-Karten die Überschreitung der Critical Levels berechnet und kartiert.

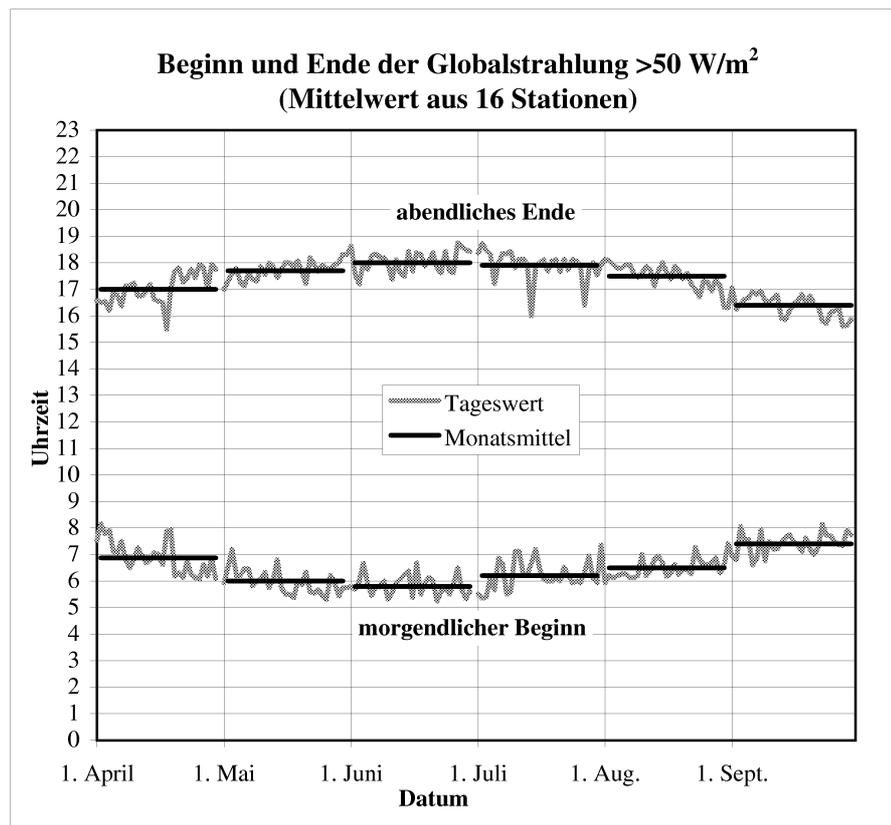


Abbildung 4: Beginn und Ende der Zeitspanne mit Globalstrahlung $> 50 \text{ W/m}^2$

6.3 Ergebnisse

Die Ozonbildung ist eng mit jährlich schwankenden klimatischen Faktoren, v. a. den Schwankungen der Sonneneinstrahlung verknüpft. Deshalb sollten AOT40-Berechnungen für fünf aufeinanderfolgende Jahre durchgeführt und die Ergebnisse gemittelt werden (SMIATEK & KÖBLE 1998). Für die im Rahmen dieses Projekts durchzuführenden Kartierungsarbeiten werden die Daten der Jahre 1991 bis 1995 verwendet.

Zunächst soll auf die AOT40-Werte für landwirtschaftliche Nutzpflanzen und naturnahe Ökosysteme, dann auf die für Waldökosysteme eingegangen werden. Zur Berechnung der AOT40-

Werte wurden die in Kapitel 5 beschriebenen rezeptorspezifischen Berechnungsverfahren angewendet. Die Berechnungen wurden jeweils für die Gesamtfläche der BRD durchgeführt. Eine räumliche Zuordnung der AOT40-Werte zu bestimmten Landnutzungsklassen erfolgt erst bei der Berechnung der Überschreitung der Critical Levels (Kapitel 6.3.3).

6.3.1 AOT40-Werte für landwirtschaftliche Nutzpflanzen und naturnahe Ökosysteme

Die Ergebnisse der AOT40-Berechnungen für landwirtschaftliche Nutzpflanzen und naturnahe Ökosysteme sind Karte 15 zu entnehmen. Bei Betrachtung der Kartierungsergebnisse für die Einzeljahre 1991 bis 1995 werden starke jährliche Schwankungen erkennbar, sowohl hinsichtlich der Höhe der berechneten Werte, als auch bezüglich der räumlichen Verteilung von Gebieten mit hohen, bzw. niedrigen AOT40-Werten. Um diese vorwiegend klimatisch bedingten Schwankungen auszugleichen, wurde der Mittelwert der 5-Jahresperiode 1991-1995 berechnet und kartiert (Karte 15).

Tabelle 7 zeigt die prozentualen Flächenanteile einzelner Klassen von AOT40-Werten gemessen an der Gesamtfläche der BRD, unter anderem den prozentualen Flächenanteil der Gebiete mit AOT40-Werten < 3000 ppb-h, was dem Flächenanteil der Gebiete mit Unterschreitung des Critical Levels für landwirtschaftliche Nutzpflanzen entspricht.

Tabelle 7: Ozon – AOT40-Werte für landwirtschaftliche Nutzpflanzen – Flächenanteile

Ozon					
AOT40 für landwirtschaftliche Nutzpflanzen					
AOT40 in ppb-h	Flächenanteil an der Gesamtfläche der BRD in %				
	1991	1992	1993	1994	1995
< 3000	21,2	1,9	3,2	0	0,002
3000 -< 8000	73,5	29,6	70,6	17,9	45,7
8000 -< 13000	5,3	56,2	25,3	79,9	48,1
> 13000	0	12,3	0,8	2,2	6,2

Während im Jahr 1991 der gesamte Nordwesten Deutschlands, dies entspricht 21,2 % der Gesamtfläche der BRD, AOT40-Werte < 3000 ppb-h aufwies, lag der Flächenanteil der Gebiete mit AOT40-Werten < 3000 ppb-h im Jahr darauf nur noch bei 1,9 %. Auch die räumliche Verteilung der Gebiete mit AOT40-Werten < 3000 ppb-h war 1992 eine völlig andere. Im Nordwesten der BRD, wo 1991 noch flächendeckend geringe AOT40-Werte berechnet werden konnten, werden 1992 AOT40-Werte von bis zu 8000 ppb-h festgestellt (Karte 15). Lediglich im Westen Hamburgs blieben die AOT40-Werte auch 1992 unter der für landwirtschaftliche Nutzpflanzen kritischen Marke von 3000 ppb-h. In 1992 liegen die Gebiete mit geringen AOT40-Werten im südlichen Bayerischen Wald, beziehungsweise im zentralen und südlichen Sachsen. Für das Jahr 1993 können erneut im Nordwesten der BRD relativ geringe AOT40-Werte festgestellt werden, wenn auch auf deutlich geringerer Fläche als 1991 (1993: 3,2 %). Daneben treten in Sachsen, Sachsen-Anhalt, Brandenburg und Mecklenburg-Vorpommern geringfügige Unter-

schreitungen des AOT40-Wertes von 3000 ppb-h auf. Keine, beziehungsweise nahezu keine Unterschreitung des AOT40-Wertes von 3000 ppb-h ist für die Jahre 1994, beziehungsweise 1995 zu konstatieren. In 1994 liegt der geringste AOT40-Wert bei 3916 ppb-h, 1995 nehmen die Gebiete mit AOT40-Werten < 3000 ppb-h lediglich 0,002 % der Gesamtfläche der BRD ein.

6.3.2 AOT40-Werte in Waldökosystemen

Die Ergebnisse der Berechnungen der AOT40-Werte für Waldökosysteme bestätigen die in Kapitel 6.3.1 bezüglich der AOT40-Werte für landwirtschaftliche Nutzpflanzen und naturnahe Ökosysteme gemachten Aussagen. Auch bei den AOT40-Werten für Waldökosysteme können starke Schwankungen zwischen den Einzeljahren festgestellt werden. Die Kartierungsergebnisse belegen starke Schwankungen, sowohl in räumlicher, als auch in zeitlicher Hinsicht (Karte 16). Tabelle 8 zeigt die prozentualen Flächenanteile einzelner Werteklassen gemessen an der Gesamtfläche der BRD, zum Beispiel den prozentualen Flächenanteil der Gebiete mit AOT40-Werten < 10000 ppb-h, was dem Flächenanteil der Gebiete mit Unterschreitung des Critical Levels für Waldökosysteme entspricht.

Die berechneten Maxima der AOT40-Werte schwanken zwischen 20398 ppb-h (1993) und 45628 ppb-h (1994). Im Bereich der Minima schwanken die AOT40-Werte zwischen 1309 ppb-h (1991) und 8837 ppb-h (1994). Der Critical Level für Waldökosysteme (10000 ppb-h) wird im Jahr 1994 auf 96,7 % der Gesamtfläche der BRD überschritten. Lediglich in Teilen Schleswig-Holsteins, Niedersachsens, Hamburgs und Mecklenburg-Vorpommerns bleiben die AOT40-Werte unter der für Waldökosysteme kritischen Marke von 10000 ppb-h (Karte 16). In den Jahren 1991 und 1993 hingegen bleibt der AOT40-Wert auf mehr als 50 % der Fläche der BRD unter 10000 ppb-h. Maximalwerte von > 20000 ppb-h treten 1994 lediglich auf kleiner Fläche auf (0,1 % Flächenanteil). Im Jahr 1992 hingegen werden AOT40-Werte von 20000 ppb-h und mehr auf 13,1 % der Fläche der BRD erreicht. Starke Überschreitungen des Critical Levels für Waldökosysteme sind in den Jahren 1991 bis 1995 für den Schwarzwald zu verzeichnen. Generell treten niedrige AOT40-Werte eher im norddeutschen, denn im süddeutschen Raum auf. Die Kartierungsergebnisse für die 5-Jahresperiode 1991-1995 bestätigen dies (Karte 16).

Tabelle 8: Ozon – AOT40-Werte für Waldökosysteme – Flächenanteile

Ozon					
AOT40 für Waldökosysteme					
AOT40 in ppb-h	Flächenanteil an der Gesamtfläche der BRD in %				
	1991	1992	1993	1994	1995
< 10000	55,3	20,5	52,3	3,3	13,4
10000 -< 15000	30,3	33,9	32,1	44,5	55,3
15000 -< 20000	8,5	32,5	13,7	52,1	25,9
> 20000	5,9	13,1	1,9	0,1	5,4

6.3.3 Überschreitung der Critical Levels für Ozon

Die Überschreitung der Critical Levels für Ozon wurde zunächst für die Einzeljahre 1991 bis 1995 und anschließend für den Gesamtzeitraum 1991 bis 1995 berechnet und kartiert (Karte 17). Dabei wurde die räumliche (landnutzungsabhängige) Zuordnung der Critical Levels vorgenommen. Die Tabellen 9 und 10 geben Auskunft über die Größe der prozentualen Flächenanteile von Gebieten mit Überschreitung der Critical Levels, gemessen an der Gesamtfläche des jeweiligen Rezeptors.

Ein Vergleich der Kartierungsergebnisse der Einzeljahre 1991 bis 1995 zeigt, daß sich das Jahr 1991 durch relativ geringe Überschreitungen der Critical Levels auszeichnet. Dennoch wird der Critical Level für landwirtschaftliche Nutzpflanzen auf 74,5 % der Fläche aller Agrargebiete überschritten (Tabelle 9). In 57,6 % aller Waldgebiete treten Überschreitungen des Critical Levels für Waldökosysteme auf. Unterschreitungen der Critical Levels kommen großflächig nur im Norden und Nordwesten Deutschlands vor. Überschreitungen von mehr als 200 % bleiben in diesem Jahr auf den Südwesten Deutschlands, vornehmlich auf den Schwarzwald, beschränkt. In 1992 wird der Critical Level für landwirtschaftliche Nutzpflanzen in nahezu ganz Deutschland deutlich überschritten (Karte 17 und Tabelle 9). Der Critical Level für Waldökosysteme wird in diesem Jahr auf 87,5 % der Waldfläche überschritten (Tabelle 10). Das Jahr 1993 ist insgesamt betrachtet etwas günstiger zu bewerten als das Jahr 1992. Der Critical Level für Waldökosysteme wird auf 36,9 % der Waldflächen nicht überschritten. Der Critical Level für landwirtschaftliche Nutzpflanzen hingegen wird in nahezu ganz Deutschland deutlich überschritten. 1994 ist das Jahr mit den höchsten AOT40-Werten und den extremsten Überschreitungen der Critical Levels innerhalb des betrachteten 5-Jahreszeitraum (Karte 17). Eine Unterschreitung von Critical Levels ist lediglich in Waldflächen Norddeutschlands (0,5 % der deutschen Waldfläche) zu erkennen. Im Jahr 1995 war die Situation nur geringfügig günstiger. In Ackergebieten treten flächendeckend Überschreitungen auf. Lediglich in einigen Waldgebieten blieben die AOT40-Werte unter den Critical Levels. Im 5-Jahresmittel 1991-1995 treten Unterschreitungen der Critical Levels nur kleinflächig und vorwiegend im Norden Deutschlands auf. Der Südwesten Deutschlands ist durch relativ hohe Überschreitungen der Critical Levels gekennzeichnet (Karte 17).

Tabelle 9: Ozon – Flächenanteil der Gebiete mit Überschreitung des Critical Levels für landwirtschaftliche Nutzpflanzen.

Ozon					
Flächenanteil der Gebiete mit Überschreitung des Critical Levels für landwirtschaftliche Nutzpflanzen					
Überschreitung in %	Flächenanteil an der Gesamtfläche der Agrargebiete der BRD in %				
	1991	1992	1993	1994	1995
keine	25,5	2	3,7	0	0
0 - 100	57,4	9,7	48,6	0,002	15
100 - 200	15,1	35,6	33,9	34,8	51,4
> 200	1,9	52,7	13,9	65,2	33,6

Tabelle 10: Überschreitung des Critical Levels für Waldökosysteme

Ozon					
Flächenanteil der Gebiete mit Überschreitung der Critical Levels für Waldökosysteme					
Überschreitung in %	Flächenanteil an der Gesamtfläche der Waldgebiete der BRD in %				
	1991	1992	1993	1994	1995
keine	42,4	12,5	36,9	0,5	6,7
0 – 100	48,3	69,9	59,2	99,4	83,5
100 – 200	8,5	16,3	3,9	0,1	9,8
> 200	0,7	1,3	0	0	0,02

7 Kartierung der Überschreitung der Critical Levels für SO₂

Für SO₂ werden Critical Levels für die Rezeptoren Flechten (10 µg/m³ Jahresmittel) Waldökosysteme und natürliche Vegetation (20 µg/m³ Halbjahres- und Jahresmittel) und landwirtschaftliche Nutzpflanzen (30µg/m³ Halbjahres- und Jahresmittel) unterschieden (Abbildung 1). Die Überschreitung der Critical Levels wurde jeweils mit ganzjährigem Zeitbezug kartiert.

7.1 Flechten

Die Kartierung der Überschreitung des Critical Levels für Flechten wird für die Jahre 1985 bis 1995 durchgeführt. Die Ergebnisse der Kartierungsarbeiten sind in den Karten 18 und 19 dargestellt. Der Critical Level für Flechten liegt bei 10 µg/m³. Dieser Wert wurde bis einschließlich 1987 in nahezu ganz Deutschland um mehr als 100 % überschritten. Seit 1988 ist eine Abnahme der Gebiete mit Überschreitung größer 100 % zu verzeichnen (Tabelle 11). Vermehrt treten Gebiete auf, in denen der Critical Level nicht überschritten wird. In den neunziger Jahren beschränken sich die Gebiete mit Überschreitungen um mehr als 100 % im wesentlichen auf das Gebiet der ehemaligen DDR und einige industriell geprägte Ballungsräume der alten Bundesländer. Im Jahr 1995 sind extreme Überschreitungen (> 100 % Überschreitung) nur in Sachsen, Thüringen, Sachsen-Anhalt und Südbrandenburg festzustellen.

Tabelle 11: SO₂ – Flächenanteil der Gebiete mit Überschreitung des Critical Levels für Flechten.

SO₂											
Flächenanteil der Gebiete mit Überschreitung des Critical Levels für Flechten											
Überschreitung in %	Flächenanteil an der Gesamtfläche der BRD in %										
	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995
keine	0,1	0,5	1,2	11,8	11,5	12,9	11,9	29,3	29,9	43,2	63,9
1-50	3,6	6,2	3,9	20,2	19,4	30,3	21,4	32,7	23,4	33,3	19,8
51-100	8,4	8,5	9,6	17,5	21,8	17,6	24,7	12,8	14,3	7,3	6
> 100	87,9	84,8	85,2	50,5	47,3	39,2	42	25,2	22,4	16,2	10,3

7.2 Waldökosysteme und natürliche Vegetation

Die Kartierung der Überschreitung des SO₂ Critical Levels für Waldökosysteme und natürliche Vegetation wird für die Jahre 1985 bis 1995 durchgeführt. Der Critical Level liegt bei einem Jahresmittel der SO₂-Immission von 20 µg/m³. Die Ergebnisse der Kartierungsarbeiten sind in den Karten 20 und 21 dargestellt. Der Rückgang der SO₂-Belastung der Umwelt innerhalb des betrachteten 11-Jahreszeitraums läßt sich am Rückgang der Gebiete mit Überschreitung des Critical Levels gut nachvollziehen. In den Jahren 1985 bis 1987 wird der Jahresmittelwert der SO₂-Belastung von 20µg/m³ in weiten Teilen Deutschlands noch deutlich überschritten. Von 1988 bis 1990 verbessert sich die Situation vornehmlich in Westdeutschland. Ab 1991 ist auch in den neuen Bundesländern eine deutliche Verbesserung zu verzeichnen. Im Jahr 1995 beschränken sich die Gebiete mit Überschreitung des Critical Levels für SO₂ auf Sachsen sowie die an Sachsen grenzenden Landstriche der Bundesländer Sachsen-Anhalt, Brandenburg und Thüringen. Im Maximum kann für 1995 eine Überschreitung des Critical Levels um 135 % festgestellt werden. Der Flächenanteil der Gebiete mit Überschreitung des Critical Levels um mehr als 100 % ging in den Jahren 1985 bis 1995 von 50,2 % auf 0,6 % zurück (Tabelle 12). Gleichzeitig stieg der Flächenanteil der Gebiete ohne Überschreitung des Critical Levels von 12 % auf 90 % der Fläche der BRD.

Tabelle 12: SO₂ – Flächenanteil der Gebiete mit Überschreitung des Critical Levels für Waldökosysteme und natürliche Vegetation.

SO₂											
Flächenanteil der Gebiete mit Überschreitung des Critical Levels											
für Waldökosysteme und natürliche Vegetation											
Überschreitung in %	Flächenanteil an der Gesamtfläche der BRD in %										
	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995
keine	12	15,2	14,9	49,8	53,3	61,1	58,7	75	77,7	84	90
1-50	14,7	20,6	20	21,6	16,2	9,8	18,7	7,3	6,3	7,3	6,1
51-100	23,1	23,5	22,3	8,4	5,8	5,2	5,7	4,1	3,9	4,6	3,3
> 100	50,2	40,7	42,8	20,2	24,7	23,9	16,9	13,6	12,1	4,1	0,6

7.3 Landwirtschaftliche Nutzpflanzen

Die Kartierung der Überschreitung des SO₂ Critical Levels für landwirtschaftliche Nutzpflanzen wurde ebenfalls für die Jahre 1985 bis 1995 durchgeführt. Der Critical Level für landwirtschaftliche Nutzpflanzen liegt bei einem Jahresmittel der SO₂-Immission von 30 µg/m³. In den Jahren 1985 bis 1987 ist der Critical Level sowohl auf dem Staatsgebiet der alten wie auch auf dem der neuen Bundesländer großräumig überschritten. Von 1988 bis 1990 beschränken sich eintretende Verbesserungen auf das Gebiet der alten Bundesländer (Karte 22). Ab 1991 verbessert sich die Situation auch in den neuen Bundesländern. 1995 bleiben Überschreitungen auf Teilgebiete Sachsens, Sachsen-Anhalts und Thüringens beschränkt. Im Maximum wird der Critical Level für landwirtschaftliche Nutzpflanzen in 1995 um 56 % überschritten (Karte 23). Der Flächenanteil der Gebiete mit Überschreitung des Critical Levels um mehr als 100 % sank im Zeitraum 1985 bis 1995 von 21,9 % auf 0 % (Tabelle 13). Gleichzeitig stieg der Flächenanteil der Gebiete ohne Überschreitung des Critical Levels von 26,9 % auf 96,1 % der Fläche der BRD.

Tabelle 13: SO₂ – Flächenanteil der Gebiete mit Überschreitung des Critical Levels für landwirtschaftliche Nutzpflanzen.

SO₂											
Flächenanteil der Gebiete mit Überschreitung des Critical											
Levels für landwirtschaftliche Nutzpflanzen											
Überschreitung in %	Flächenanteil an der Gesamtfläche der BRD in %										
	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995
keine	26,9	36,2	35,4	71,6	69,4	71	77,4	82,4	84	91,5	96,1
1-50	34,1	32,5	32,1	10,3	8,8	8	7,3	5,4	5,3	5,7	3,7
51-100	17,1	15,4	15	4,8	5,8	8,6	3,1	4	4,6	2,6	0,2
> 100	21,9	15,9	17,5	13,3	16	12,4	12,2	8,2	6,1	0,2	-

8 Kartierung der Überschreitung der Critical Levels für NO_x

Die Kartierung der Überschreitung des Critical Levels für NO_x wird für die Jahre 1992 bis 1995 durchgeführt. Der Critical Level liegt für alle Rezeptoren bei einem Jahresmittel der NO_x-Immission von 30 µg/m³. Für das Jahr 1991 standen bis Ende April 1999 noch keine NO-Immissionsdaten zur Verfügung. Die Berechnung der NO_x-Immission sowie der Überschreitung des Critical Levels konnte daher für dieses Jahr nicht vorgenommen werden. Karte 24 zeigt das Ergebnis der Kartierungsarbeiten für die Jahre 1992 bis 1995. Der Critical Level wird im betrachteten Zeitraum nahezu flächendeckend überschritten. Lediglich im Jahr 1995 sind größere zusammenhängende Gebiete erkennbar, in denen der Critical Level unterschritten wird. Es sind dies im wesentlichen das zentrale und östliche Mecklenburg-Vorpommern, das Grenzgebiet der Bundesländer Niedersachsen, Thüringen und Sachsen-Anhalt, sowie Teile Südbrandenburgs. In den Jahren 1992 bis 1994 nehmen die Gebiete mit Unterschreitung des Critical Levels maximal 1,2 % der Gesamtfläche der Bundesrepublik Deutschland ein (Tabelle 14). Im Jahr 1995 vergrößert sich der Flächenanteil auf 7,3 % der Gesamtfläche. Überschreitungen des Critical Levels von mehr als 100 % treten vornehmlich im Westen Deutschlands und in Berlin auf (Karte 24). In einzelnen Jahren wird der Critical Level aber auch in Hamburg (1992, 1993), im nordöstlichen Niedersachsen (1992, 1993), in Schleswig-Holstein (1993) oder im Grenzgebiet der Länder Thüringen, Sachsen, Sachsen-Anhalt (1995) um mehr als 100 % überschritten. Darüberhinaus treten in einzelnen Jahren vornehmlich in der Umgebung größerer Städte punktuell starke Überschreitungen des Critical Levels auf, so zum Beispiel im Jahr 1993 im Raum Nürnberg, Regensburg oder Ingolstadt. Der Flächenanteil der Gebiete, die von unterschiedlich starken Überschreitungen des Critical Levels betroffen sind schwankt in den einzelnen Jahren. In 1994 haben die Gebiete mit extremer Überschreitung des Critical Levels (>100 % Überschreitung) einen relativ geringen Flächenanteil (Tabelle 14), wobei zu berücksichtigen ist, daß die Datengrundlage für das Jahr 1994 im Vergleich zu den anderen betrachteten Jahren deutlich schlechter ist.

Tabelle 14: NO_x – Flächenanteile der Gebiete mit Überschreitung des Critical Levels.

NO _x				
Flächenanteile der Gebiete mit Überschreitung des Critical Levels				
Überschreitung des Critical Levels in %	Flächenanteil an der Gesamtfläche der BRD in %			
	1992	1993	1994	1995
keine	1,1	0,4	1,2	7,3
1 -50	14,4	17,5	62,3	45,8
51 - 100	61	58,1	31	30,4
> 100	23,5	24	5,5	16,5

9 Fazit und Ausblick

Für die Luftschadstoffe Ozon, Schwefeldioxid und Stickoxide konnten kritische Luftschadstoff-Konzentrationen sowie deren Überschreitung in verschiedenen Ökosystemen kartiert werden. Kartiert wurde jeweils die Überschreitung der Langzeit-Critical Levels. Für Ozon werden Critical Levels für Waldökosysteme sowie für landwirtschaftliche Nutzpflanzen und naturnahe Ökosysteme unterschieden. Betrachtet wurde der 5-Jahreszeitraum 1991 bis 1995. In großen Teilen Deutschlands wurden die Critical Levels für Ozon zwischen 1991 und 1995 deutlich überschritten. Für Schwefeldioxid standen Immissionsdaten für die Jahre 1985 bis 1995 zur Verfügung. Es werden Critical Levels für Flechten, landwirtschaftliche Nutzpflanzen, sowie Waldökosysteme und natürliche Vegetation unterschieden. Der Critical Level für Flechten ($10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ Jahresmittel) wird zwischen 1985 und 1987 noch nahezu flächendeckend überschritten. Bis 1995 ist eine stetige Abnahme der Gebiete mit Überschreitung des Critical Levels festzustellen. Ähnliches gilt für die Überschreitung des SO_2 -Critical Levels für Waldökosysteme und natürliche Vegetation ($20 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Der Critical Level für landwirtschaftliche Nutzpflanzen liegt bei $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Bereits 1985 gibt es im Nordwesten und Süden Deutschlands Bereiche, in denen der Critical Level nicht überschritten wird. Bis 1995 verringert sich der Flächenanteil mit Überschreitung des Critical Levels so weit, daß Überschreitungen nahezu ausschließlich in Sachsen auftreten. Für NO_x existiert ein Critical Level für die gesamte Vegetation ($30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ Jahresmittel). Im betrachteten Zeitraum (1992-1995) wird dieser Wert in weiten Teilen Deutschlands überschritten. Vornehmlich im Westen Deutschlands treten Überschreitungen $> 100 \%$ auf. Lediglich 1995 gibt es größere zusammenhängende Gebiete, in denen der Critical Level nicht überschritten wird.

Bei der Bewertung der Kartierungsergebnisse muß die jeweils zugrunde liegende Datenlage beachtet werden. Insbesondere die Dichte des Meßnetzes der Immissionsmessungen ist von Bedeutung. Je dichter das Meßnetz desto höher die räumliche Gültigkeit der interpolierten Werte. Für Schwefeldioxid ist die Datenlage am besten. Für Ozon und Stickoxide stehen weniger Meßdaten zur Verfügung. Darüberhinaus wurden bei Ozon und Stickoxiden lediglich die Meßdaten der nicht direkt von Emissionen des Verkehrs beeinflussten Stationen berücksichtigt, was die Datenbasis weiter schmälert. Dennoch sollte die Datenbasis auch für die Kartierung der Überschreitung der Critical Levels für Ozon und Stickoxide genügen. Die Verbreiterung der Datenbasis ist eine Anforderung an künftige Kartierungsarbeiten. Des weiteren könnte das Verfahren zur Klassifizierung der Stationen entsprechend deren Lage zur Emissionsquelle Verkehr verfeinert werden. Bei Ozon könnte versucht werden eine Höhenkorrektur der gemessenen Immissionswerte zu berücksichtigen. Schließlich könnte bei verbesserter Datenlage eine Kartierung der Kurzzeit-Critical Levels für Ozon und Stickoxide vorgenommen werden.

Auf dem UN/ECE-Workshop „Critical Levels for Ozone – Level II“ in Gerzensee wurde die Notwendigkeit der Entwicklung eines flüssebasierten Level II-Ansatzes erkannt (UN ECE 1999). In Anbetracht vieler noch offener Fragen auf dem Gebiet der Wirkungsforschung wird dieses Ziel nur langfristig erreichbar sein. Als Interimslösung wurde die Modifizierung der für den Level I-Ansatz berechneten AOT40-Werte vorgeschlagen. Faktoren, die die Sensitivität von Pflanzen gegenüber Ozon beeinflussen, zum Beispiel der Einfluss des Bodenfeuchtedefizits, sollen quantifiziert und in die Methodik der Level II Kartierung integriert werden. Hier besteht weiterer Forschungsbedarf.

Literatur

- BACH, W., GEORGII, H.-W., STEUBING, L. (1995): Schadstoffbelastung und Schutz der Erdatmosphäre. Umweltschutz - Grundlagen und Praxis, Bd. 7. 188 S.
- BAUMBACH, G., BAUMANN, K., DRÖSCHER, F., GROSS, H., STEISSLINGER, B. (1993): Luftreinhaltegesetz. 461 S.
- BAYERISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR LANDESENTWICKLUNG UND UMWELTFRAGEN (1995): Ozon: Wirkung auf Mensch und Umwelt. München. 108 S.
- BECKMANN, J. (1995): Ozonsmog - Großstädte als Ozonquellen. Greenpeace Studie. Freiburg i. Br. 55 S.
- BROSE, G. O. (1981): Das bodennahe Ozon im Kölner Raum. Dissertation Math.-Naturwiss. Fakultät d. Univ. Köln. 84 S.
- BRUCKMANN, P., PIELERT, W., LACOMBE, R., LUTZ, M., MÜLLER, W.J., KÜLSKE, S., PFEFFER, H.U. (1994): Die erhöhten Ozonkonzentrationen der Sommer 1990 bis 1992 in Deutschland. Staub - Reinhaltung der Luft 54. S. 33-38
- BRUNNERT, H. (1997): Kombinationswirkungen zwischen der Belastung von Pflanzen durch troposphärisches Ozon und Pflanzenschutzmittel. Landbauforschung Völkenrode Heft 1/1997. S. 1-19.
- BUNDESAMT FÜR ERNÄHRUNG U. FORSTWIRTSCHAFT(): Einfluß von Luftverunreinigungen auf Böden, Gewässer, Flora und Fauna. Arbeitsmaterialien des Bundesamtes für Ernährung und Forstwirtschaft. S. 100-204
- DAVIES, T.D., SCHUEPBACH, E. (1994): Episodes of high ozone concentrations at the earth's surface resulting from transport down from the upper troposphere/lower stratosphere: a review and case studies. Atmospheric Environment Vol. 28, No. 1. PP 53-68.
- DEPARTMENT OF THE ENVIRONMENT (1992): Ozone in the United Kingdom.
- DEUTSCHER WETTERDIENST (1995): Ozonbulletin des Deutschen Wetterdienstes. Offenbach a. M.
- DRÜEKE, M. (1995): Die räumliche Modellierung bodennaher Ozonimmissionen im Mesoscale: ein Beitrag zur Regionalisierung von Luftschadstoffbelastungen unter Einsatz geostatischer Verfahren. Dissertation der Universität Trier. Berichte aus der Geowissenschaft. Aachen. 34 S.
- ELSTNER, E. F. (1996): Ozon in der Troposphäre. Bildung, Eigenschaften, Wirkungen. Akademie für Technikfolgenabschätzung Baden-Württemberg (Hrsg.). 162 S.
- EMEP/MSCW (1999): Transboundary Photo-oxidants in Europe. Report 2/99. 58 p.
- ERISMAN, J.W. (1994): Evaluation of a surface resistance parametrization of sulphur dioxide. Atmospheric Environment Vol. 28, No. 16. PP 2583-2594.
- ERISMAN, J.W., VAN PUL, A., WYERS, P. (1994): Parametrization of surface resistance for the quantification of atmospheric deposition of acidifying pollutants and ozone. Atmospheric Environment Vol. 28, No. 16. PP 2595-2607.
- FEISTER, U., WARMBT, W. (1988): Long-Term Measurements of surface Ozone in the German Democratic Republic. Journal of Atmospheric Chemistry 5. PP 1-21
- FRICKE, W. (1980): Die Bildung und Verteilung von anthropogenem Ozon in der unteren Troposphäre. Dissertation Fachbereich Geowiss. d. Universität Frankfurt a. M. 133 S.
- FUCHS, F. (1994): Modellierung der Ozon-Immissionsbelastung in Rheinland-Pfalz: Studien zur physikochemischen Entwicklung von Oxidantien in anthropogen kontaminierten Luftmassen. Mainzer Geographische Studien, 38. 290 S.
- FUHRER, J., SKÄRBY, L., ASHMORE, M.R. (1997): Critical levels for ozone effects on vegetation in Europe. Environmental Pollution Vol. 97, No. 1-2. PP 91-106.

- GASCH, J. (1991): Ozon im Wald: Dynamik und vertikale Verteilung. Dissertation der Universität für Bodenkultur, Wien.
- GAUGER, T., KÖBLE, R., SMIATEK, G. (1997): Kartierung kritischer Belastungskonzentrationen und -raten für empfindliche Ökosysteme in der Bundesrepublik Deutschland und anderen ECE-Ländern. Teil 1: Deposition Loads und Teil 2: Critical levels. Endbericht zum Forschungsvorhaben 106 01 061. Im Auftrag des Umweltbundesamtes. 126. u. 75 S.
- GEISS, H., VOLZ-THOMAS, A., (1993): Lokale und regionale Ozonproduktion: Chemie und Transport. Institut für Chemie und Dynamik der Geosphäre. Jülich. 168 S.
- GREGOR, H.-D. (1993): Umweltqualitätsziele, Umweltqualitätskriterien und -standards: Bestandsaufnahme und konzeptionelle Überlegungen. Umweltbundesamt (unveröffentl.). Berlin.
- GREGOR, H.-D. (1995): Das Critical Load/Levels Konzept - Ein ökosystemarer Ansatz für Umweltindikatoren auf der Basis von Wirkungsschwellen. In: Umweltgeologie heute, 5. Umweltqualitätsziele, natürliche Variabilität, Grenzwerte.
- GRÜNHAGE, L. (1992): Auswirkungen von Ozon auf Pflanzen. Umweltplanung, Arbeits- und Umweltschutz, 143. 74 S.
- HERTSTEIN, U., GRÜNHAGE, L., JÄGER, H.-J. (1995): Assessment of past, present and future impacts of ozone and carbon dioxide on crop yields. Atmospheric Environment Vol. 29, No. 16. PP 2031-2039.
- HITZLER, G., MÖRGENTHALER, V. (1995): Strategien zur Verminderung verkehrsbedingter Emissionen von Ozonvorläufersubstanzen in Ballungsgebieten. Karlsruhe. 224 S.
- KLEY, D., GEISS, H., MOHNEN, V.A. (1994): Tropospheric ozone at elevated sites and precursor emissions in the United States and Europe. Atmospheric Environment Vol. 28, No. 1. PP 149-158.
- KÖBLE, R., NAGEL, H.-D., SMIATEK, G., WERNER, B. (1993): Kartierung der Critical Loads/Levels in der Bundesrepublik Deutschland. Abschlußbericht des FE Vorhabens 108 02 080 "Erfassung immissionsempfindlicher Biotope in der Bundesrepublik Deutschland und in anderen ECE-Ländern". Im Auftrag des Umweltbundesamtes Berlin. 183 S.
- KULL, U. (1991): Physiologische Wirkungen von Luftschadstoffen auf Pflanzen. Jh. Ges. Naturkde. Württ. 146. S. 5-15
- LÄNDERAUSSCHUß FÜR IMMISSIONSSCHUTZ (1994): Die erhöhten Ozonkonzentrationen der Sommer 1991 und 1992: synoptische Darstellung der bodennahen Ozonkonzentrationen in der BRD. LAI-Schriftenreihe, 2. Berlin 91 S.
- LANDESAMT FÜR UMWELT UND GEOLOGIE SACHSEN (1994): Ozonbelastung in Sachsen: Halbjahresbericht . Radebeul.
- LANDESAMT FÜR UMWELTSCHUTZ, SACHSEN-ANHALT (1994): Immissionsschutzbericht 1993. Berichte des Landesamtes für Umweltschutz, Sachsen-Anhalt 1994, H. 12. 73 S.
- LANDESAMT FÜR UMWELTSCHUTZ SACHSEN-ANHALT (1997): Immissionsschutzbericht 1996. Berichte des Landesamtes für Umweltschutz Sachsen-Anhalt, Heft 22.
- LANDESANSTALT FÜR UMWELTSCHUTZ BADEN-WÜRTTEMBERG (1991): Ozon in Baden-Württemberg. LfU, Referat 31 (Luftreinhaltung, Klima). Karlsruhe.
- LANDESANSTALT FÜR UMWELTSCHUTZ BADEN-WÜRTTEMBERG (1992): Die Luft in Baden-Württemberg. Jahresbericht 1991. LfU.Karlsruhe.
- LEFOHN, A.S., KRUPA, S.V., WINSTANLEY, D. (1990): Surface ozone exposures measured at clean locations around the world. Environmental Pollution Vol. 63. PP 189-224.
- LEISEN, P. (1992): Abschätzung verkehrsbedingter Luftbelastungen durch Modelluntersuchungen und anhand praktischer Beispiele. VDI-Bericht Band 952. S.: 253-275.
- LENZ, R. J. M. (1995b): Kritische Stoffeinträge: neue Beurteilungsgrundlagen für Ökosystembelastungen? Grenzwerte und Grenzwertproblematik im Umweltbereich. 27. Hohenheimer Umwelttagung, 27.01.1995. S. 121-132

- LERNER, A. (1994): Ozon-Stickoxid-Korrelationen in der Troposphäre. Dissertation der Universität Heidelberg. 254 S.
- LOIBL, W., WINIWARTER, W., KOPSCA, A., ZUEGER, J., BAUMANN, R. (1994): Estimating the spatial distribution of ozone concentrations in complex terrain. *Atmospheric Environment* Vol. 28, No. 16. PP 2557-2566.
- MATHERON, G. (1963): Principles of Geostatistics. *Economic Geology*, 58. S. 1246-1262
- MILLER, P.R. (1993): Response of forests to ozone in a changing atmospheric environment. *Angewandte Botanik* 67. PP 42-46.
- MOUSSIOPOULOS, N. (1993): Kraftfahrzeugemissionen und Ozonbildung. Berlin. 137 S.
- MÜLLER-WESTERMEIER, G. (1995): Numerisches Verfahren zur Erstellung klimatologischer Karten. *Berichte des Deutschen Wetterdienstes*, Nr. 193. 18 S.
- NAGEL, H.-D. & GREGOR, H.-D. (1999): Ökologische Belastungsgrenzen – Critical Loads & Levels: Ein internationales Konzept für die Luftreinhaltepolitik.
- OBERMEIER, A. (1995): Photosmog: Möglichkeiten und Strategien zur Verminderung des bodennahen Ozons. Landsberg. 184 S.
- PAULY, M., DRÜEKE, M. (1996): Räumliche Modellierung der Ozonimmissionen im Mesoscale. *Gefahrstoffe - Reinhaltung der Luft* 56. S. 225-230.
- PEDERSEN, U., LEFOHN, A.S., (1994): Characterizing surface ozone concentrations in Norway. *Atmospheric Environment* Vol. 28, No. 1. PP 89-94.
- PLEIJEL, H., WALLIN, G., KARLSSON, P., SKÄRBY, L., SELLDEN, G. (1995b): Gradients of ozone at a forest site and over a field crop - consequences for the AOT40 concept of critical level. *Water, Air and Soil Pollution* 85. PP 2033-2038.
- REIML, D. (1997): Wirkungsmessung von Ozon und Photooxidantien in einem ländlichen und in einem verkehrsbeeinflussten Gebiet. *Gefahrstoffe - Reinhaltung der Luft* 57. S. 61-64.
- ROEMER, M. (1996): Trends of tropospheric ozone over Europe. Dissertation der Universität Utrecht. 147 p.
- ROIDER, F. (1994): Das bodennahe Ozon in Bayern. 136 S.
- ROSENBAUM, B., STRICKLAND, T.C., MCDOWELL, M. K. (1994): Mapping critical levels of ozone, sulfur dioxide and nitrogen dioxide for crops, forests and natural vegetation in the United States. *Water, Air and Soil Pollution* 74. PP 307-319.
- RÖTH, E.-P. (1994): Ozonloch, Ozonsmog: Grundlagen der Ozonchemie. Mannheim. 127 S.
- SCHNEIDER, U. (1992): Die Verteilung des troposphärischen Ozons im bayerischen Nordalpenraum. Dissertation der Universität Mainz. Schriftenreihe des Fraunhofer-Instituts für Atmosphärische Umweltforschung, 8. Frankfurt a. M. 141 S.
- SEGSCHNEIDER, H.-J. (1995): Auswirkungen atmosphärischer Stickoxide (NO_x) auf den pflanzlichen Stoffwechsel: Eine Literaturübersicht. *Angewandte Botanik* 69: S. 60-85.
- SENNEWALD, E. (1996): Modellierung von Immissionsverteilungen: Modelle zur Ozonprognose und zur flächendeckenden Abschätzung von Immissionskonzentrationen; theoretische Grundlagen und praktische Anwendungen. Dissertation der Universität Karlsruhe. 308 S.
- SIMPSON, D., KRZYSZTOF, O., SEMB, A., STOREN, E., UNGER, S. (1997b): Photochemical oxidant modelling in Europe: multi-annual modelling and source-receptor relationships. *EMEP/MS-CW 3/97*. 75 p.
- SONNEMANN, G. (1992): Ozon: natürliche Schwankungen und anthropogene Einflüsse. Berlin. 316 S.
- STEIL, P. (1997): Auswirkungen verringerter NO_x-Konzentrationen an Wochenenden auf die O₃-Immissionen im Raum München. *Gefahrstoffe - Reinhaltung der Luft* 57. S. 471-474.

- SUPPAN, P. (1996): Bildung und Verhalten der Photooxidantien Ozon und Peroxyacetylnitrat (PAN) in Regionen unterschiedlicher Luftschadstoffbelastung. Münchner Universitätschriften, 71. München. 174 S.
- TEUFEL, D. (1996): Bodennahes Ozon: Belastungen, Gegenmaßnahmen, Wirksamkeit des Sommer-Smog-Gesetzes. Heidelberg. 37 S.
- UN ECE (1988): ECE Critical Levels Workshop. Report from a workshop held at Bad Harzburg. Umweltbundesamt. Berlin.
- UN ECE (1989): UN ECE Workshop on Mapping Critical Loads. Bad Harzburg (Germany), 6.-10.09.1989.
- UN ECE (1990): Draft Manual Methodologies and Criteria for Mapping Critical Levels/Loads and Geographical Areas where they are Exceeded. Umweltbundesamt. Berlin. 98 p.
- UN ECE (1992): Critical Levels of Air Pollutants for Europe. Background Papers Prepared for the UN ECE. Workshop on Critical Levels in Egham (U.K.), 23.-26.03.1992. Air Quality Division, Department of the Environment. London (U.K.). 209 p.
- UN ECE (1993a): Critical Levels for Ozone a UN ECE. Report from a workshop held at Bern (Switzerland), 01.-04.11.1993. Swiss Federal Office of Environment, Forests and Landscape and Federal Research Station for Agricultural Chemistry and Environmental Hygiene (FAC). Liebefeld/Bern (Switzerland).
- UN ECE (1993b): Manual on Methodologies and Criteria for Mapping Critical Levels/Loads and Geographical Areas where they are Exceeded. Umweltbundesamt Texte 25/93. Berlin. 109 p.
- UN ECE (1994): Manual on methods and criteria for harmonized sampling, assessment, monitoring and analysis of the effect of air pollutants on forests. International Co-operative Programme on Assessment and Monitoring of Air Pollution Effects on Forests. Editors: Programme Coordinating Centre West. Federal Research Centre for Forestry and Forest Products, Hamburg (BFH). Programme Coordinating Center East. Forestry and Game Management Research Institute, Praha (VULHM). 177 p.
- UN ECE (1995): EMEP Workshop on the Control of Photochemical Oxidants over Europe (Background Papers). 24.-27.10.1995 in St. Gallen (Switzerland). Swiss Federal Office of Environment, Forests and Landscape. Bern (Switzerland).
- UN ECE (1996a): Critical Loads for Ozone in Europe: Testing and Finalising the Concepts. Report from a UN ECE Workshop held in Kuopio (Finland), 15.-17.04.1996.
- UN ECE (1996b): Manual on methodologies for Mapping Critical Loads/Levels and geographical areas where they are exceeded. Umweltbundesamt Texte 71/96. Berlin.
- UN ECE (1996c): Exceedances of Critical Loads and Levels. Spatial and temporal interpretation of elements in landscape sensitive to atmospheric pollutants. Report from a Workshop held in Vienna, 22.-24.11.1995. Federal Ministry for Environment, Youth and Family, Conference Papers vol. 15. Vienna (Austria).
- UN ECE (1999): Critical Levels for Ozone – Level II. Workshop under the Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution of the United Nations Economic Commission for Europe (UN/ECE), held in Gerzensee, Switzerland, 11-15 April 1999. 333 p..
- VANDERSEE, W., WEGE, K., WEIGL, E., CLAUDE, H. H. (1993): Ozonstudien am Hohenpeißenberg. Berichte des Deutschen Wetterdienstes.
- WIENHAUS, O., LUX, H., REUTER, F., ZIMMERMANN, F. (1994): Ergebnisse langjähriger Immissions- und Depositionsmeßreihen aus dem südsächsischen Raum. Staub - Reinhaltung der Luft 54. S. 71-74.

Ozon-Meßstationen 1991 - 1995

(nur verkehrsfertig gelegene Meßstationen berücksichtigt)

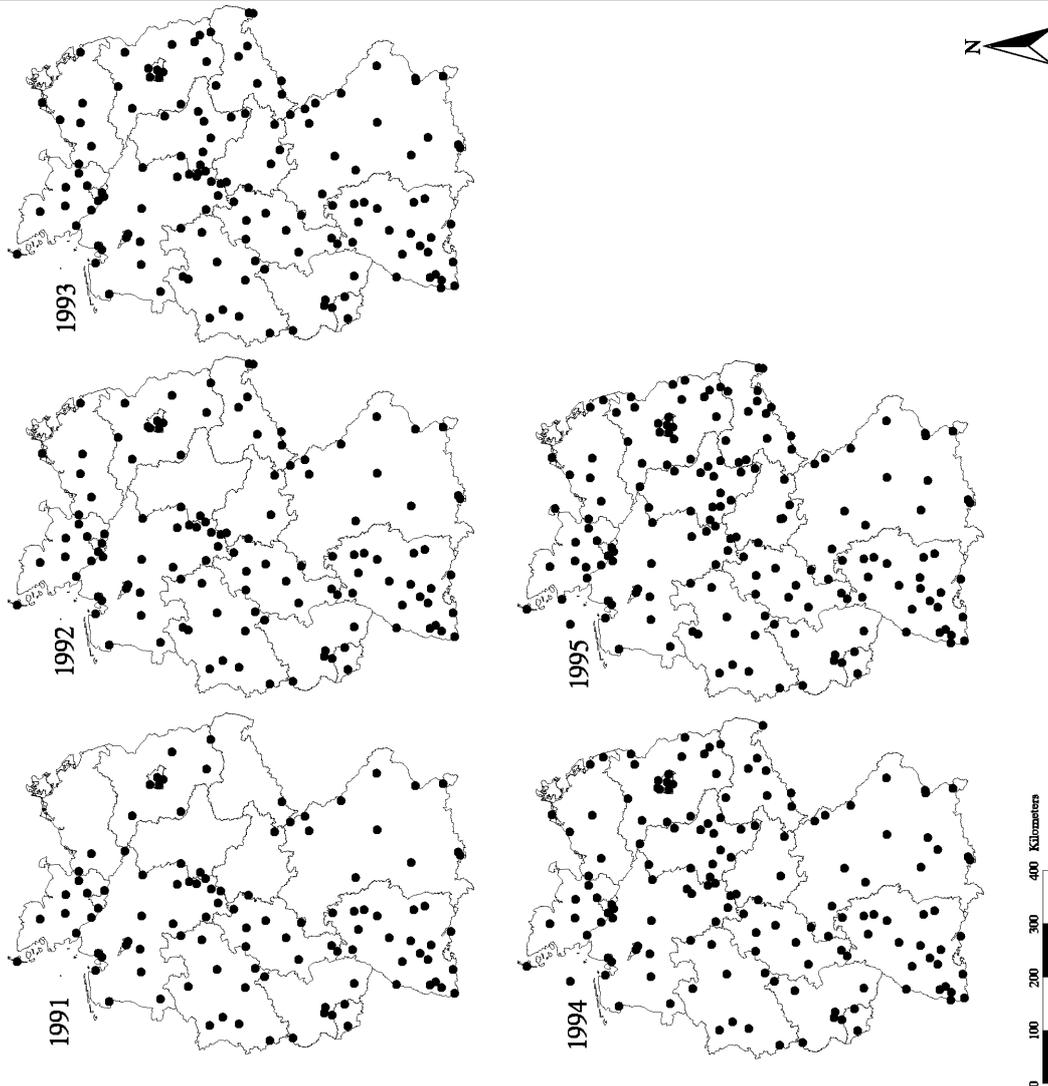
• Meßstation

Datenquellen:
Landesanstalten für Umweltschutz,
Umweltbundesamt

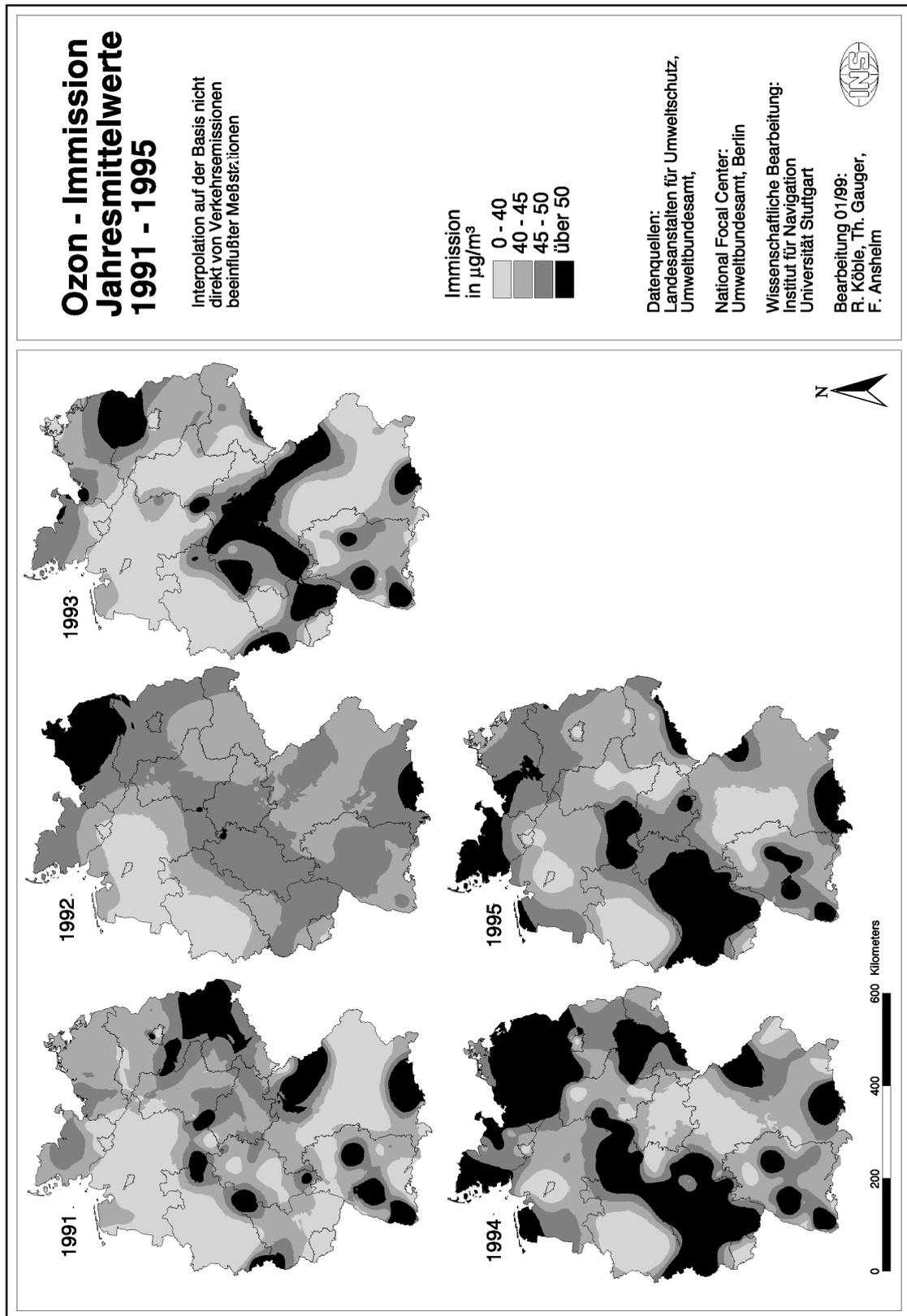
National Focal Center:
Umweltbundesamt, Berlin

Wissenschaftliche Bearbeitung:
Institut für Navigation
Universität Stuttgart

Bearbeitung 03/99:
F. Anshelm, Th. Gauger,
R. Köhle



Karte 1: Ozon-Meßstationen 1991-1995



Karte 2: Ozon-Immission 1991-1995

SO₂ - Meßstationen 1985 - 1990

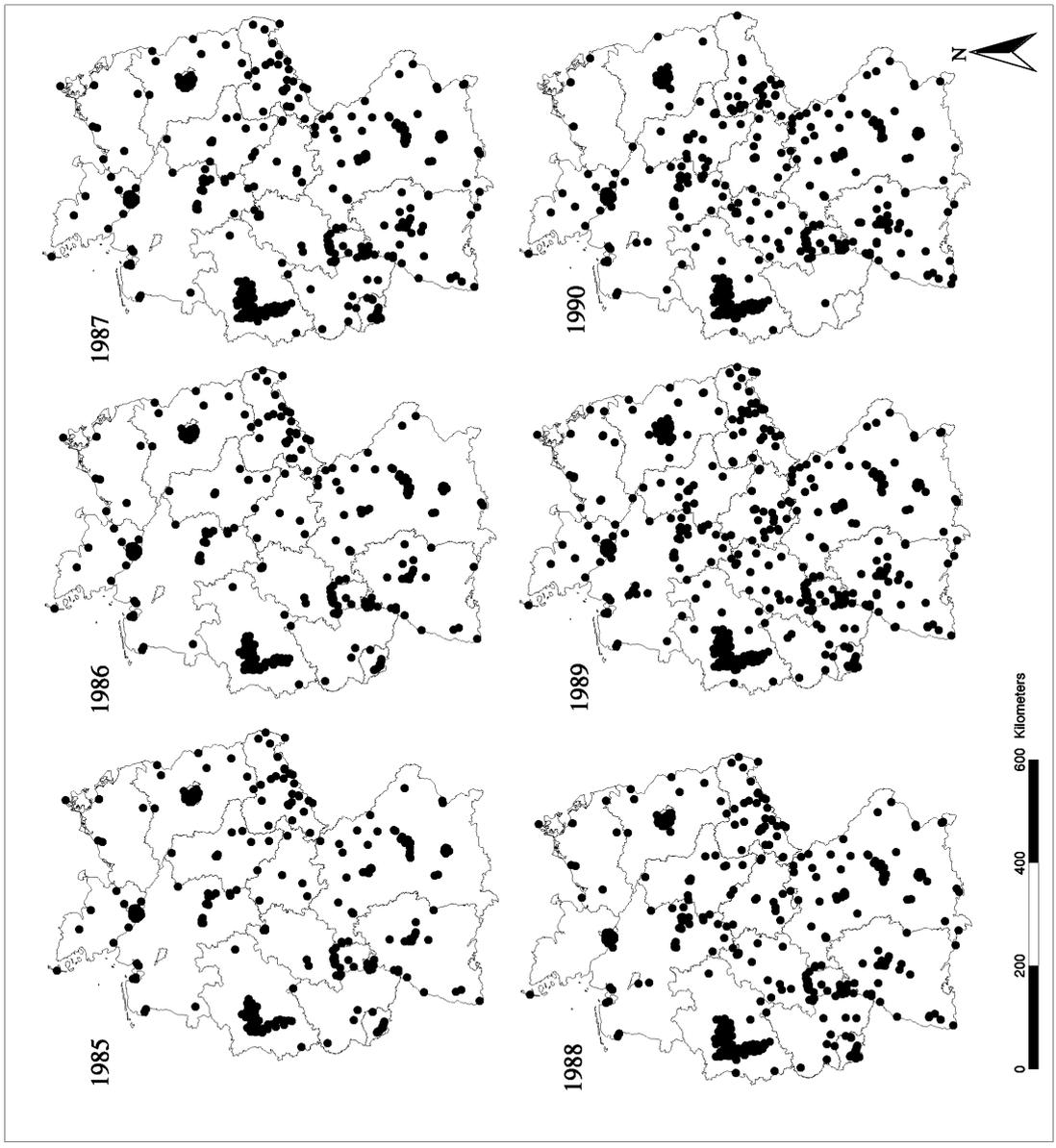
• Meßstation

Datenquellen:
Landesanstalten für Umweltschutz,
Umweltbundesamt,

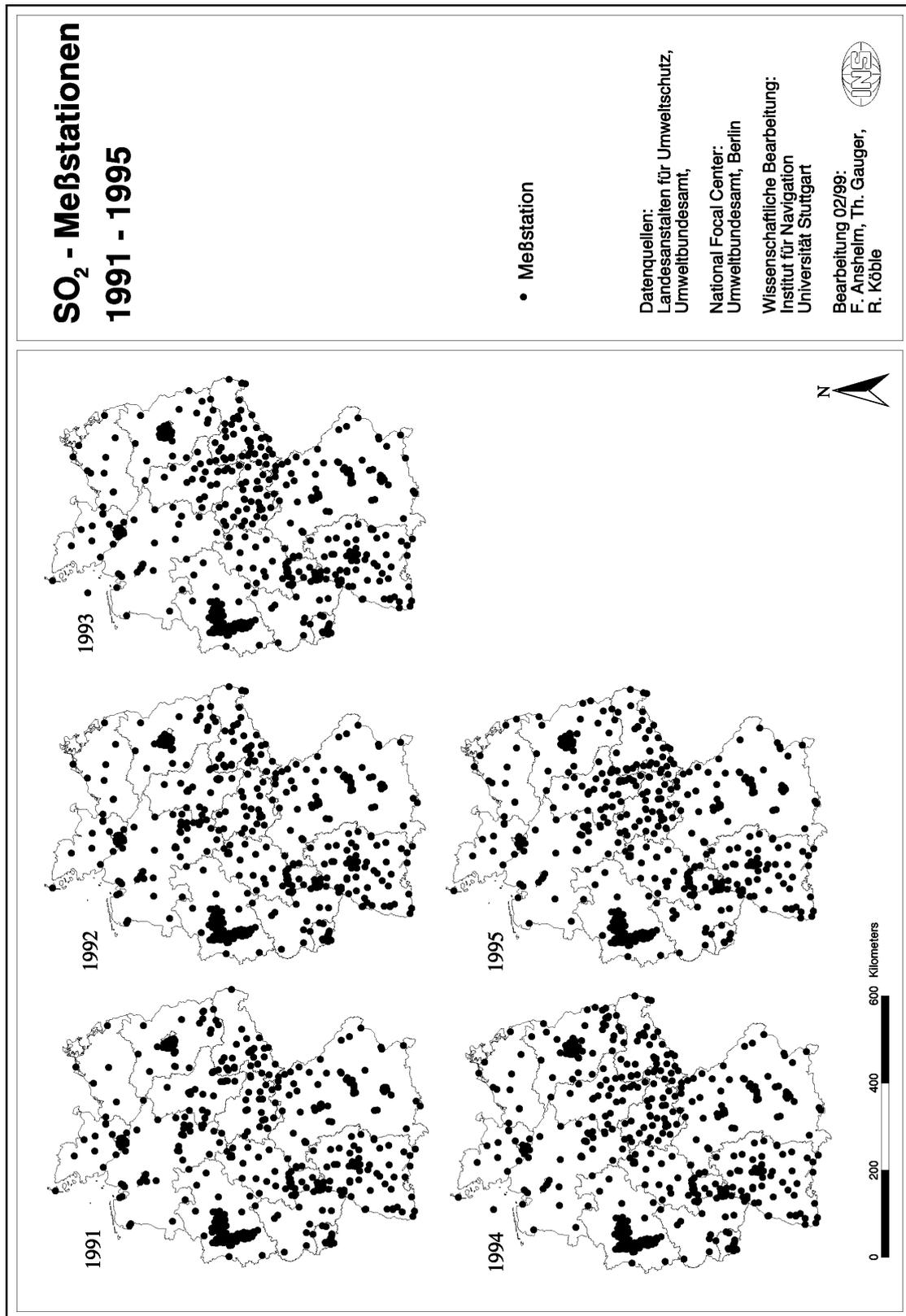
National Focal Center:
Umweltbundesamt, Berlin

Wissenschaftliche Bearbeitung:
Institut für Navigation
Universität Stuttgart

Bearbeitung 02/99:
F. Anshelm, Th. Gauger,
R. Köble



Karte 3: SO₂-Meßstationen 1985-1990



Karte 4: SO₂-Meßstationen 1991-1995

SO₂ - Immission 1985 - 1990

Immission
in $\mu\text{g}/\text{m}^3$

	9 - 10
	10 - 20
	20 - 30
	30 - 282

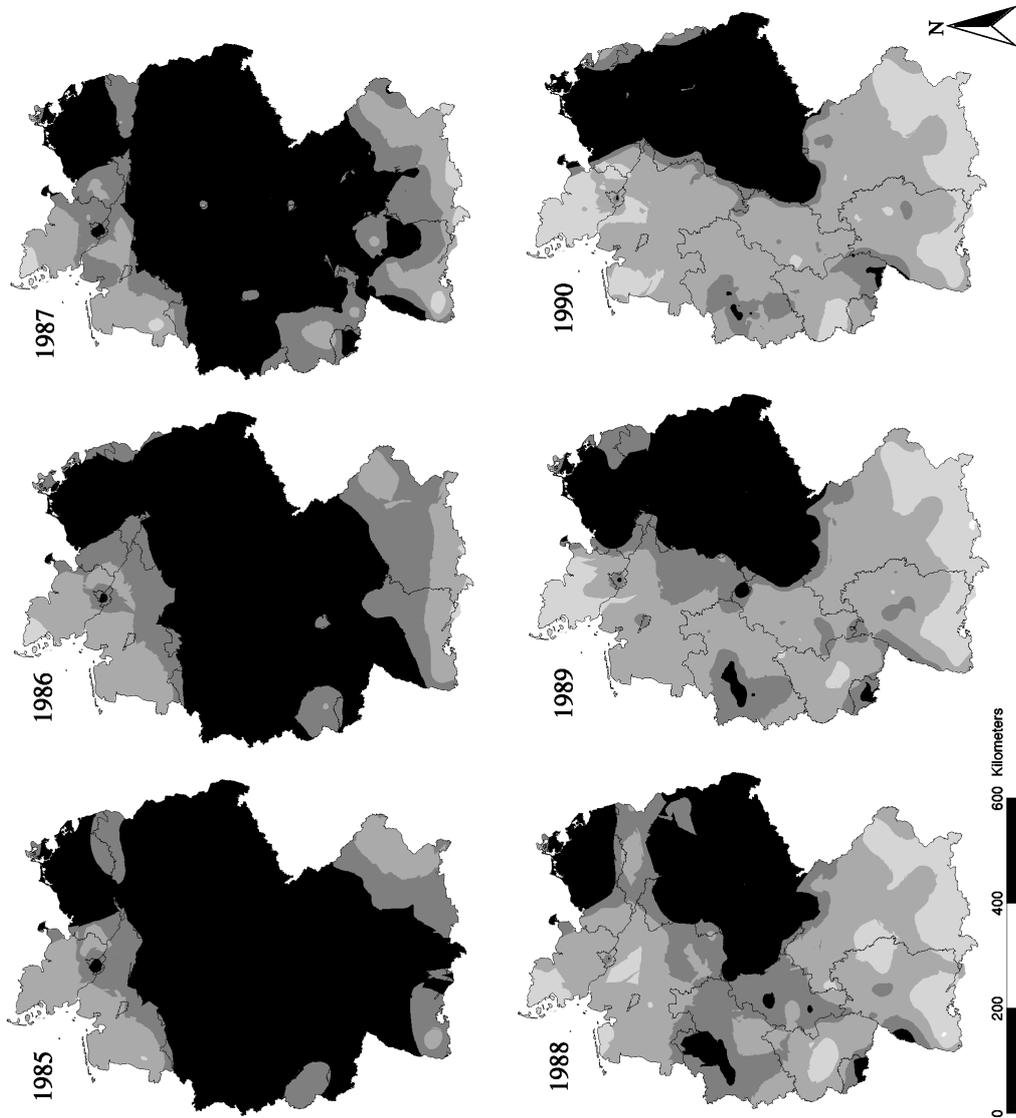
Datenquellen:
Landesanstalten für Umweltschutz,
Umweltbundesamt,

National Focal Center:
Umweltbundesamt, Berlin

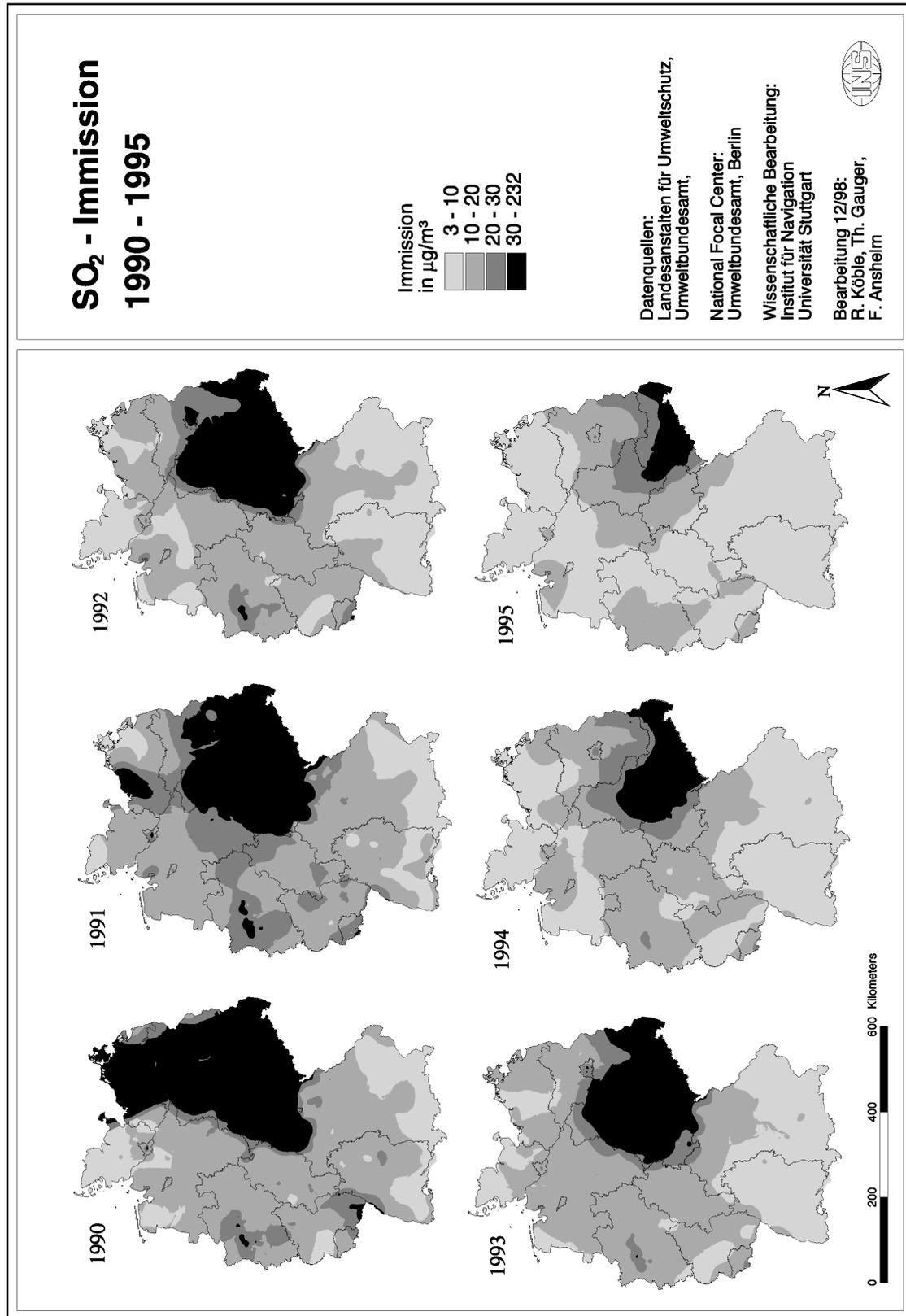
Wissenschaftliche Bearbeitung:
Institut für Navigation
Universität Stuttgart



Bearbeitung 12/88:
R. Köble, Th. Gauger,
F. Anshelm



Karte 5: SO₂-Immission 1985-1990



Karte 6: SO₂-Immission 1990-1995

Stickstoffdioxid Immissionsmeßstationen 1985 - 1990

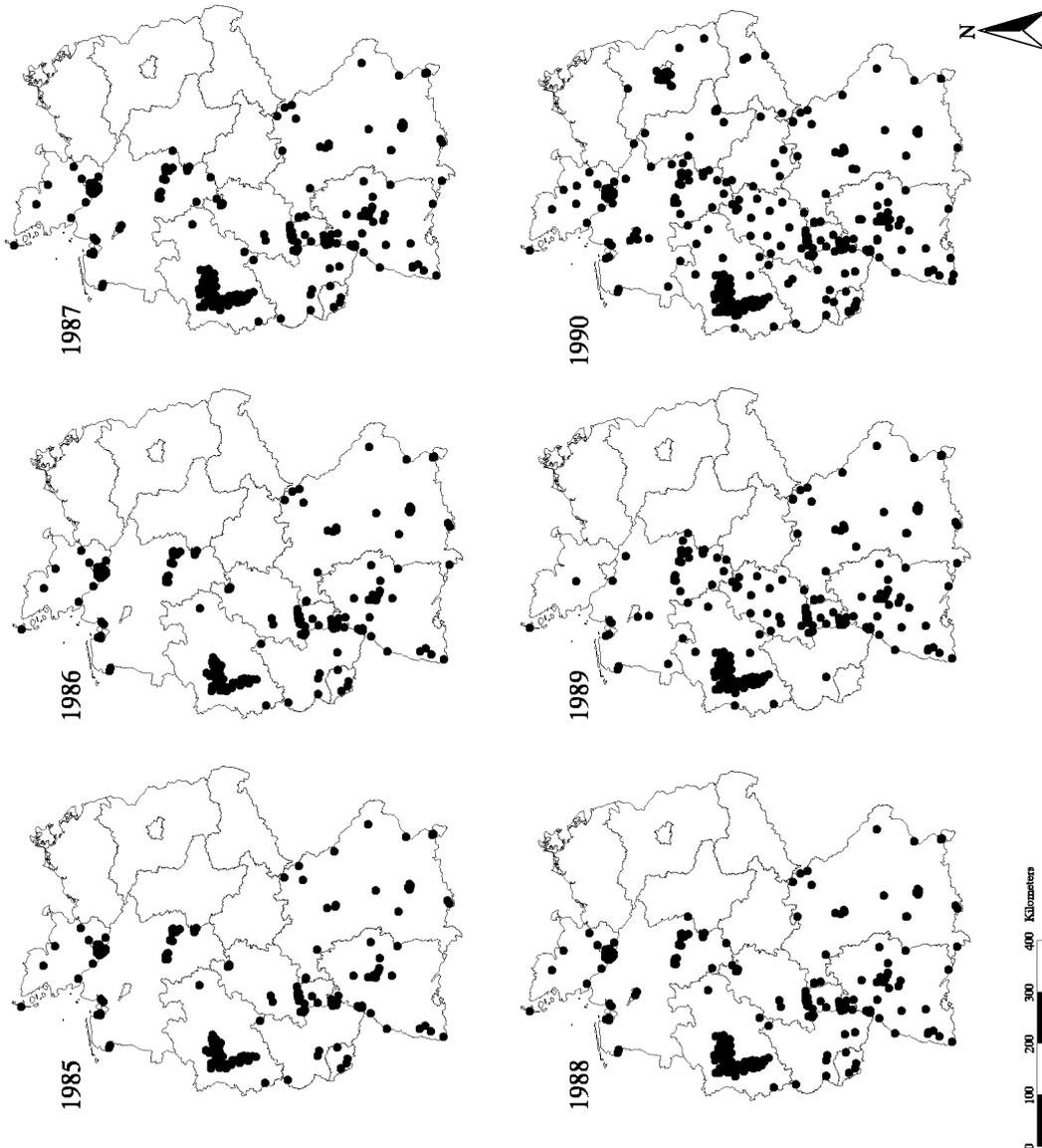
• Meßstation

Datenquelle:
Umweltbundesamt

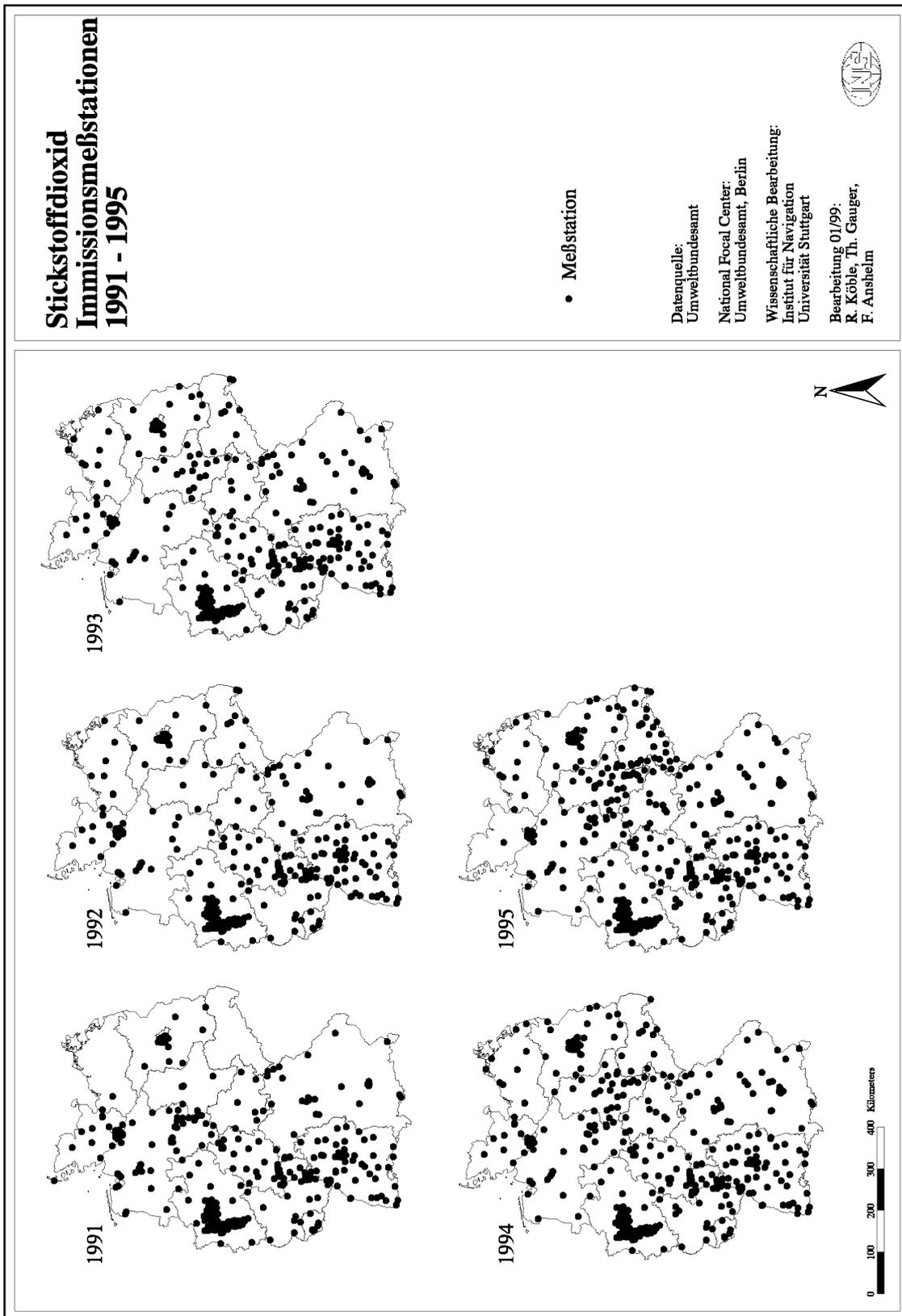
National Focal Center:
Umweltbundesamt, Berlin

Wissenschaftliche Bearbeitung:
Institut für Navigation
Universität Stuttgart

Bearbeitung 01/99:
R. Köhle, Th. Gauger,
F. Anshelm



Karte 7: NO₂-Meßstationen 1985-1990



Karte 8: NO₂-Meßstationen 1991-1995

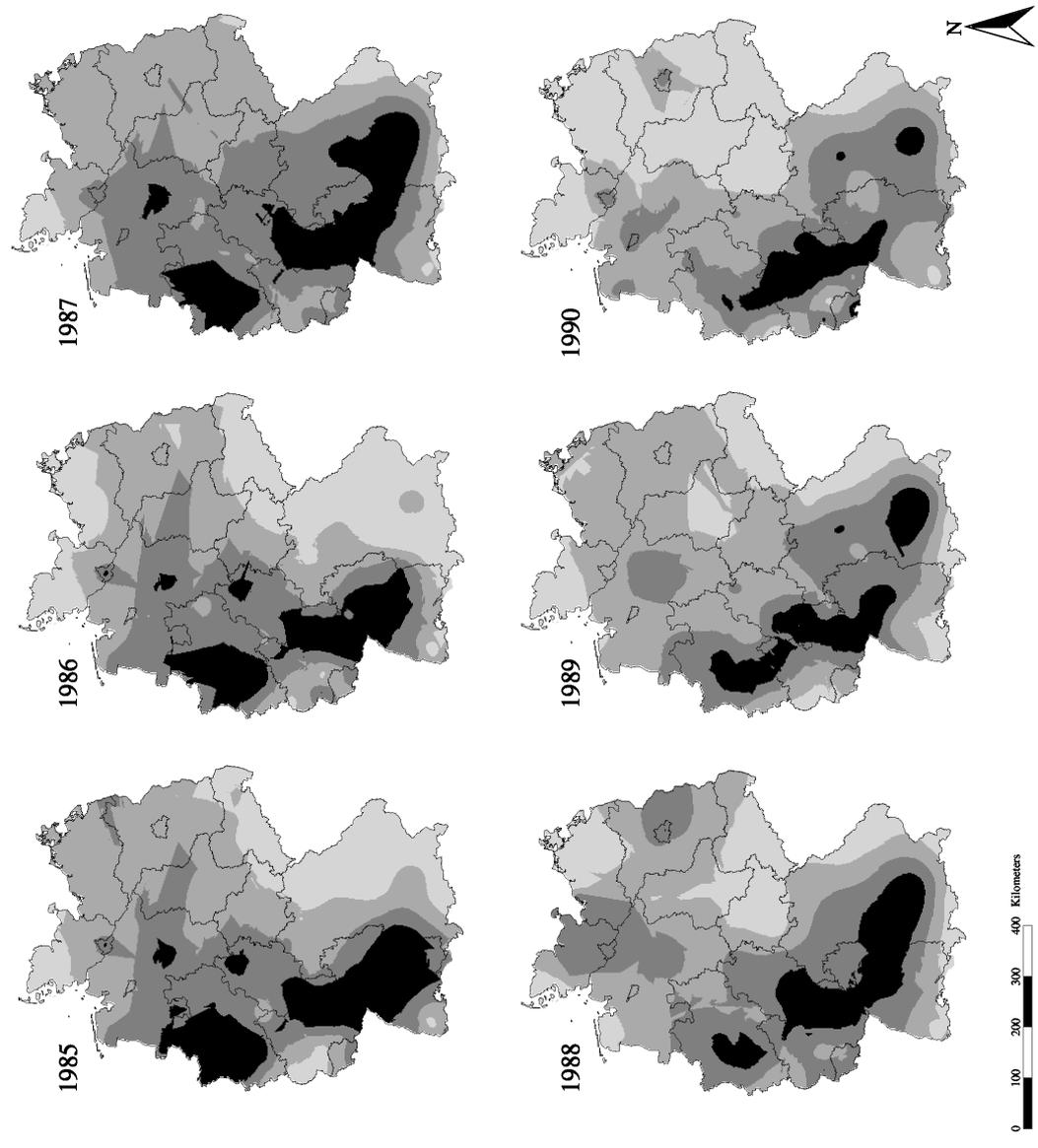
NO₂-Immission 1985 - 1990



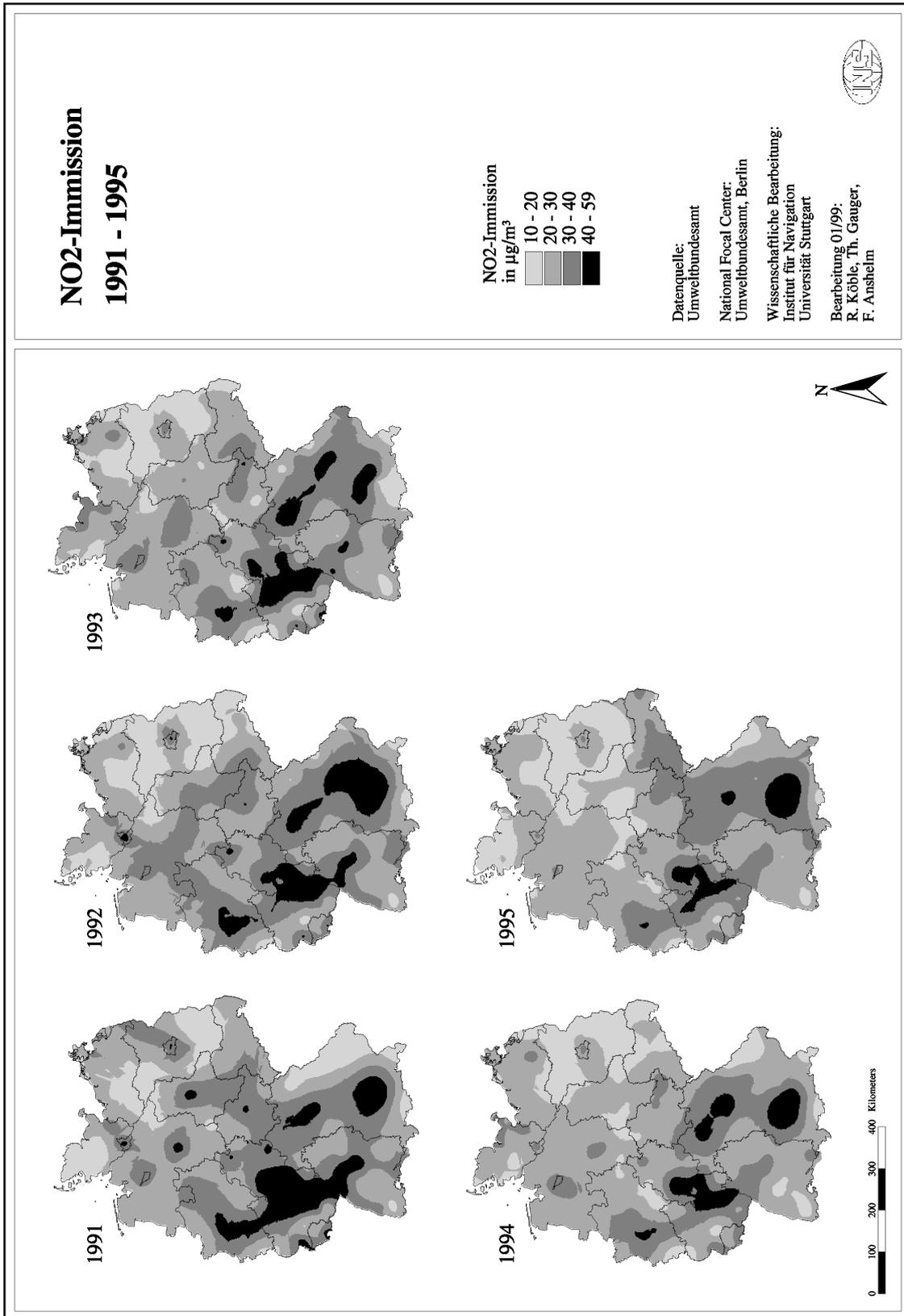
NO₂-Immission
in µg/m³

5 - 20
20 - 30
30 - 40
40 - 67

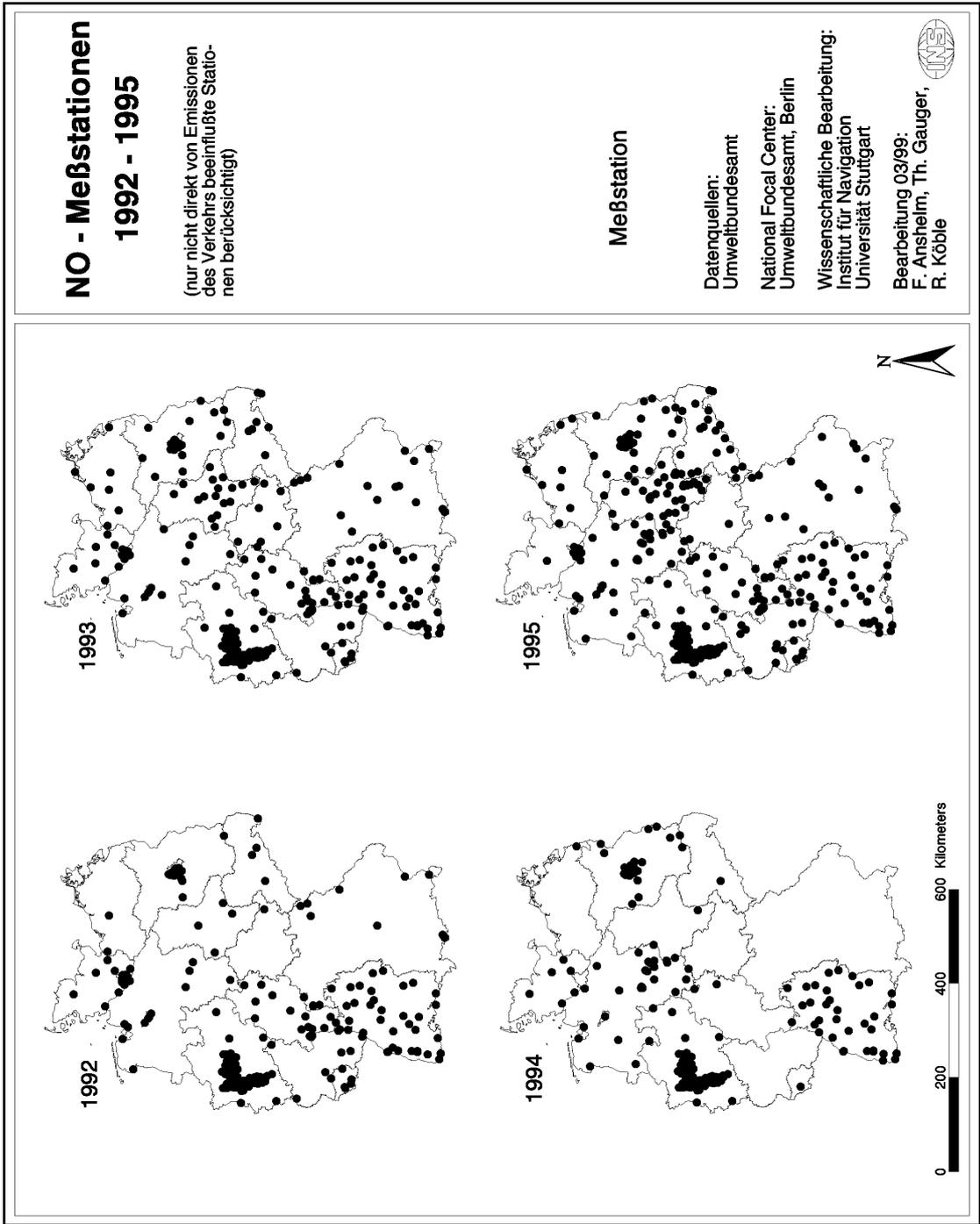
Datenquelle:
Umweltbundesamt
National Focal Center:
Umweltbundesamt, Berlin
Wissenschaftliche Bearbeitung:
Institut für Navigation
Universität Stuttgart
Bearbeitung 01/99:
R. Köble, Th. Gauger,
F. Anshelm



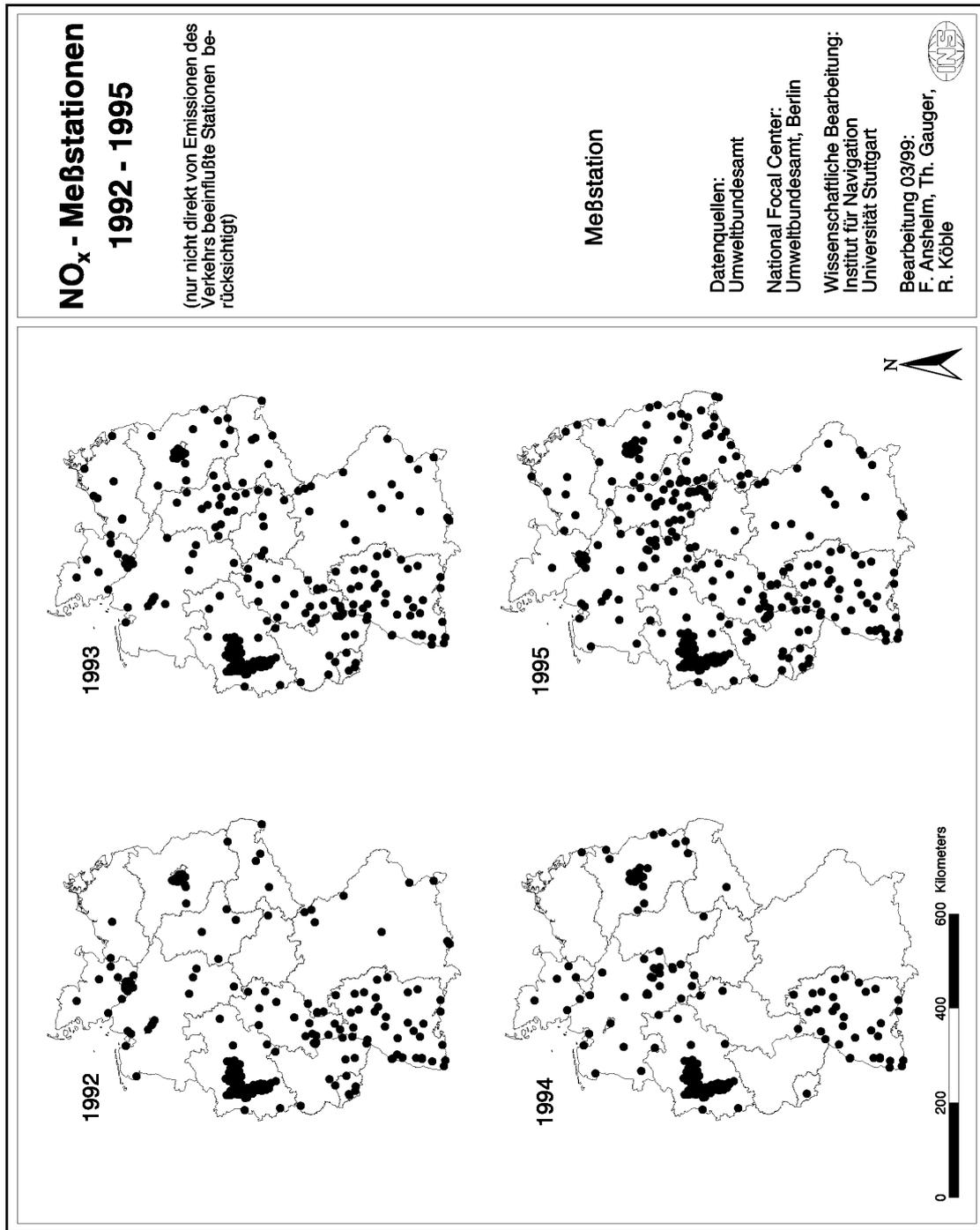
Karte 9: NO₂-Immission 1985-1990



Karte 10: NO₂-Immission 1991-1995



Karte 11: NO-Meßstationen 1992-1995



Karte 12: NO_x-Meßstationen 1992-1995

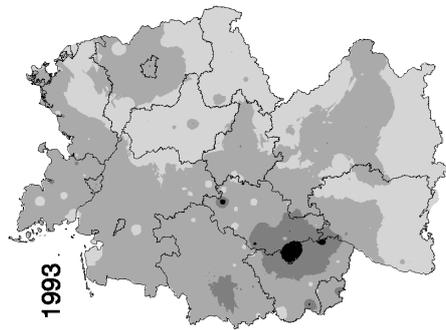
NO_x - Immission 1992 - 1995

(Interpolation auf der Basis nicht
direkt von Emissionen des Ver-
kehrs beeinflusster Stationen)

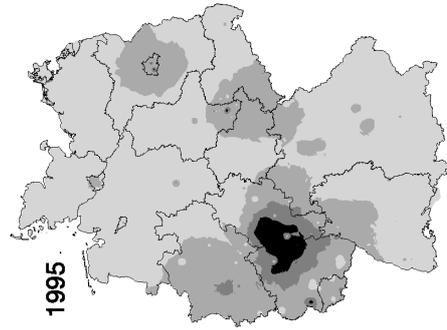
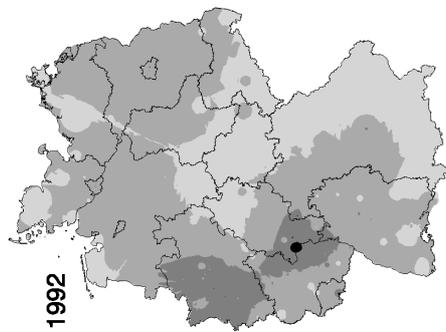
Immission
in µg/m³

7 - 50
50 - 75
75 - 100
100 - 330

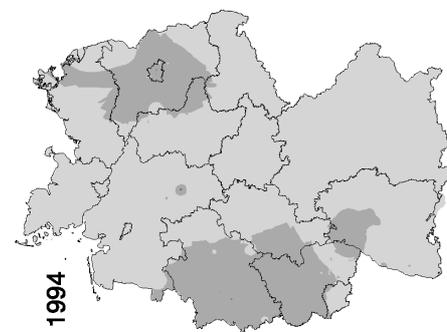
Datenquellen:
Umweltbundesamt
National Focal Center:
Umweltbundesamt, Berlin
Wissenschaftliche Bearbeitung:
Institut für Navigation
Universität Stuttgart
Bearbeitung 03/99:
F. Anshelm, Th. Gauger,
R. Köble



1992

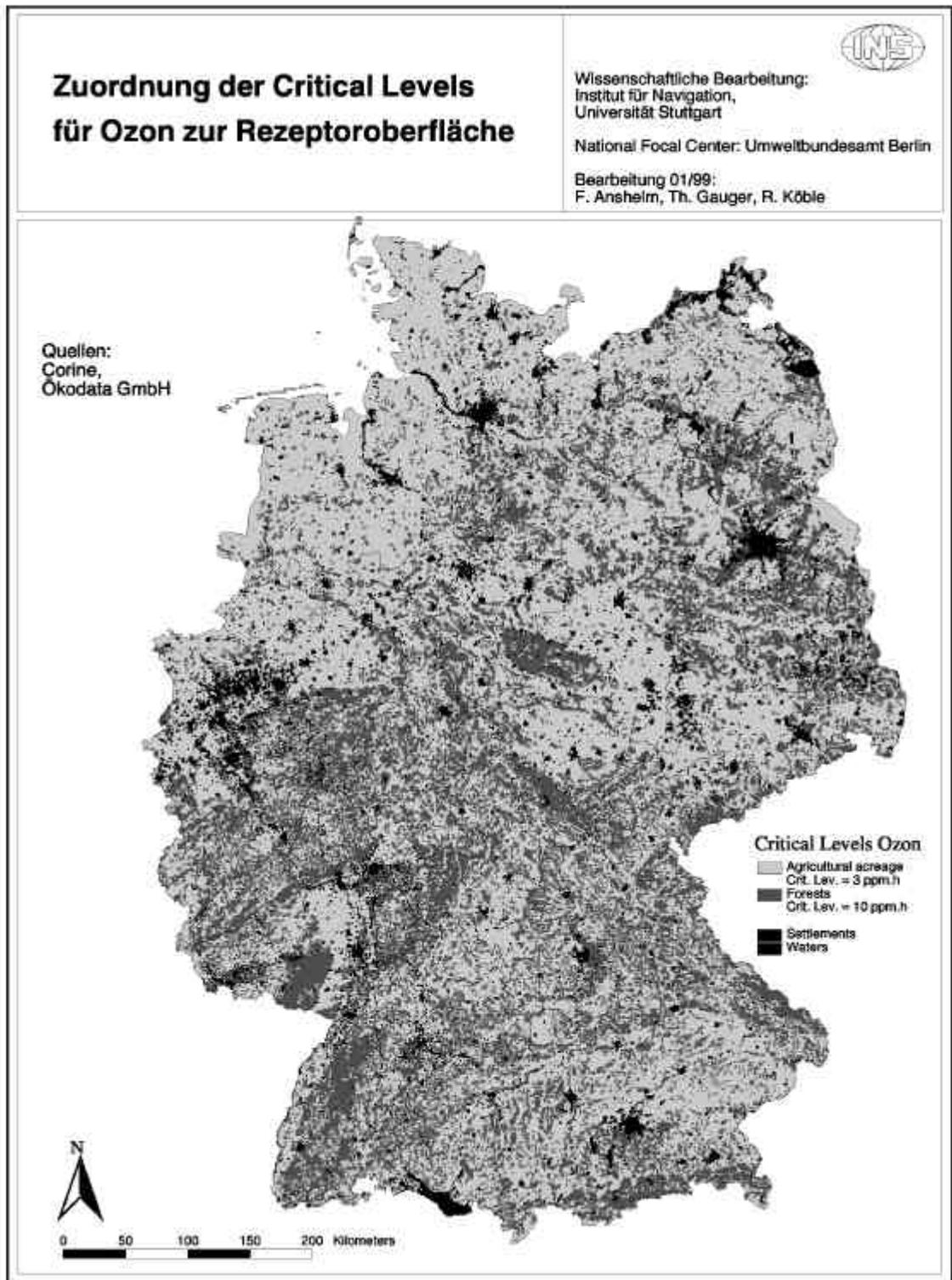


1994



0 200 400 600 Kilometers

Karte 13: NO_x-Immission 1992-1995



Karte 14: Zuordnung der Critical Levels für Ozon zur Rezeptoroberfläche

Ozon AOT40-Werte in Agrargebieten 1991 - 1995

Interpolation auf der Basis nicht direkt von Verkehrsemissionen beeinflusster Meßstationen

Critical Level:
AOT40 = 3000 ppb-h
Berechnungszeitraum:
Mai - Juli
6 - 18 Uhr

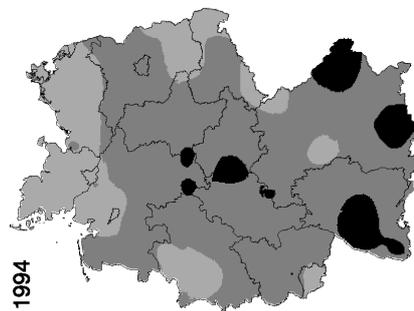
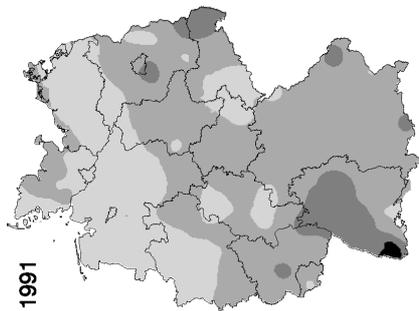
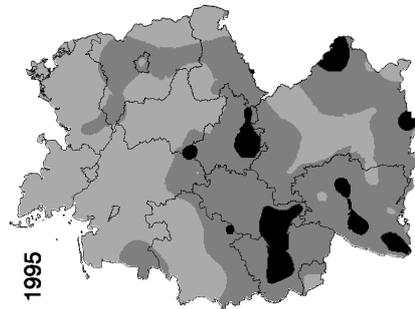
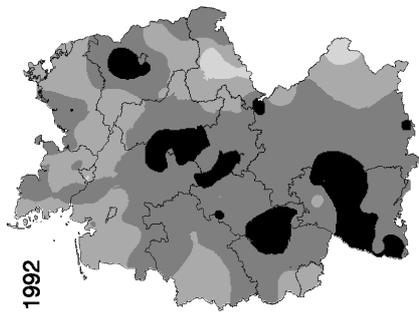
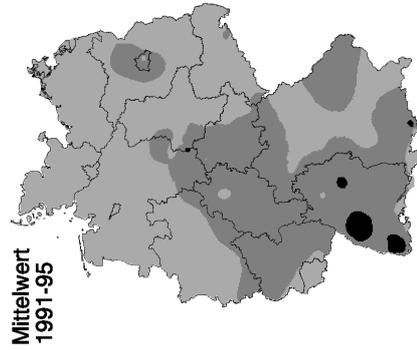
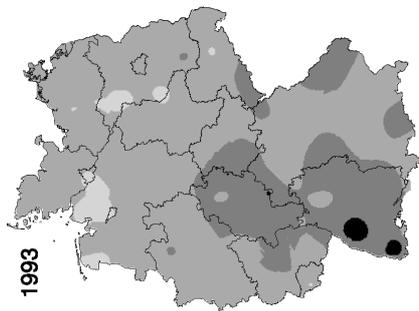


Datenquellen:
Landesanstalten für Umweltschutz,
Umweltbundesamt,

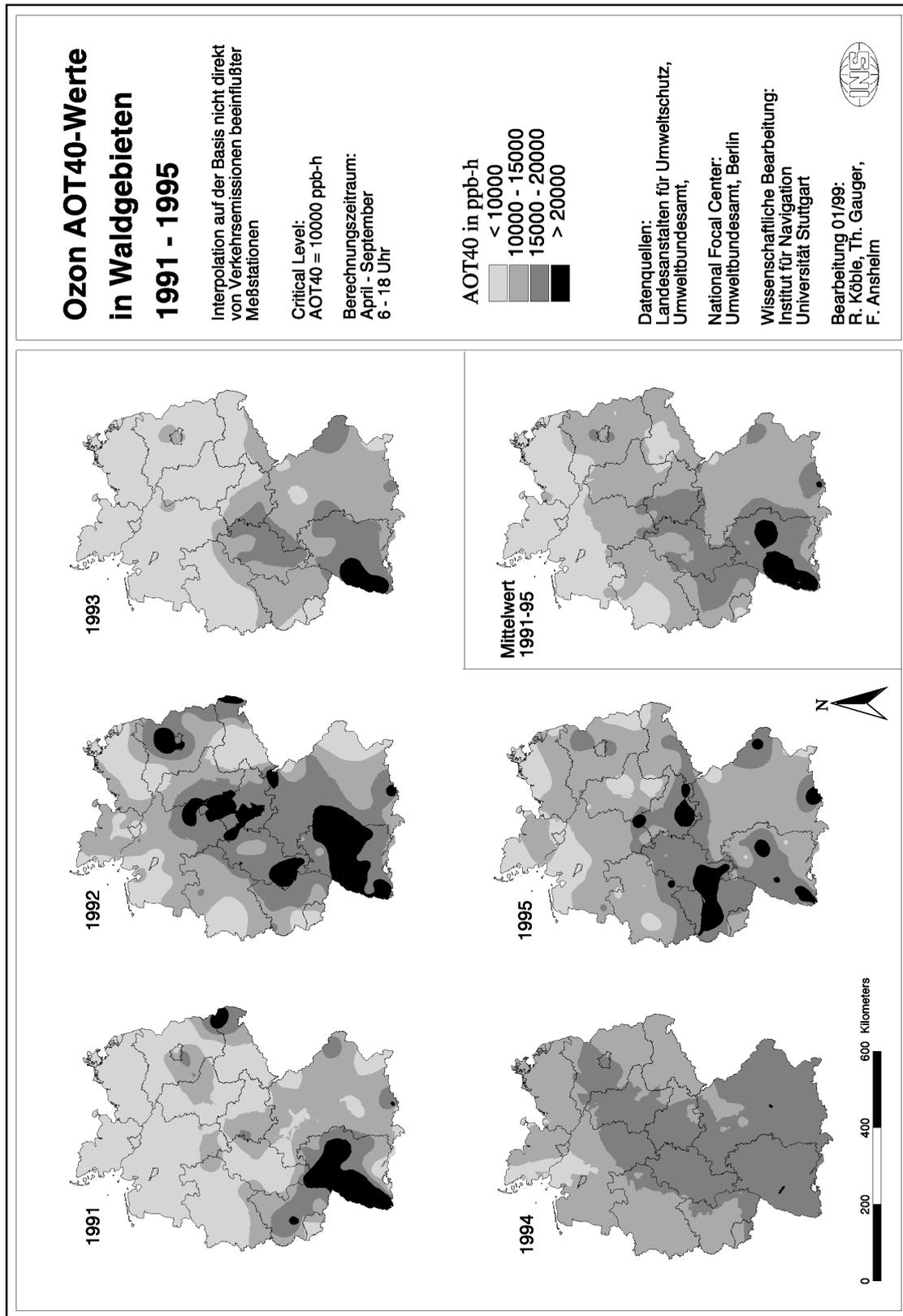
National Focal Center:
Umweltbundesamt, Berlin

Wissenschaftliche Bearbeitung:
Institut für Navigation
Universität Stuttgart

Bearbeitung 01/99:
R. Köble, Th. Gauger,
F. Anshelm



Karte 15: Ozon - AOT40-Werte in Agrargebieten 1991-1995



Karte 16: Ozon - AOT40-Werte in Waldgebieten 1991-1995

Ozon Überschreitung der Critical Levels 1991 - 1995

Interpolation auf Basis der Daten nicht direkt von Emissionen des Verkehrs beeinflusster Meßstationen

Critical Levels:

Forests
AOT40f = 10000 ppb-h
Crops
AOT40c = 3000 ppb-h

Überschreitung in %

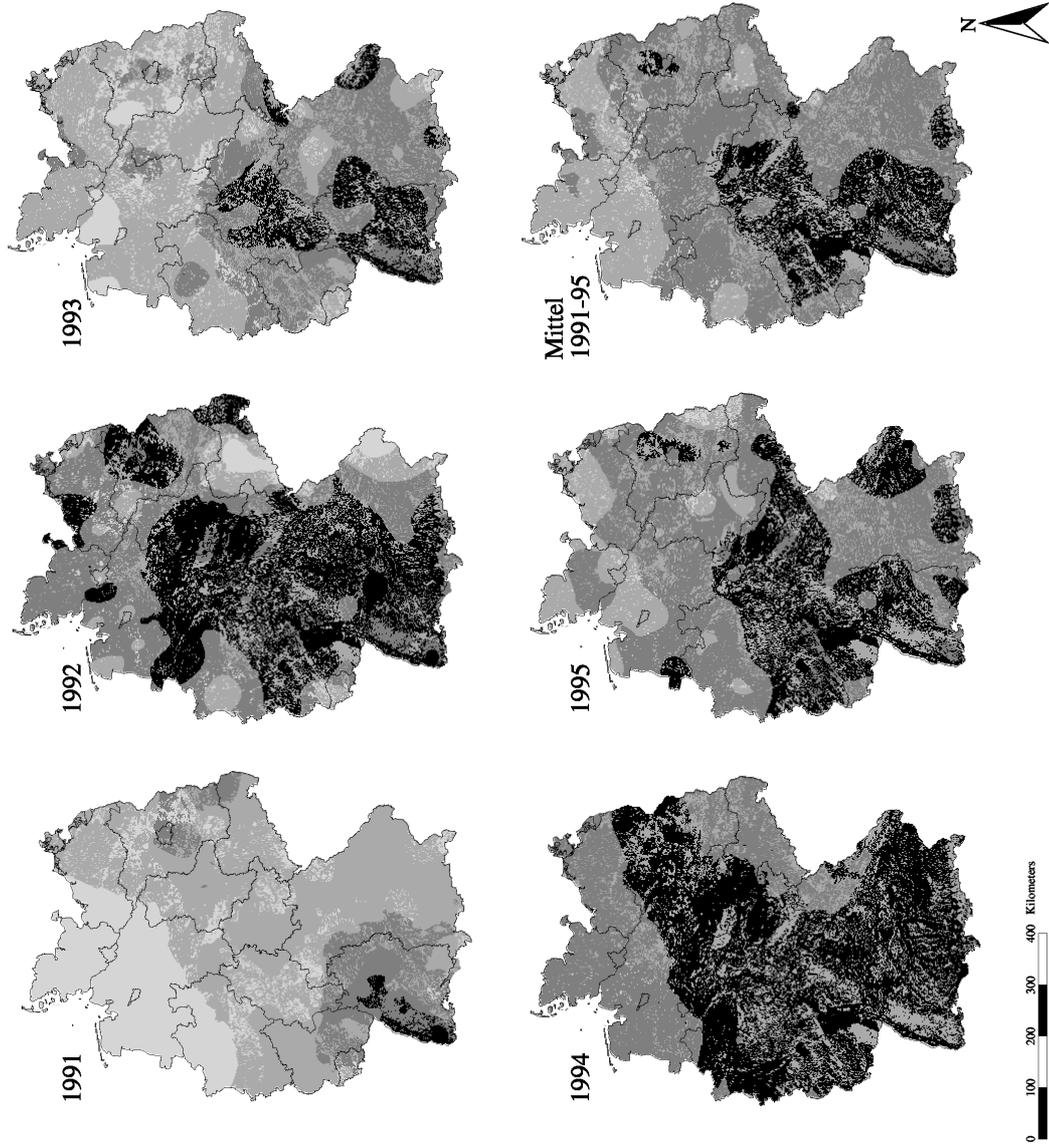


Datenquellen:
Landesanstalten für Umweltschutz
Umweltbundesamt

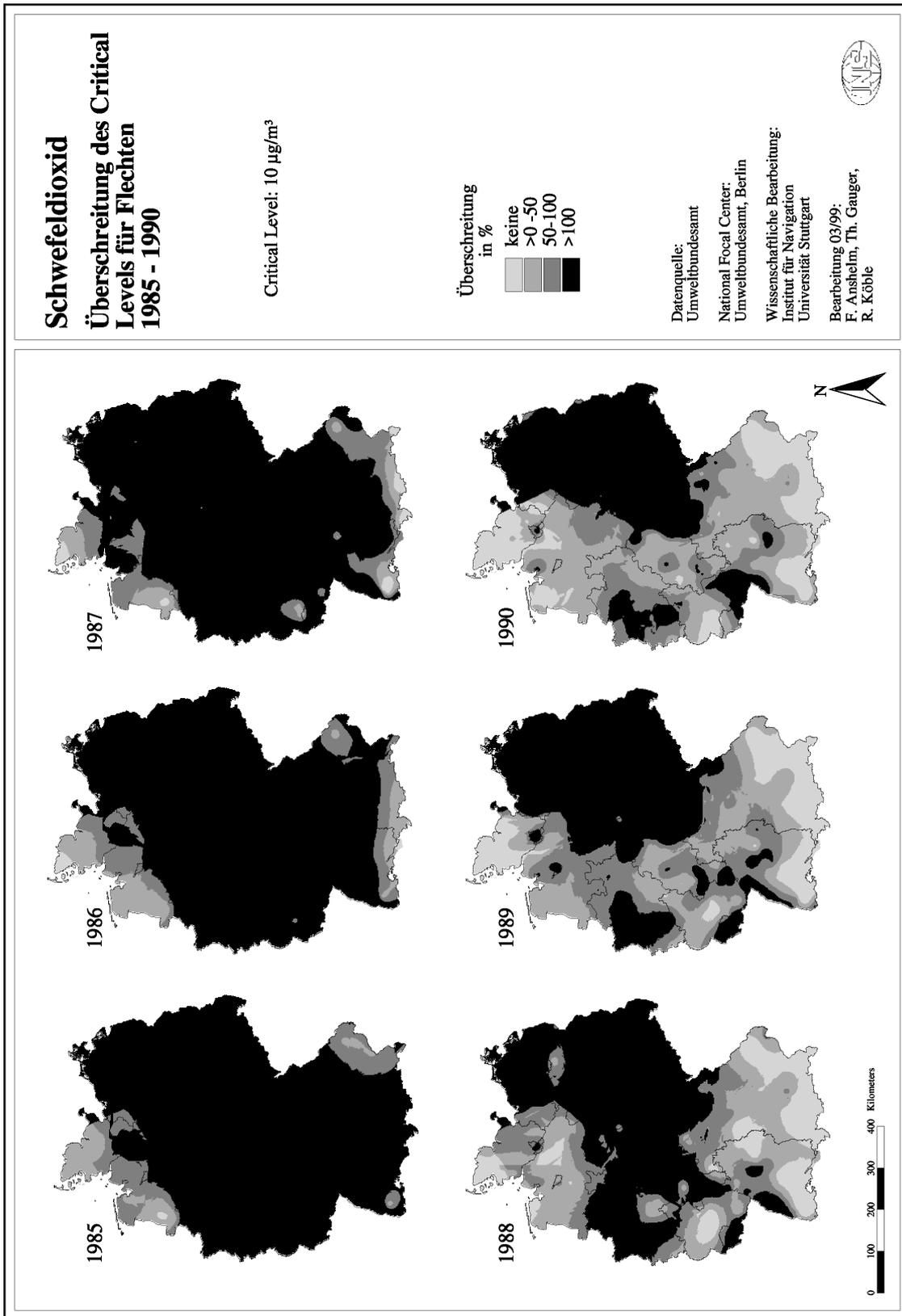
National Focal Center:
Umweltbundesamt, Berlin

Wissenschaftliche Bearbeitung:
Institut für Navigation
Universität Stuttgart

Bearbeitung 03/99:
F. Anshelm, Th. Gauger,
R. Köhler



Karte 17: Ozon - Überschreitung der Critical Levels 1991-1995



Karte 18: SO₂ – Überschreitung des Critical Levels für Flechten 1985-1990

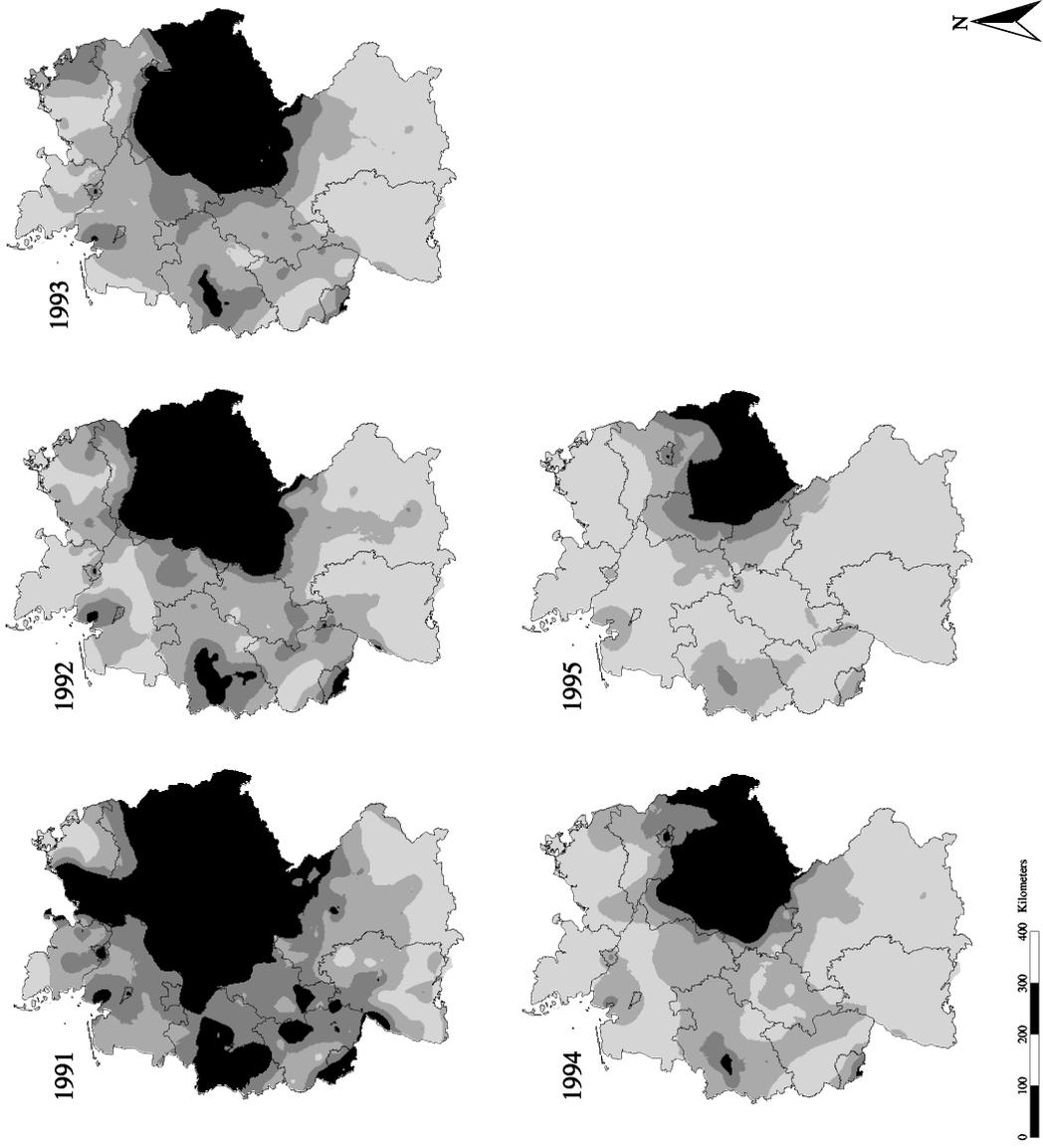
Schwefeldioxid Überschreitung des Critical Levels für Flechten 1991 - 1995

Critical Level: 10 µg/m³

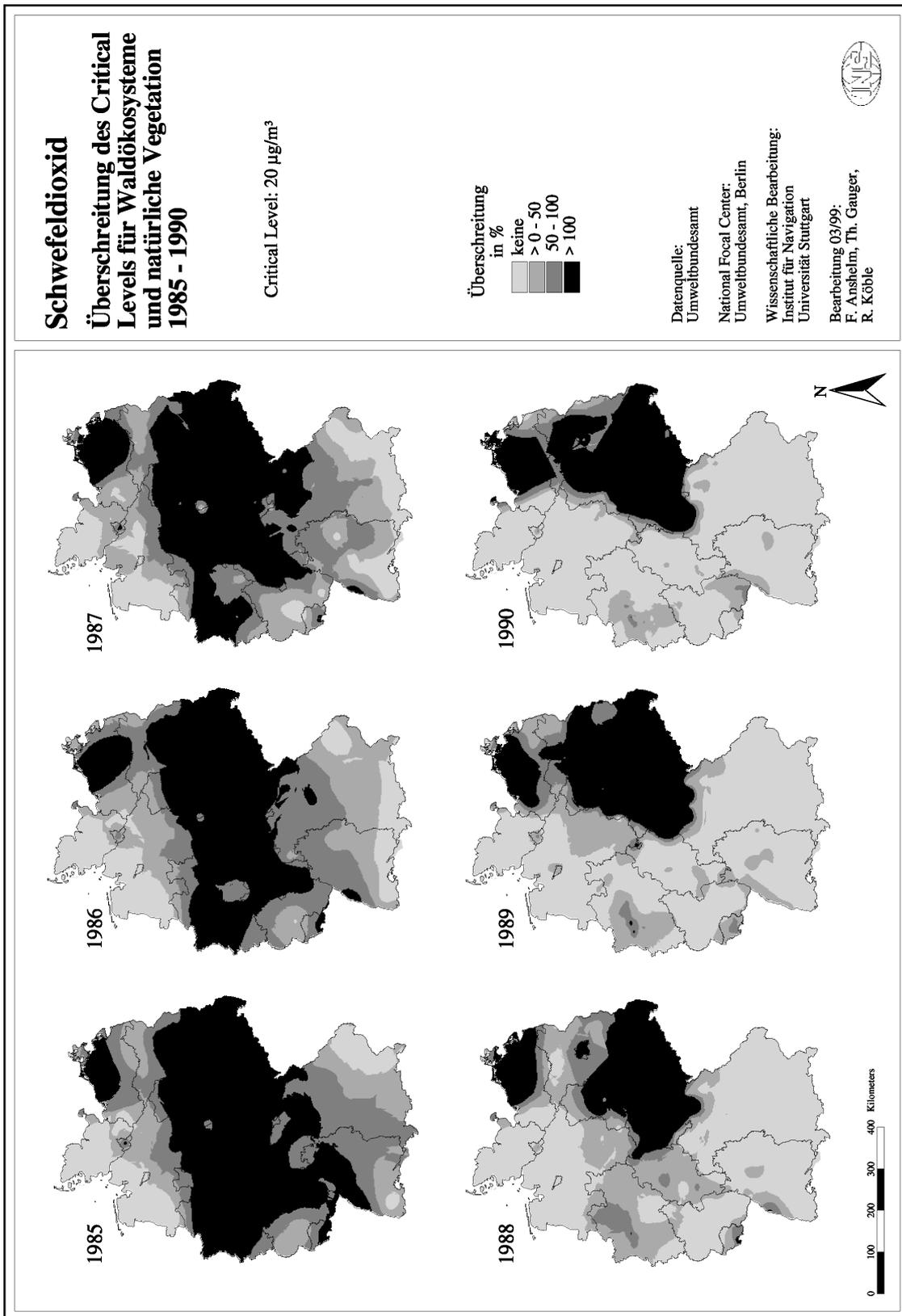
Überschreitung
in %

keine
>0 -50
50-100
>100

Datenquelle:
Umweltbundesamt
National Focal Center:
Umweltbundesamt, Berlin
Wissenschaftliche Bearbeitung:
Institut für Navigation
Universität Stuttgart
Bearbeitung 03/99:
F. Anshelm, Th. Gauger,
R. Köble



Karte 19: SO₂ - Überschreitung des Critical Levels für Flechten 1991-1995



Karte 20: SO₂ - Überschreitung des Critical Levels für Waldökosysteme und natürliche Vegetation 1985-1990

Schwefeldioxid

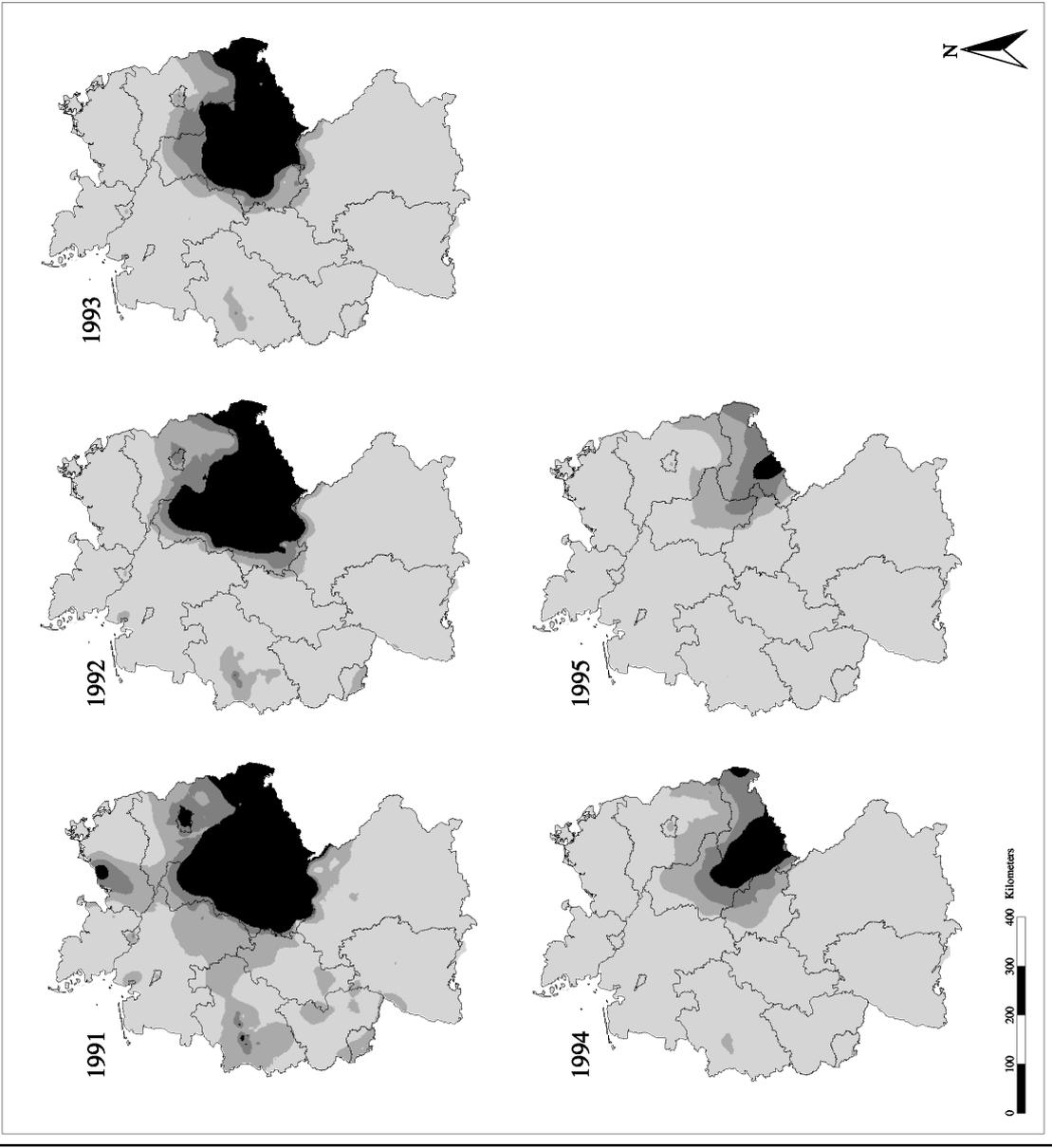
Überschreitung des Critical Levels für Waldökosysteme und natürliche Vegetation 1991 - 1995

Critical Level: 20 µg/m³

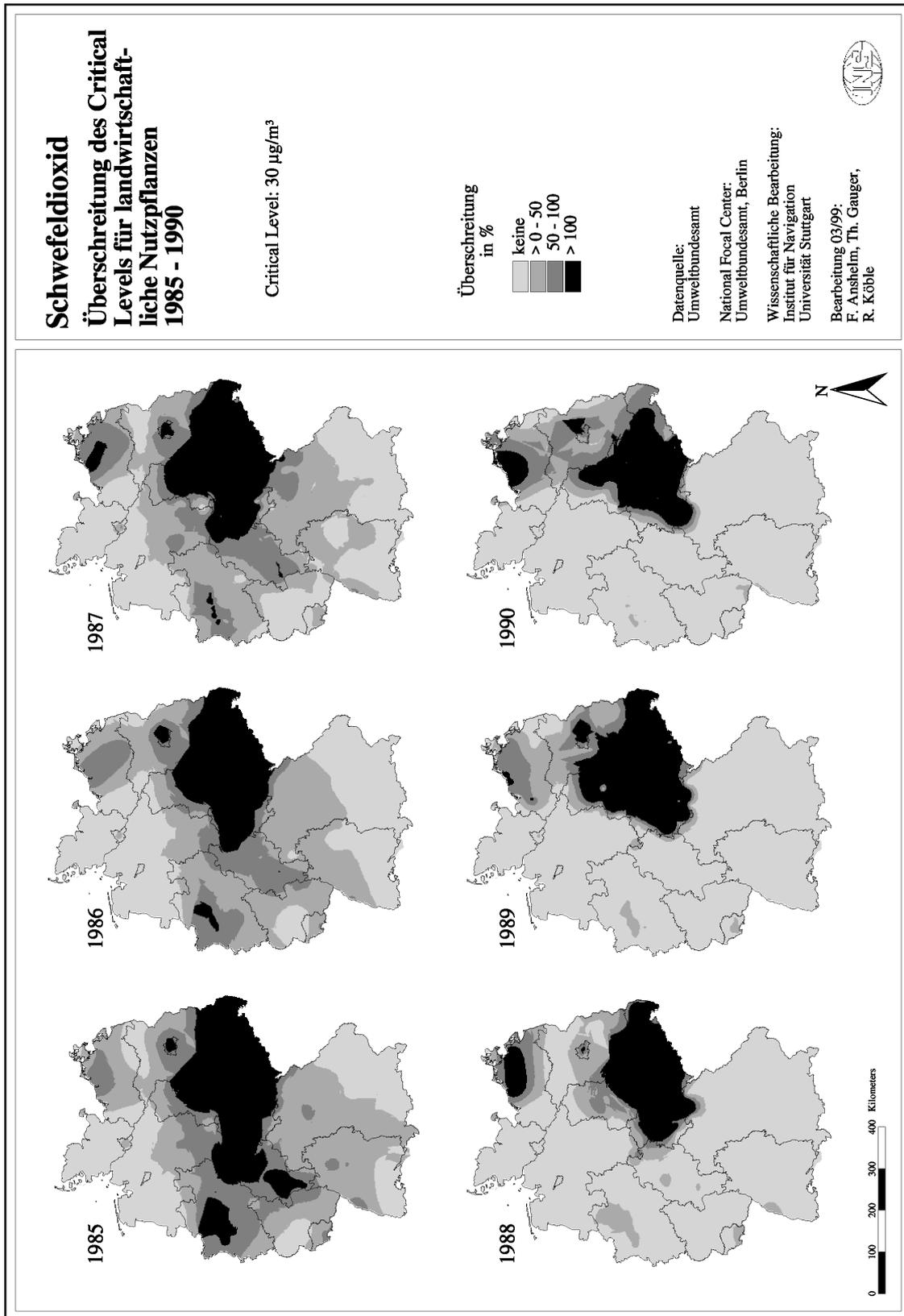
Überschreitung
in %

keine
> 0 - 50
50 - 100
> 100

Datenquelle:
Umweltbundesamt
National Focal Center:
Umweltbundesamt, Berlin
Wissenschaftliche Bearbeitung:
Institut für Navigation
Universität Stuttgart
Bearbeitung 03/99:
F. Anshelm, Th. Gauger,
R. Köble



Karte 21: SO₂ - Überschreitung des Critical Levels für Waldökosysteme und natürliche Vegetation 1991-1995



Karte 22: SO₂ - Überschreitung des Critical Levels für landwirtschaftliche Nutzpflanzen 1985-1990

Schwefeldioxid

Überschreitung des Critical Levels für landwirtschaftliche Nutzpflanzen 1991 - 1995

Critical Level: 30 µg/m³

Überschreitung in %

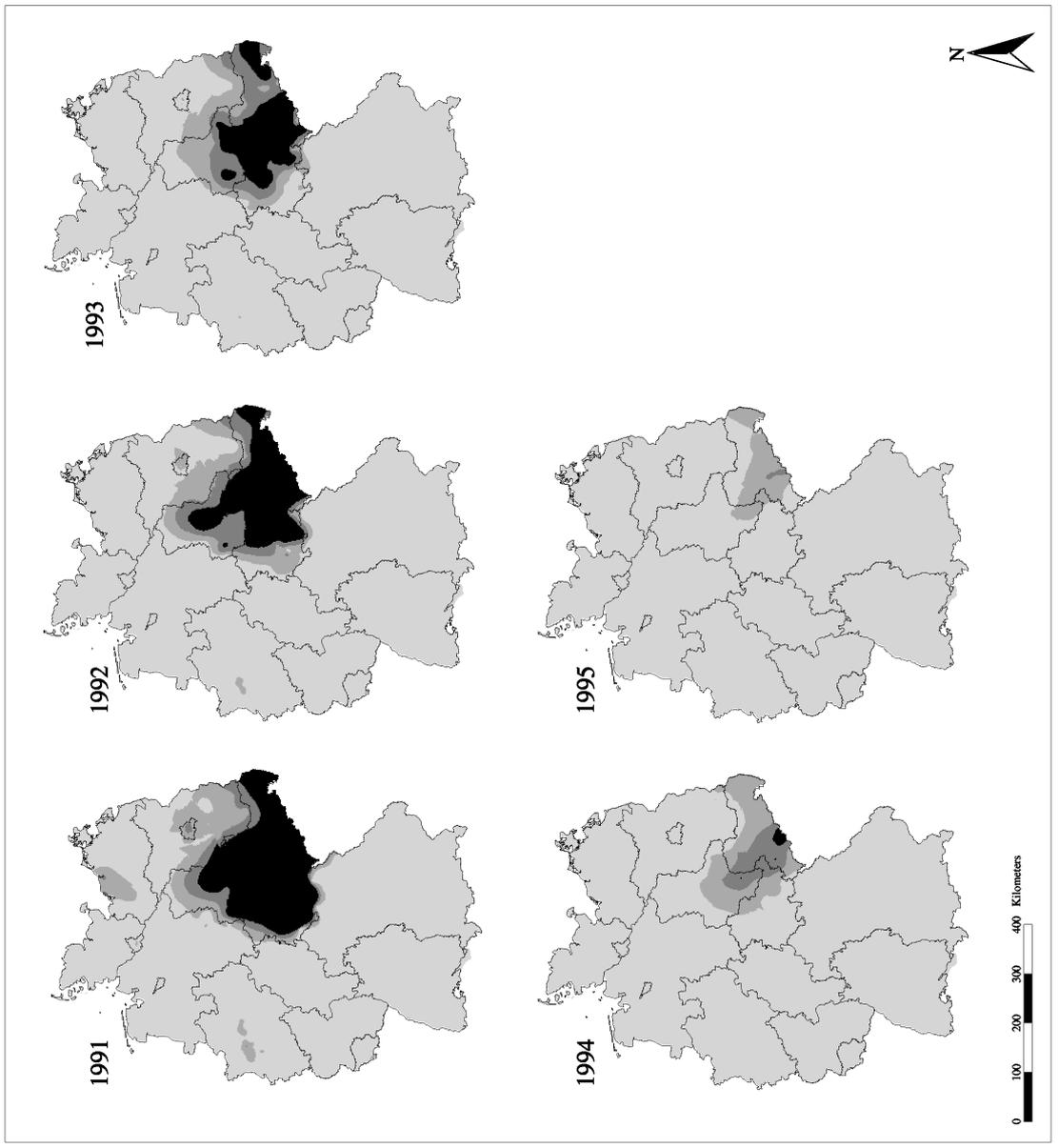


Datenquelle:
Umweltbundesamt

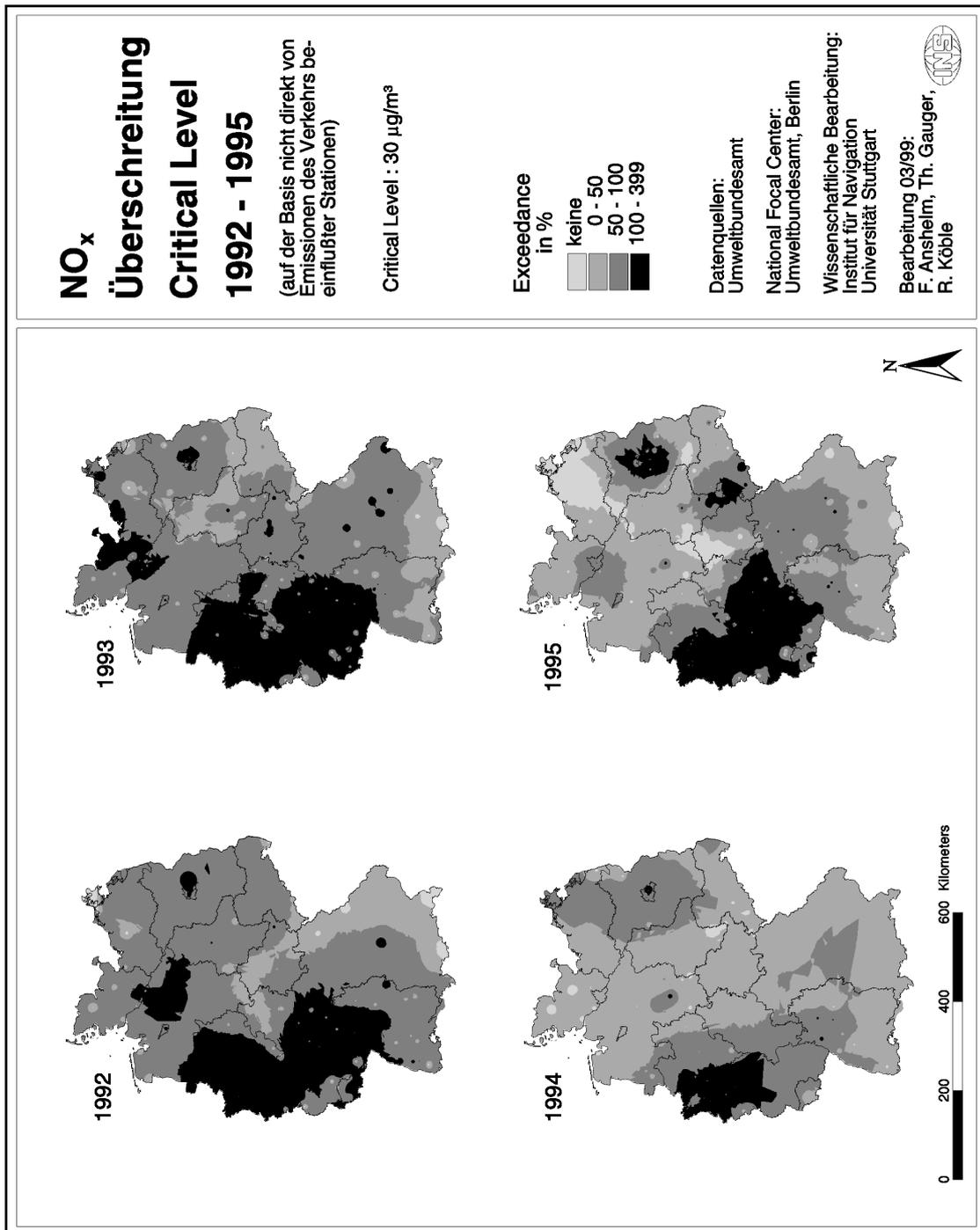
National Focal Center:
Umweltbundesamt, Berlin

Wissenschaftliche Bearbeitung:
Institut für Navigation
Universität Stuttgart

Bearbeitung 03/99:
F. Anshelm, Th. Gauger,
R. Köble



Karte 23: SO₂ - Überschreitung des Critical Levels für landwirtschaftliche Nutzpflanzen 1991-1995



Karte 24: NO_x - Überschreitung des Critical Levels 1992-1995

Anschriften der Bearbeiter

Dipl.-Geograph Thomas Gauger
Universität Stuttgart
Institut für Navigation
Geschwister-Scholl-Straße 24 D
70174 Stuttgart
Tel.: ++49-0711-121-4177
FAX: ++49-0711-121-2755
gauger@nav.-uni-stuttgart.de

Dipl.-Geograph Frank Anshelm
Universität Stuttgart
Institut für Navigation
Geschwister-Scholl-Straße 24 D
70174 Stuttgart
Tel.: ++49-0711-121-3412
FAX: ++49-0711-121-2755
anshelm@nav.-uni-stuttgart.de

Dipl.-Geographin Renate Köble
EC-Joint Research Centre
Environment Institute TP 051
Atmospheric Processes in Global Change -
Biosphere Interactions
I-21020 Ispra (Va) Italy
Tel: ++39-0332-78-5870
Fax: ++39-0332-78-5022
renate.koeble@jrc.it

Institut für Navigation
Universität Stuttgart
Geschwister-Scholl-Straße 24 D
70174 Stuttgart
Tel.: ++49-0711-121-3401
FAX: ++49-0711-121-2755
<http://www.nav.uni-stuttgart.de>