

Einbeziehung von Messungen in berechnete Konzentrationsfelder mit Hilfe statistischer Interpolationsmethoden

Im Auftrage der

Freie Universität Berlin
Institut für Meteorologie
Carl-Heinrich-Becker-Weg 6-10
12165 Berlin

im Rahmen des

Forschungs- und Entwicklungsvorhaben 299 43 246 des
Umweltbundesamts auf dem Gebiet des Umweltschutzes
„Entwicklung eines Modellsystems für das Zusammenspiel von Messung
und Modellrechnungen für die bundeseinheitliche Umsetzung der EU-
Rahmenrichtlinie und ihrer Tochterrichtlinien“

von

IVU Umwelt GmbH
Dipl. Phys. Volker Diegmann
Burgweg 10
D-79350 Sexau
Telefon: (07641) 53046

Februar 2001

Inhalt

EINBEZIEHUNG VON MESSUNGEN IN BERECHNETE KONZENTRATIONSFELDER MIT HILFE STATISTISCHER INTERPOLATIONSMETHODEN	1
1 AUFGABENSTELLUNG	2
2 KURZBESCHREIBUNG VON FLADIS UND GEGENSTAND DER UNTERSUCHUNG	3
2.1 Interpolationsverfahren	3
2.1.1 Shepard-Verfahren	4
2.1.2 Hardy's Multiquadriken (Radiale Basisfunktions-Methoden)	6
2.1.3 Interpolation nach Triangulierung	7
2.2 Kombination aus Modell und Interpolation	8
3 INTEGRATION DER ERGEBNISSTRUKTUR DER REM3-FELDER IN FLADIS	10
4 ERGEBNISSE	12
4.1 Vergleich von verschiedenen Interpolationsverfahren	12
4.2 Vergleich von verschiedenen ausgewählten Stationen	12
4.3 Berücksichtigung der REM3- Daten	16
4.4 Weitere Beispiele	21
4.5 Vergleich für NO₂ Jahresmittelwerte 1997	25
5 ZUSAMMENFASSUNG	30
6 LITERATUR	31
7 ANHANG	32

1 Aufgabenstellung

An der Freien Universität Berlin ist ein Modellsystem zur Simulation der Ausbreitung, Umwandlung und Ablagerung primärer und sekundärer Luftverunreinigungen in der großräumigen, urbanen und kleinräumigen Raumskala entwickelt worden. Das FU-Rechensystem erfüllt alle in den neuen EU-Richtlinien zur Luftqualität an die Ausbreitungsrechnung gestellten Anforderungen für die europaweite, die nationale und die urbane Raumskala . Primär betrachtet werden die Schadstoffe Schwefeldioxid, Stickoxide, Ozon und PM10. Das System ist in der Lage, alle in den EU-Richtlinien definierten Beurteilungsgrößen dieser Schadstoffe zu berechnen. Dieses Rechensystem ist durch statistische Verfahren ergänzt worden, die es erlauben, Messungen und Modellrechnungen in einem gemeinsamen Ergebnisfeld zu integrieren.

Das von IVU entwickelte Programmpaket FLADIS (IVU, 1996) erstellt, ausgehend von Messungen der Luftschadstoffkonzentrationen, stündliche Felder der Schadstoffverteilung und berechnet daraus alle in den gegenwärtig existierenden Tochterrichtlinien definierten Beurteilungsgrößen. Die in diesem Bericht vorgestellten Arbeiten beinhalten die Verbindung von Messungen und Rechnungen auf der Basis der in FLADIS integrierten Methoden. Dazu sind die von dem großräumigen Modell REM3/CALGRID gelieferten Konzentrationsfelder in FLADIS eingebunden worden. Es wurde geprüft, ob das zu entwickelnde Verknüpfungsverfahren für verschiedene Raumskalen eingesetzt werden kann.

Es sind die Ergebnisse der Ausbreitungsrechnungen in FLADIS weiterverarbeitet worden, d.h. die Einarbeitung der berechneten Konzentrationsfelder in die aus den Messungen gebildeten Felder erfolgt in einem den Rechenläufen nachgeschalteten Bearbeitungsschritt.

2 Kurzbeschreibung von FLADIS und Gegenstand der Untersuchung

FLADIS ist ein Programm, das ausgehend von Messungen Luftschadstoffkonzentrationen in ihrer räumlichen und zeitlichen Verteilung berechnet. Das Programmsystem wird derzeit schon von mehreren Bundesländern zur flächenhaften Darstellung ihrer Messungen verwendet. Grundlage von FLADIS ist ein Interpolationsverfahren zur Ermittlung des Konzentrationsverlaufs zwischen Mess-Stellen. Das System bietet verschiedene Interpolationsmethoden an, die unter Berücksichtigung der Immissionssituation und anderer Kriterien ausgewählt werden können. Ein höhenabhängiges Regressionsmodell erlaubt die Einbeziehung der unterschiedlichen Höhenlagen der Mess-Stellen in die Interpolation.

In einem zweiten Schritt können die auf einem Gitter vorliegenden Ergebnisse von Modellrechnungen in die Interpolation integriert werden. Dazu wird zuerst geprüft, wie gut die Modellrechnungen die Immissionsmessung erklären. Ist das Erklärungsmaß (z.B. das Quadrat des Pearson'schen Korrelationskoeffizienten r^2) hoch, geht ein hoher Anteil der Ergebnisse des Modells in das Endergebnis der flächenhaften Darstellung ein. Bei einem niedrigen Erklärungsmaß wird dagegen weniger Information aus den Modellrechnungen verwendet.

Das zu entwickelnde Verknüpfungsverfahren Messung/Rechnung ist in das Programmpaket FLADIS integriert worden, so dass es routinemäßig zur Verknüpfung von Messungen und Ausbreitungsrechnungen für alle in der EU-Rahmenrichtlinie genannten Schadstoffe verwendet werden kann. Das zu erstellende Zusatzmodul steht dem Umweltbundesamt im Rahmen seiner bereits erworbenen FLADIS-Lizenzen ohne weitere Kosten zur Verfügung.

2.1 Interpolationsverfahren

Für die Lösung des Interpolationsproblems gibt es verschiedene Ansätze. (siehe auch:[Hos89])

Als Beispiele seien genannt:

- i) inverse Abstands-Wichtungs-Methoden (z.B. Shepard, ISDW)
- ii) radiale Basisfunktions-Methoden (z.B. Hardy, Duchon, Franke)
- iii) Finite-Element-Methoden (z.B. Interpolation nach Triangulierung)

Die Verfahren werden noch unterschieden in *global* - alle Stützstellen $\{x_i, y_i, f_i\}$ werden zur Berechnung des Funktionswertes F an einer beliebigen Stelle (x, y) benutzt, oder *lokal* - nur Stützstellen innerhalb eines abgrenzten Bereichs um (x, y) werden benutzt.

In diesem Kapitel werden die in dieser Untersuchung verwendeten Interpolationsverfahren vorgestellt.

2.1.1 Shepard-Verfahren

Verfahren dieses Typs werden auch als *Invers-Abstands-Wichtungs-Methode* (IDW) bezeichnet und sind im Prinzip Verallgemeinerungen von Shepard's Grundidee (siehe auch:[She68]):

$$F(x, y) = \sum_{i=0}^N w_i(x) f_i$$

Die sogenannten Gewichtsfunktionen w_i werden dabei so konstruiert, dass der Einfluss eines Stützpunktes f_i mit zunehmender Entfernung vom Interpolationspunkt $F(x, y)$ abnimmt (siehe Abbildung). Eine häufige Wahl für die Gewichtsfunktionen ist:

$$w_i(x, y) = \frac{\frac{1}{d_i^\mu}(x, y)}{\sum_{i=0}^N \frac{1}{d_i^\mu}(x, y)}$$

mit dem euklidischen Abstand

$$d_i(x, y) = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2}$$

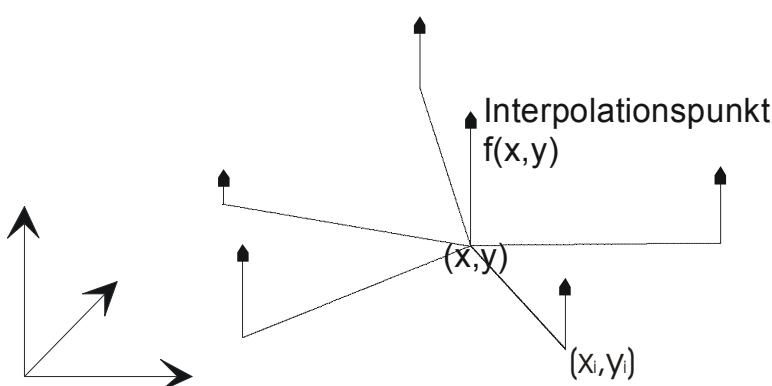


Abb. 1: Globales Shepard-Verfahren

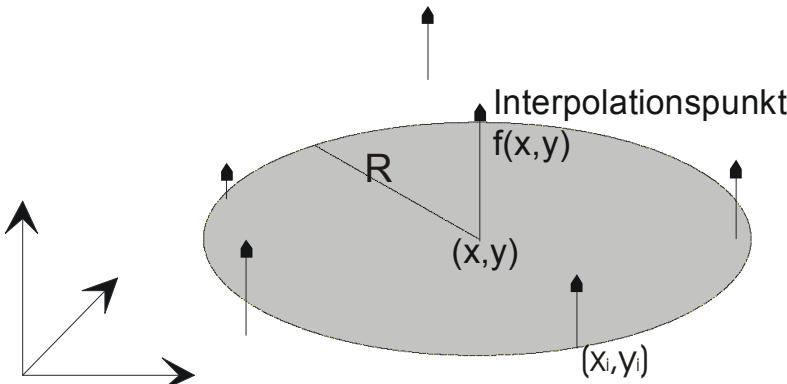


Abb. 2: Franke-Little-Gewichte

$F(x, y)$ ist für $0 < \mu \leq 1$ unstetig in der ersten Ableitung an den Stützpunkten, d.h. die Interpolationsfläche hat Spitzen in den Stützpunkten. Für $\mu > 1$ ist die Tangentialebene an den Stützstellen horizontal. Darüber hinaus hat $F(x, y)$ globalen Charakter, d.h. die Änderung eines Datenpunktes beeinflusst die gesamte Interpolationsfläche und erfordert eine komplette Neuberechnung.

Dieses globale Verhalten lässt sich durch die Verwendung der sogenannten *Franke-Little-Gewichtsfunktion* (siehe:[Fra82]):

$$w_i(x, y) = \frac{\sigma_i^\mu}{\sum_{i=0}^N \sigma_i^{\mu y}}$$

mit

$$\sigma_i = \begin{cases} \frac{R \cdot d_i(x, y)}{R * d_i(x, y)} & \text{wenn } \sigma_i > 0 \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$

in eine lokale Methode umwandeln. Bei der Bestimmung eines Punktes werden nur diejenigen Datenpunkte herangezogen, die in einem Kreis mit Radius R und Mittelpunkt (x, y) liegen (siehe Abbildung). Der Parameter R ist dabei sorgfältig zu wählen.

2.1.2 Hardy's Multiquadriken (Radiale Basisfunktions-Methoden)

Die Gruppe der radialen Basisfunktions-Methoden lässt sich durch folgende Formel charakterisieren:

$$F(x, y) = \sum_{i=1}^N a_i R_i(x, y) + p_m(x, y)$$

Die R_i sind dabei radiale Funktionen des Abstandes $d_i(x, y)$ des Punktes (x_i, y_i) zum Interpolationspunkt (x, y) . Das Polynom p_m vom Grade m wird benötigt, um eine polynomiale Genauigkeit vom entsprechendem Grad zu erreichen.

Die einzelnen Verfahren unterscheiden sich in der Wahl der Basisfunktionen R_i . Die Koeffizienten a_i werden durch das Lösen eines linearen Gleichungssystems ermittelt:

$$\sum_{i=1}^N a_i p_m(x_i, y_i) = 0$$

Diese Gleichung lässt sich physikalisch deuten als Gleichgewichtsbedingung (Summe aller Kräfte bzw. Momente gleich Null; (siehe auch:[Fra85]).

In Hardy Multiquadriken-Methode wird eine quadratische Form als Basisfunktion gewählt (siehe auch:[Har90]):

$$R_i(x, y) = [d_i(x, y)^2 + R^2]^{my}$$

Zunächst ist die Wahl von R und μ frei. Wählt man $\mu = 0.5$ so erhält man die Gleichung eines Rotationshyperboloids. Dieser Wert wird allgemein in der Literatur verwendet.

Die optimale Wahl des Parameter R^2 ist ein offenes Problem (siehe auch:[Carl 91]). Die Wahl ist relativ unabhängig von der Anzahl und der Verteilung der Stützpunkte und hängt stark von den Messwerten f_i ab. Eine gute Näherung (*Foley-Näherung* (siehe auch:[Fol87]) ist gegeben durch:

$$R^2 = \frac{I}{(I + 120V)^2}$$

Dazu werden die Daten zuerst skaliert:

$$\begin{aligned}\tilde{x}_i &= (x_i - x_{\min}) / (x_{\max} - x_{\min}) \\ \tilde{y}_i &= (y_i - y_{\min}) / (y_{\max} - y_{\min}) \\ \tilde{f}_i &= (f_i - f_{\min}) / (f_{\max} - f_{\min})\end{aligned}$$

für $i = 1, \dots, n$.

Mit der Methode der kleinsten Quadrate wird dann ein quadratisches Polynom $q(\tilde{x}, \tilde{y})$ berechnet. Mit der Varianz

$$V = \frac{\sum_{i=1}^n [\tilde{f}_i - q(\tilde{x}_i, \tilde{y}_i)]^2}{n}$$

Die Existenz und Eindeutigkeit der Lösung dieses Interpolationsproblems mit radialen Basisfunktionen ist gesichert.

Die Wahl des besten Wertes für NPPR ist nur subjektiv möglich.

2.1.3 Interpolation nach Triangulierung

Eine Variante der Interpolation mit sehr lokalem Charakter bietet die Interpolation nach einer Triangulierung. Eine Menge von Dreiecken bildet genau dann eine Triangulierung einer gegebenen Datenpunktmenge, falls gilt:

- i) Nur die Datenpunkte bilden die Eckpunkte der Dreiecke.
- ii) Der Durchschnitt des Inneren aller Dreiecke ist leer (die Dreiecke überlappen nicht)
- iii) Die Vereinigung aller Dreiecke ergibt die konvexe Hülle aller Punkte (es gibt keine Löcher zwischen den Dreiecken)

Eine Triangulierung für mehr als vier Datenpunkte ist nicht mehr eindeutig, so dass man mittels eines ausgewählten Verfahren eine optimale Triangulierung finden muss. Im Programm FLADIS wird eine Delaunay Triangulierung basierend auf Voronoi-Diagrammen benutzt (siehe auch: Abra91]). Der Algorithmus sieht folgendermaßen aus:

- 1) Starte mit einer Triangulation von 4 Punkten, in deren Dreiecken die Datenpunkte liegen.
- 2) Bestimme alle Dreiecke, in deren Umkreis der neu einzufügende Punkt liegt.

- 3) Ersetze diese Dreiecke durch Dreiecke, die aus dem neuen Datenpunkt und je einer äußereren Kante der zu ersetzenen Dreiecke bestehen.
- 4) Wiederhole Schritt 2 und 3 bis alle Datenpunkte trianguliert sind.
- 5) Entferne die Dreiecke, die mindestens einen der 4 Startpunkte als Eckpunkt besitzen.

Auf den so berechneten Teilflächen der Datenpunkte kann dann interpoliert werden. Dazu gibt es eine Reihe von Interpolationsschemata, z.B. einfaches lineares Interpolieren auf der Dreiecksfläche, Bezier-Flächen oder Coon'sche Flächen. Die beiden letzteren Verfahren erzeugen "glätttere" Flächen an den Übergangsstellen der Dreiecke.

Im Programm FLADIS ist die Methode des linearen Interpolierens installiert. Dazu wird über einem Interpolationspunkt das Lot berechnet und im zweiten Schritt der Durchstoßpunkt des Lotes durch die Dreiecksfläche ermittelt. Für die Interpolationspunkte außerhalb der konvexen Hülle ist folgendermaßen extrapoliert worden: Auf den Punkten der konvexen Hülle sind horizontale Senkrechten zu den jeweiligen Kanten gebildet worden; so ergeben sich unendlich ausgedehnte Rechtecke und Dreiecke; für Interpolationspunkte in den Dreiecken wird der z-Wert auf den Wert des entsprechenden Datenpunktes gesetzt und für die Interpolationspunkte unter einem Rechteck entsprechend der Methode für die Punkte innerhalb der konvexen Hülle verfahren.

2.2 Kombination aus Modell und Interpolation

Um eine flächenhafte Darstellung zu erstellen, wird für jeden ausgewählten Zeitpunkt eine Interpolation (F_I) und eine Berechnung der Immission nach dem benutzten Modell (F_B) durchgeführt. Die Bestimmung des endgültigen Wertes F_E an jeder Stelle (x, y) des betreffenden Interpolationsgebietes wird nach folgender Formel vorgenommen:

$$F_E(x, y) = (1 - \alpha) * F_I(x, y) + \alpha * F_B(x, y)$$

Der Wichtungsfaktor α ist der Erklärungswert des Bilanzierungsmodells für die betreffende Stunde. Für eine positive Korrelation r ergibt er sich als das Quadrat des Korrelationskoeffizienten.

Zur Bestimmung des Anteils eines Modells bei der Berechnung der flächenhaften Konzentrationen wird in FLADIS der Korrelationskoeffizient zwischen den gemessenen Konzentrationen und den mit dem verwendeten Modell bestimmten Konzentrationen an den Mess-Stationen benutzt. Der Korrelationskoeffizient alleine sagt aber nichts darüber aus, ob der Zusammenhang zwischen den Modellwerten und den Messungen signifikant ist. Deshalb ist zusätzlich ein Signifikanztest in die Berechnung integriert worden. Der implementierte Signifikanztest ist der sog. T-Test oder Student-Test. Der T-Test beruht auf der Verteilung der geschätzten

Koeffizienten, er testet ob der Unsicherheitsbereich um die Koeffizienten den Nullpunkt überdeckt. Nur wenn dieser Test eine Signifikanz zeigt, wird der berechnete Korrelationskoeffizient als Wichtungsfaktor benutzt. Die Korrelation ist per Definition signifikant bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 %.

Eine einfache und gebräuchliche Methode zur flächenhaften Darstellung von zeitlichen Mittelwerten besteht darin, zuerst die Messwerte über den ausgewählten Zeitabschnitt zu mitteln und auf den resultierenden Datensatz ein geeignetes Interpolationsverfahren anzuwenden (z.B. Shepard-Verfahren).

In FLADIS ist eine fortgeschrittene Methode implementiert. Für eine ausgewählte, gleichverteilte Stichprobe von Halbstunden aus dem interessierenden Zeitintervall wird eine mit dem Bilanzierungsmodell gewichtete Interpolation durchgeführt. Dadurch erhält man für jeden Gitterpunkt einen Halbstundenwert, der dann über das entsprechende Zeitintervall gemittelt wird.

Durch dieses Verfahren kann auch für Zeitintervalle das jeweilige Modell genutzt werden. Außerdem heben sich bei der Mittelung spezifische Besonderheiten des ausgewählten Interpolationsverfahrens heraus.

3 Integration der Ergebnisstruktur der REM3-Felder in FLADIS

In das System FLADIS ist eine Datenschnittstelle integriert worden, die es erlaubt Ergebnisse von einem externen Modell wie REM3 einzulesen.

Das folgende Schema zeigt den Ablauf bei der Benutzung von externen Modelldaten.

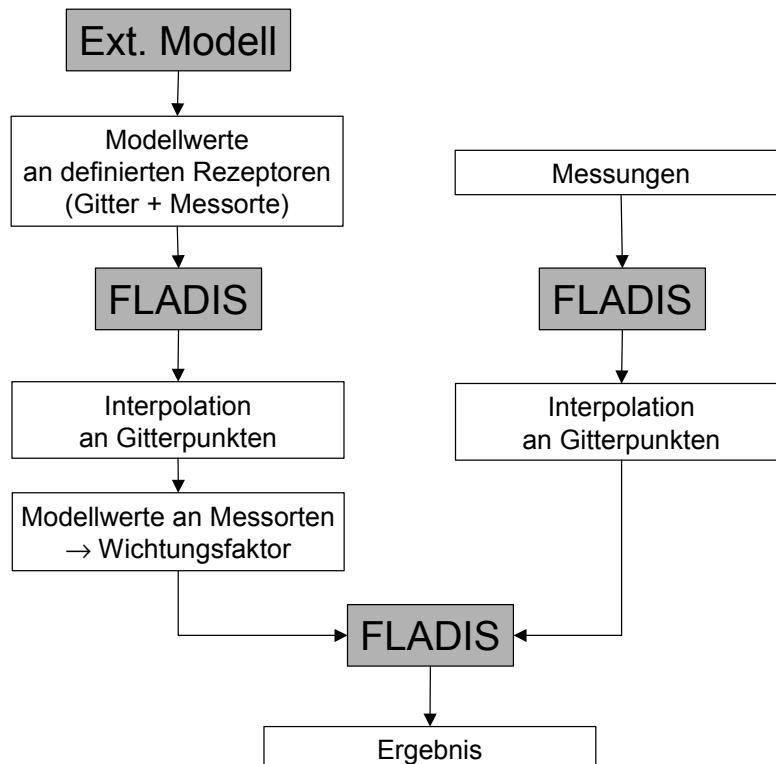


Abb. 3: Schema der Einbindung von externen Modelldaten in FLADIS

1. Das externe Modell erzeugt Modelldaten für jede Stunde für vordefinierte Rezeptoren (Gitter plus Orte der Messstationen). Die erzeugten Modelldaten werden im selben Format abgelegt, wie die Messdaten für FLADIS. Die Bezeichnung der Dateien ist ebenfalls analog zu den Messdaten, wobei der Stationscode aus einer Datei analog zur Stationsbeschreibungsdatei ausgelesen wird (siehe nächster Absatz, z.Bsp. "No2gggg.j97" für die Stundenwerte von NO₂ im Jahr 1997 für den Rezeptor mit einem beliebigen Code "gggg").
2. Die Lage und der Code der einzelnen Rezeptoren werden in einer Datei abgelegt, welche das gleiche Format wie die Messstellen-Beschreibungsdatei hat.
3. Der Ablauf wird durch die Abb. 3 beschrieben. FLADIS liest Rezeptordaten des externen Modells ein und interpoliert diese. Aus der Interpolation wird der

Gitterwert in dem sich die Mess-Station befindet ausgelesen und mit dem gemessenen Wert verglichen. Daraus wird wie bisher der Wichtungsfaktor bestimmt

4. Gemäß des Wichtungsfaktors werden die interpolierten Modellwerte mit dem interpolierten Feld der Messungen kombiniert.

Der Vorteil im identischen Datenformat der externen Modellwerte wie die Messdaten, liegt darin, dass damit die externen Modellwerte mit FLADIS direkt ausgewertet werden können.

Bei der Benutzung der Modelldaten können noch zwei Einstellungen vorgenommen werden:

1. Die Modelldaten werden geeicht. D.h. es wird für die betrachtete Stunde der Mittelwert der Modellwerte an den Orten der Messungen bestimmt und mit dem Mittelwert der Messungen verglichen. Die gesamten Modellwerte werden dann mit dem Quotienten aus Messung/Modell multipliziert.
2. Die Werte für die kombinierten Mess-/Modellwerte liegen nicht mehr zwangsläufig auf den gemessenen Werten. Durch eine aktivierbare Voreinstellung kann FLADIS so eingestellt werden, dass die Differenz zwischen den kombinierten und den gemessenen Werten als interpoliertes Feld wieder auf das Gesamtbild für eine Stunde aufaddiert wird. Damit ist die an ein reines Interpolationsverfahren gestellte Anforderung der Stützstellentreue eingehalten.

4 Ergebnisse

4.1 Vergleich von verschiedenen Interpolationsverfahren

In einem ersten Vergleich sind die in Kapitel 2.1 aufgeführten Interpolationsverfahren auf einem Testdatensatz angewendet worden. Als Testdatensatz wurden NO₂-Stundenmittelwerte von 22 Uhr vom 24.10.1997 ausgewählt. Bei dem in Abb. 4 gezeigten Vergleich wurden nur die „ländlichen Stationen“ aus der Abb. 5 berücksichtigt, da auf Grund der geringeren Dichte der Mess-Stationen die Unterschiede der einzelnen Verfahren besser erkennbar sind.

Bei der Triangulierung ist deutlich die Dreiecksstruktur zur erkennen. Dieses Verfahren benötigt keine weiteren Informationen bzw. Parameter und das Verhalten zwischen den Stützstellen ist objektiv nachvollziehbar. Das Auftauchen von geraden Kanten in einer flächenhaften Darstellung entspricht aber nicht dem allgemeinen Plausibilitätsempfinden.

Das Hardy-Verfahren zeigt ein ähnliches Ergebnis wie die Triangulierung nur das die harten Kanten entsprechend des physikalischen Ansatzes geglättet werden. Damit entsteht ein "gefälligeres" Bild, dass aber in seinen Verhalten dem "objektiveren" Verfahren der Triangulierung sehr ähnlich ist.

Die beiden unteren Darstellungen zeigen die Anwendung des Shepard-Verfahrens (IDW). Das globale Verfahren lässt den radial-symmetrischen Ansatz erkennen. Einzelne lokale Strukturen werden im Vergleich zu den beiden erstgenannten Verfahren kleinräumiger. Beim lokalen IDW-Verfahren werden dagegen lokale Strukturen entsprechend größer. Das Problem beim lokalen Verfahren besteht darin, dass das Verfahren keine definierten Werte liefert, die außerhalb des angegebenen Radius liegen. Der Radius wurde bei der vorliegenden Anwendung auf 100 km gesetzt. Aus der Darstellung der ländlichen Mess-Stationen in Abb. 5 wird deutliche, dass im südlichen Bayern keine Stationen vorhanden sind und damit das lokale Verfahren keine definierten Werte angeben kann.

In den folgenden Darstellung wurde jeweils immer das Hardy-Verfahren verwendet.

4.2 Vergleich von verschiedenen ausgewählten Stationen

In einem weiteren Vergleich sind die in Kapitel 3 aufgeführten Programm-ergänzungen auf den in Kapitel 4.1 genannten Testdatensatz angewendet worden.

In der Abb. 5 sind auf der linken Seite die Lagen der verwendeten Mess-Stationen dargestellt. Auf der rechten Seite ist eine Interpolation auf diesen ausgewählten Stützstellen dargestellt. Als Interpolationsverfahren ist das Hardy-Verfahren gewählt worden. Bei den Darstellung in der oberen Zeile wurden alle Stationen verwendet für die in dieser Stunde Messdaten vorlagen. In der unteren Zeile wurden nur Stationen verwendet, die als ländliche (rural) Stationen gekennzeichnet waren (siehe Anhang).

Die Unterschiede zwischen diesen beiden Darstellung sind erwartungsgemäß groß. Es wird dadurch aber deutlich, welchen dominierenden Einfluss die Auswahl der berücksichtigten Stationen auf der flächenhafte Darstellung hat. Bedenken muss

man dabei auch, dass die Lage von einer großen Zahl kontinuierlich messenden Stationen aus anderen Gründen festgelegt wurden (23.BImSchV, Ballungsräume).

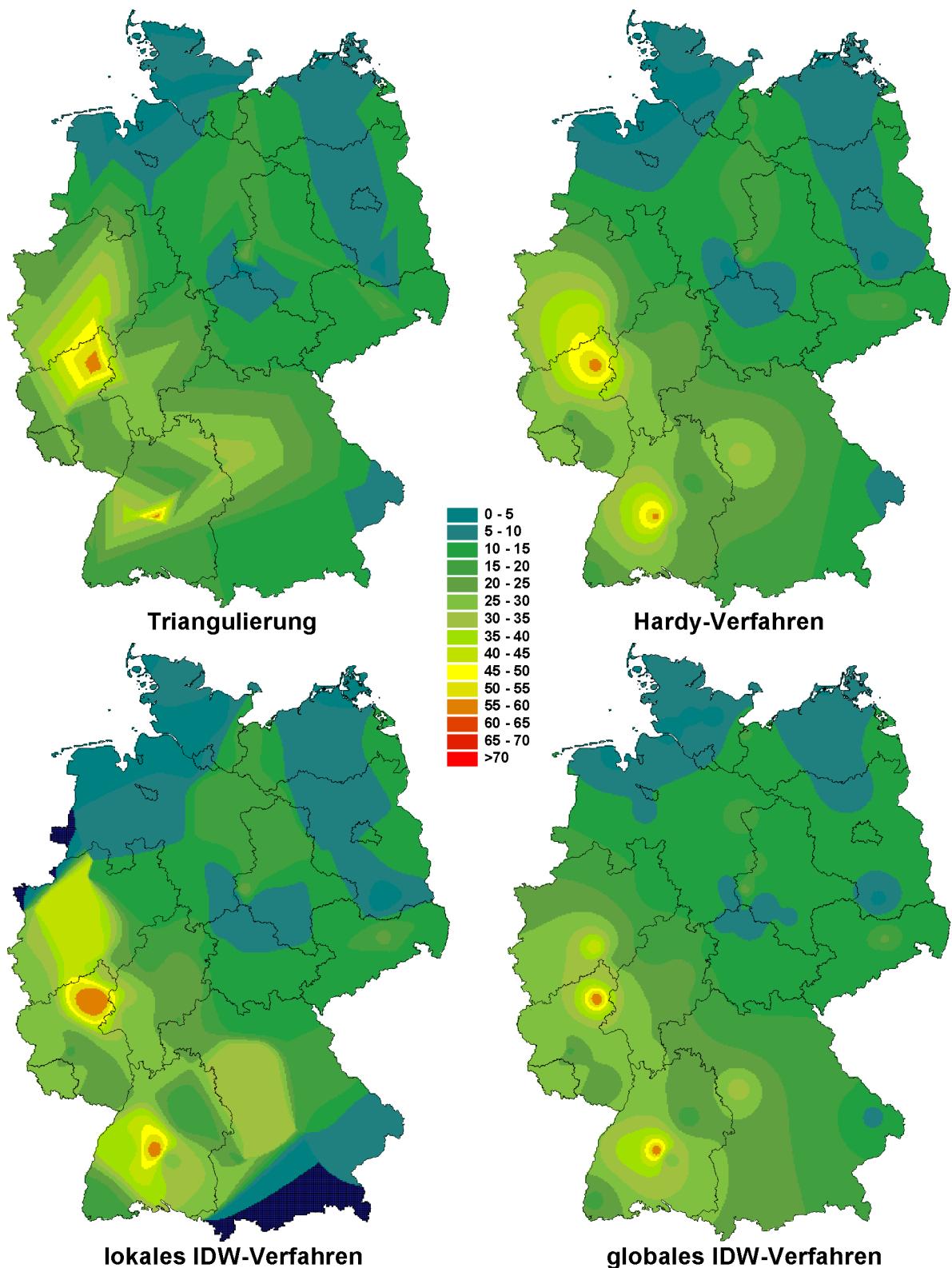


Abb. 4: Vergleich verschiedener Interpolationsverfahren auf den Datensatz NO₂-Konzentration in $\mu\text{g}/\text{m}^3$ am 24.10.1997 um 22 Uhr für ländliche Stationen.

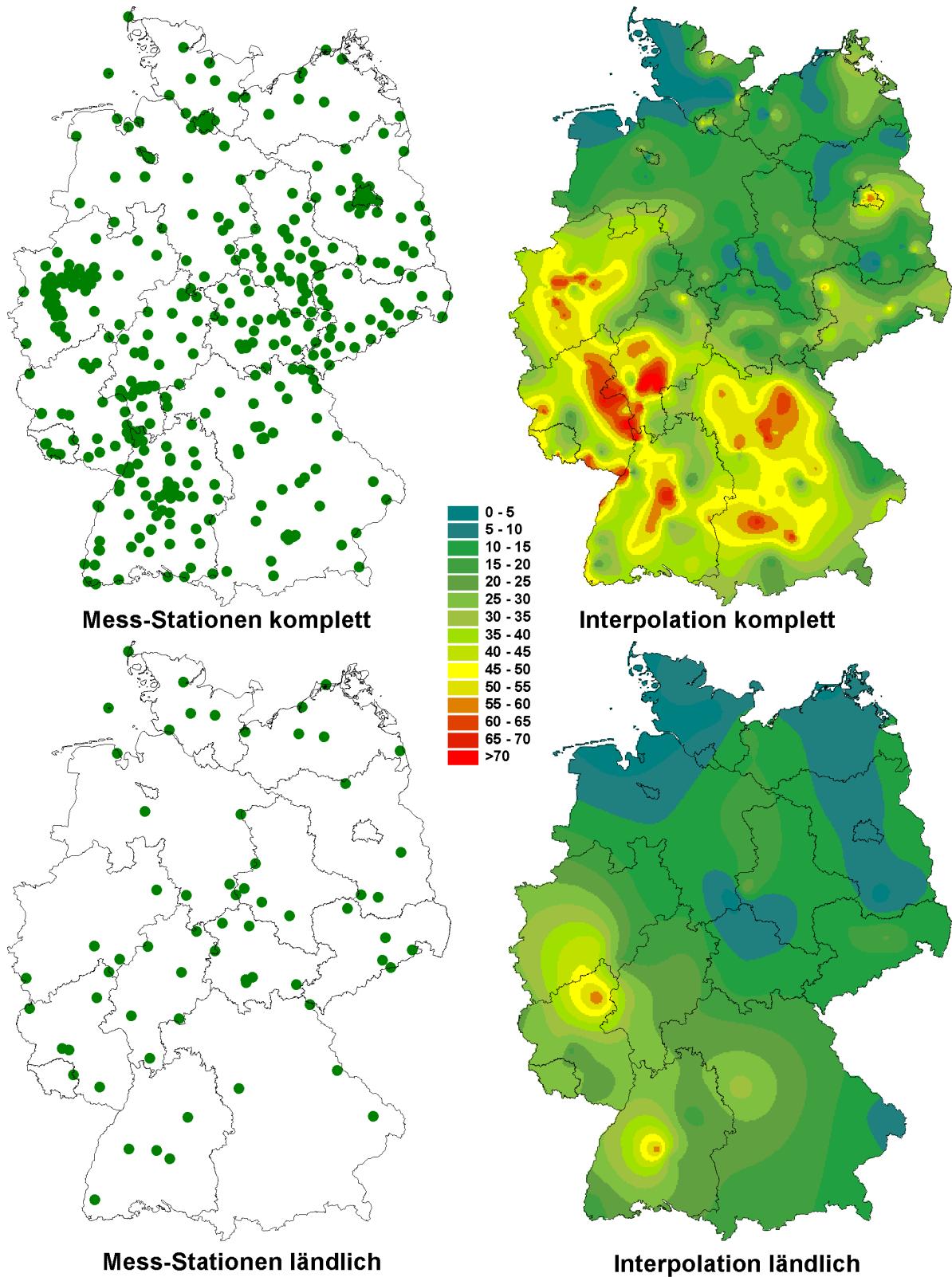


Abb. 5: Darstellung der interpolierten NO₂-Konzentration in µg/m³ am 24.10.1997 um 22 Uhr für ausgewählte Stationen.

4.3 Berücksichtigung der REM3- Daten

Auf den folgenden vier Seiten ist eine Analyse der Berücksichtigung der REM3-Ergebnisse für den Datensatz aus Kapitel 4.1 dargestellt. Die Abb. 6 zeigt die Ergebnisse des REM3-Modells für den ausgewählten Zeitpunkt. Die Modellauflösung von ca. 30 km wurde dabei mit einem Triangulationsansatz auf ein Auflösung von 2 km interpoliert. Aus dieser Abbildung wird deutlich, dass REM3 den großräumigen West-Ost-Gradienten gut abbildet. Die Struktur der Modellergebnisse ist der Darstellung der ländlichen Stationen ähnlicher, wobei aber das Niveau der Konzentration und die räumliche Ausdehnung von Flächen höherer Belastung höher bzw. größer ist. Im Vergleich zu der Darstellung aller vorhandenen Messdaten wird erwartungsgemäß die kleinräumige Struktur von Ballungszentren gerade im Osten Deutschlands nur unzureichend wiedergegeben, da solche Strukturen von der Modellskala nur ungenügend aufgelöst werden können.

Das Verhalten der in Kapitel 3 beschriebenen Schnittstelle REM3 zu FLADIS wird getrennt für alle und ländliche Stationen in Abb.7 und Abb. 8 gezeigt. Der jeweilige Erklärungswert ist in der folgenden Tabelle aufgeführt.

Tabelle 1: Erklärungswert des Models REM3 für den 24.10.1998

	Alle Stationen	Ländliche Stationen
Ohne Eichung	46 %	52 %
Mit Eichung	44 %	29 %

Der Einfluss von REM3 ist bei der Darstellung der ländlichen Stationen stärker als bei der Gesamtdarstellung. Außerdem führt die Eichung der Modellwerte zu einem schlechteren Erklärungswert. Insgesamt ist deutlich, dass die Eichung relativ wenig Einfluss auf die kombinierten Daten hat.

Für die weitere Auswertung ist das Integrationsverfahren jeweils ohne Eichung verwendet worden.

Die Gegenüberstellung der so bestimmten Darstellungen Interpolation und Interpolation mit REM für die Auswahl „komplett“ und „ländlich“ in Abb. 9 zeigt exemplarisch den Effekt der vorgestellten FLADIS-Methode. Für den kompletten Datensatz ist der Effekt des Modells nur gering erkennbar. Die Situation in den Ballungsräumen dominiert die Darstellung. Dahingehend ist der Einfluss bei der Verwendung ausschließlich ländlicher Stationen deutlicher. In Gebieten, in denen wenige bis keine Stationen liegen (am Ostrand und im Südosten) wird eine feinere Strukturauflösung durch die Modellintegration erreicht.

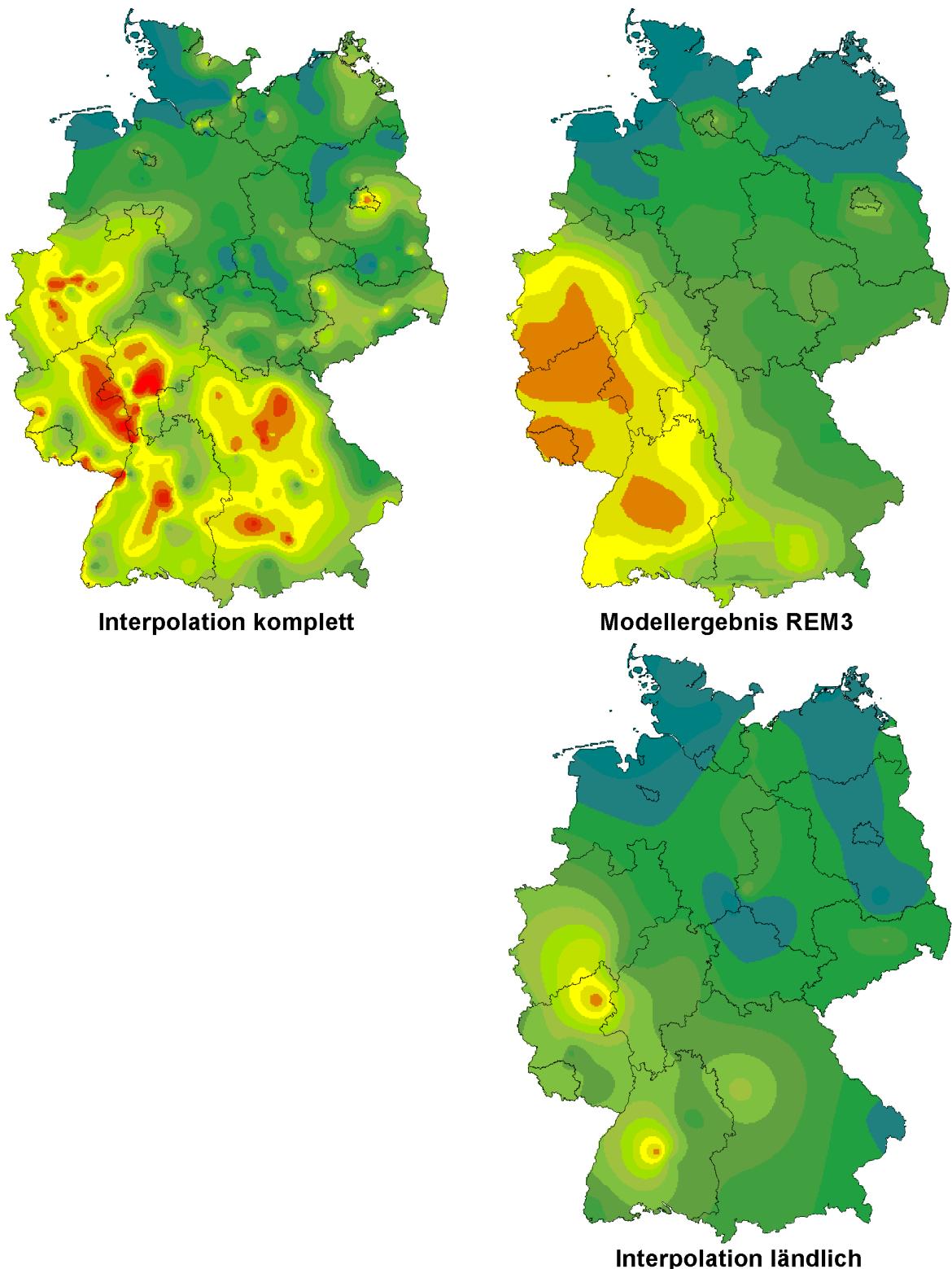


Abb. 6: Vergleich der Interpolationen für ländliche Stationen und für alle Stationen (kompletten Datensatz, komplett) mit den REM3-Modellergebnissen (Werte in $\mu\text{g}/\text{m}^3$).

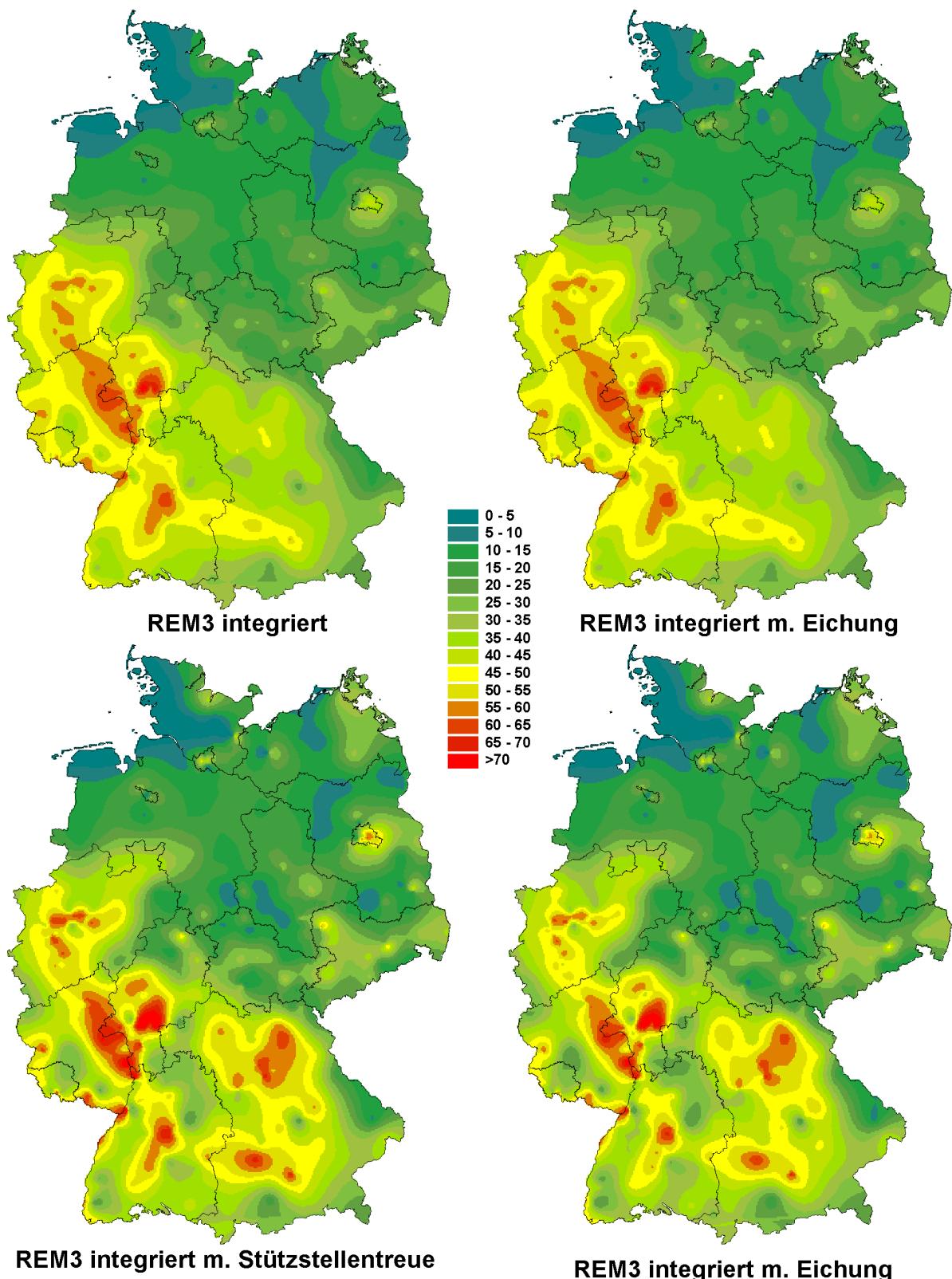


Abb. 7: Vergleich verschiedener Integrationsverfahren auf den kompletten Datensatz
(Werte in $\mu\text{g}/\text{m}^3$).

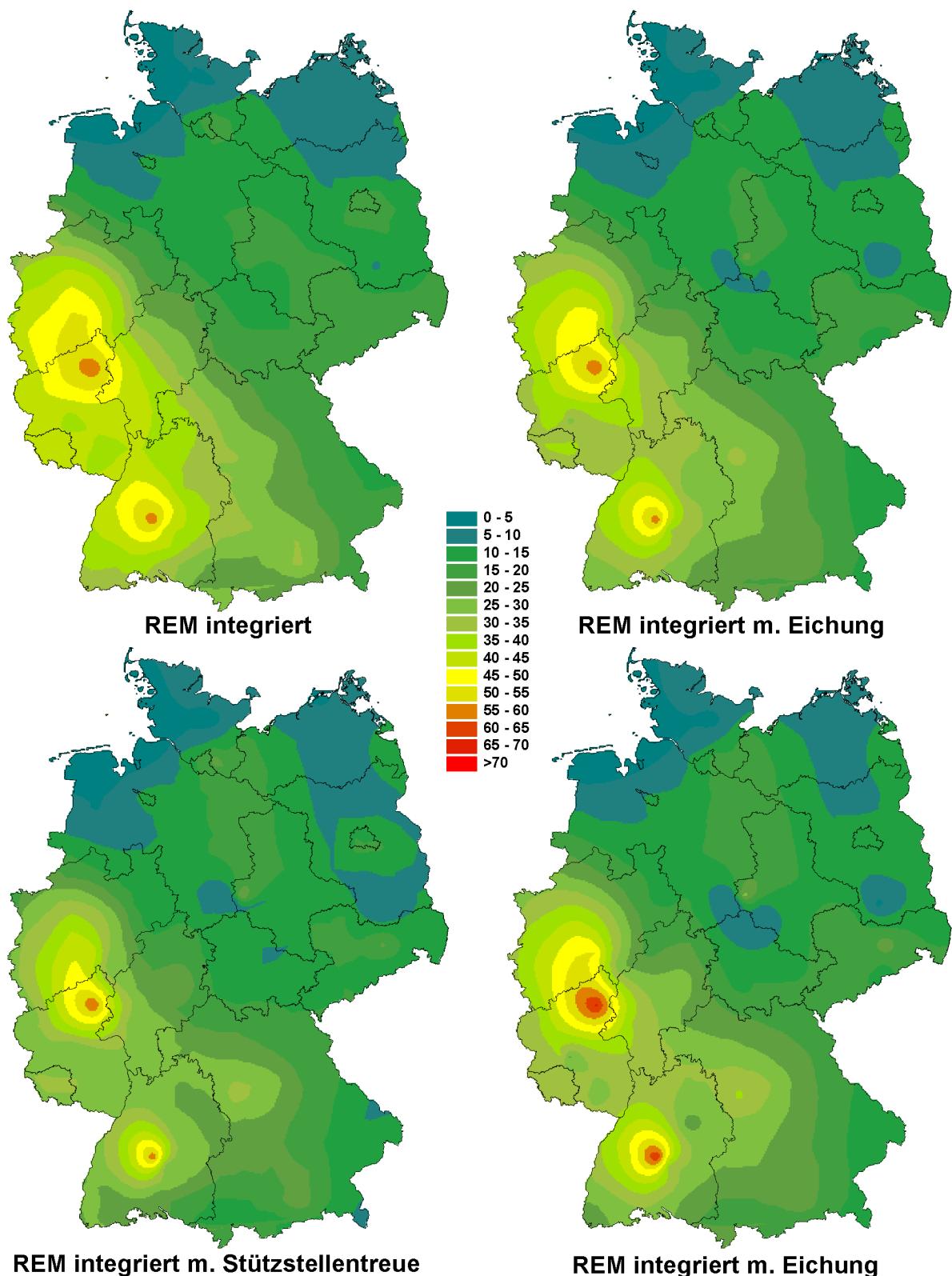


Abb. 8: Vergleich verschiedener Integrationsverfahren für den ländlichen Datensatz (Werte in $\mu\text{g}/\text{m}^3$).

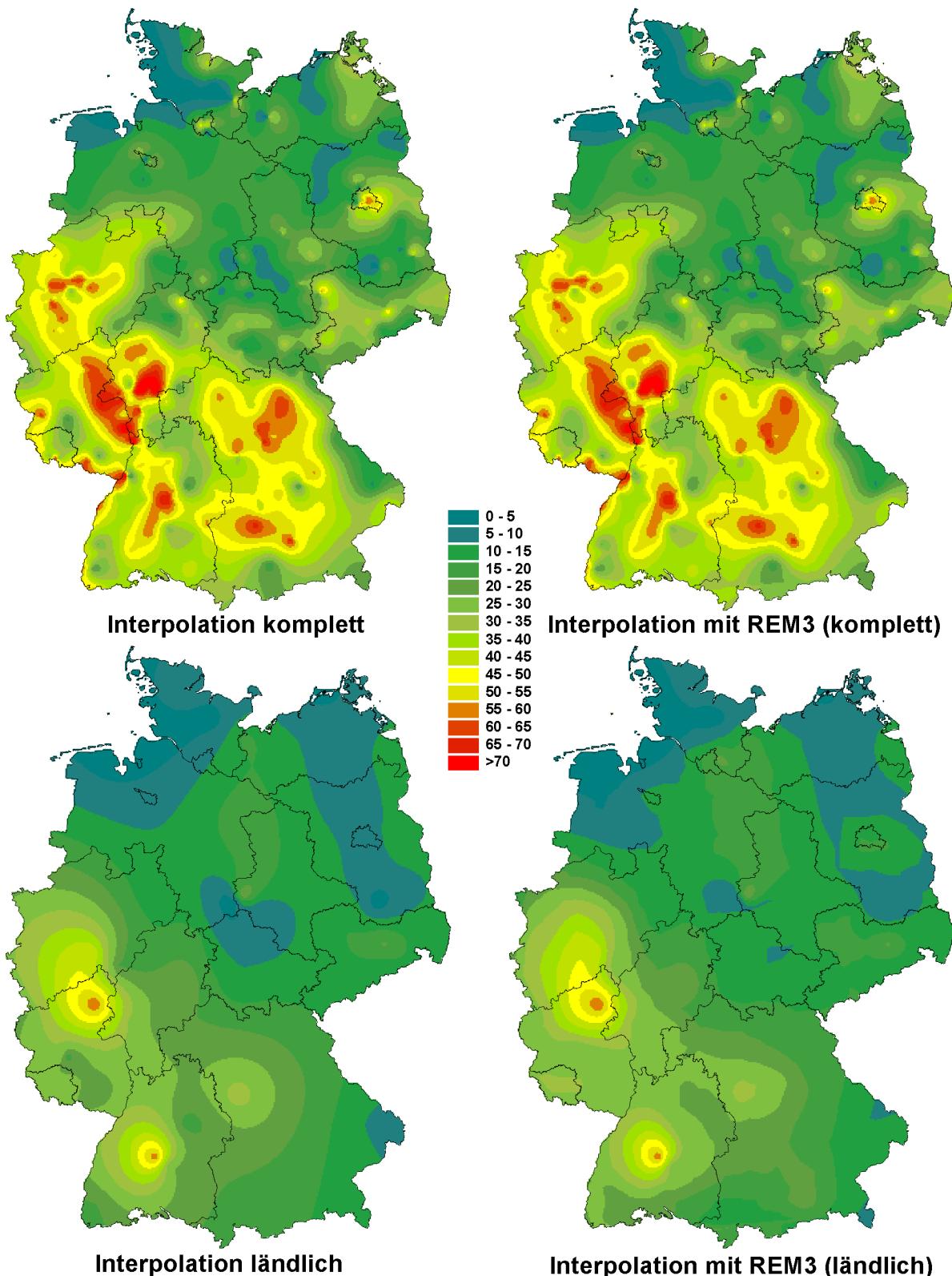


Abb. 9: Vergleich des ausgewählten FLADIS-Integrationsverfahrens mit den reinen Interpolationen für den kompletten und ländlichen Datensatz (Werte in $\mu\text{g}/\text{m}^3$).

4.4 Weitere Beispiele

Auf den folgenden drei Abbildungen (Abb. 10 bis Abb. 13) ist das in Kapitel 4.3 dargestellte Verfahren auf drei weitere Zeitpunkte angewendet worden. Diese drei Zeitpunkte zeigen ein sehr unterschiedliches räumlichen Verhalten der Schadstoffverteilung.

In den Karten ist jeweils oben links die Interpolation des kompletten Datensatzes dargestellt, rechts davon befindet sich die Darstellung der Modellergebnisse. In der unteren Reihe ist links ein Integration der Modelldaten mit einer nachträglich Korrektur zur Stützstellentreue und rechts eine Integration ohne Stützstellentreue dargestellt. In beiden Fällen wurden die Modelldaten nicht geeicht.

Die Erklärungswerte ergaben sich folgendermaßen:

Tabelle 2: Erklärungswerte für ausgewählte Stunden

Zeitpunkt		Erklärungswert kompletter Datensatz	Erklärungswert ländliche Stationen
11.04.1997 8 Uhr	ohne Eichung	32 %	59 %
	mit Eichung	22 %	55 %
18.04.1997 21 Uhr	ohne Eichung	15 %	56 %
	mit Eichung	14 %	36 %
20.04.2001 21 Uhr	ohne Eichung	9 %	0 %
	mit Eichung	9 %	0 %

Auffällig ist, dass zu allen drei Zeitpunkten REM3 hohe Konzentrationen in Nordrhein-Westfalen bestimmt, während aus der Messung diese hohen Werte nur am 11.04. erreicht werden. Gerade das Beispiel vom 20.04. zeigt die Schwierigkeit, eine sehr kleinräumige Struktur mit einem großer auflösenden Modell abzubilden. Die optionale Integration der Modellergebnisse ohne eine nachträgliche Korrektur auf Stützstellentreue zeigt exemplarisch am 11.04. dass die gemessenen Werte z. B. im Südosten von Deutschland deutlich verringert werden.

Die Erklärungswerte sind bis auf den 20.04. bei der Berücksichtigung von ländlichen Stationen deutlich höher als bei der Berücksichtigung des kompletten Datensatzes. Außerdem führt eine vorherige Eichung der Modellwerte auf das Niveau der gemessenen Werte zu einer Verschlechterung der Erklärung.

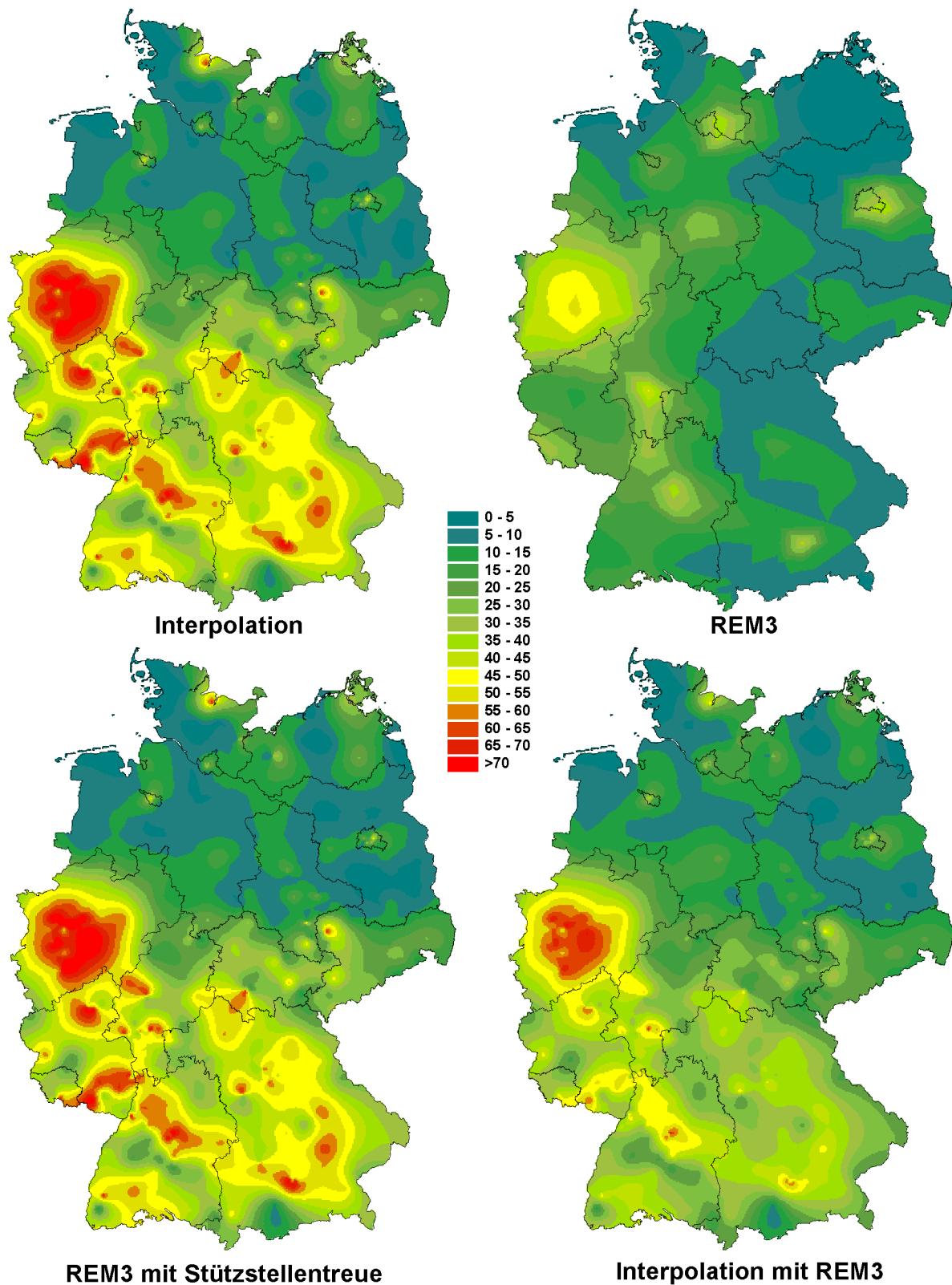


Abb. 10: Vergleich der Interpolation mit den reinen REM3-Modellergebnissen und zwei verschiedenen Integrationen für den 11.04.1997 8 Uhr (Werte in $\mu\text{g}/\text{m}^3$).

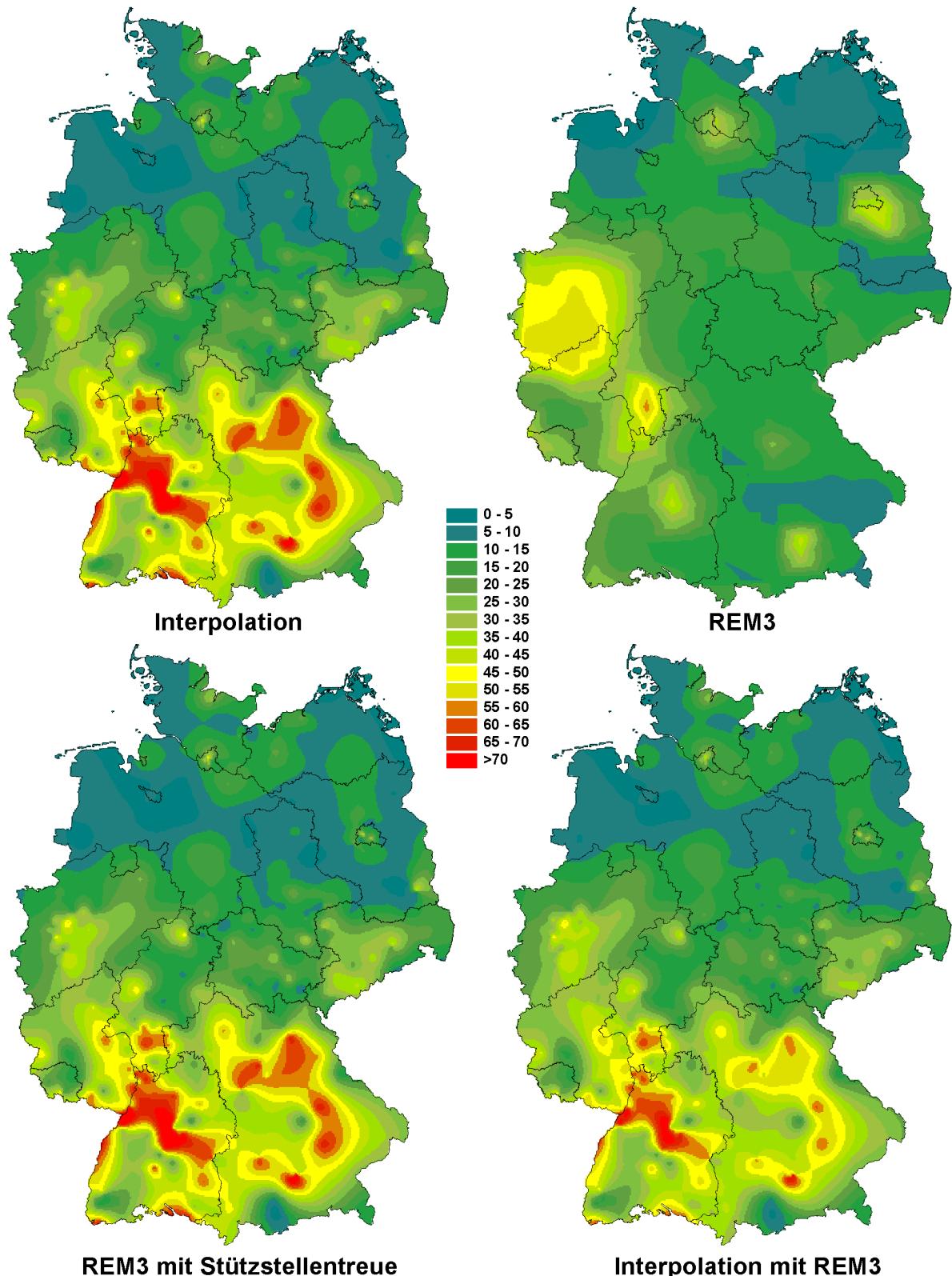


Abb. 11: Vergleich der Interpolation mit den reinen REM3-Modllergebnissen und zwei verschiedenen Integrationen für den 18.04.1997 21 Uhr (Werte in $\mu\text{g}/\text{m}^3$).

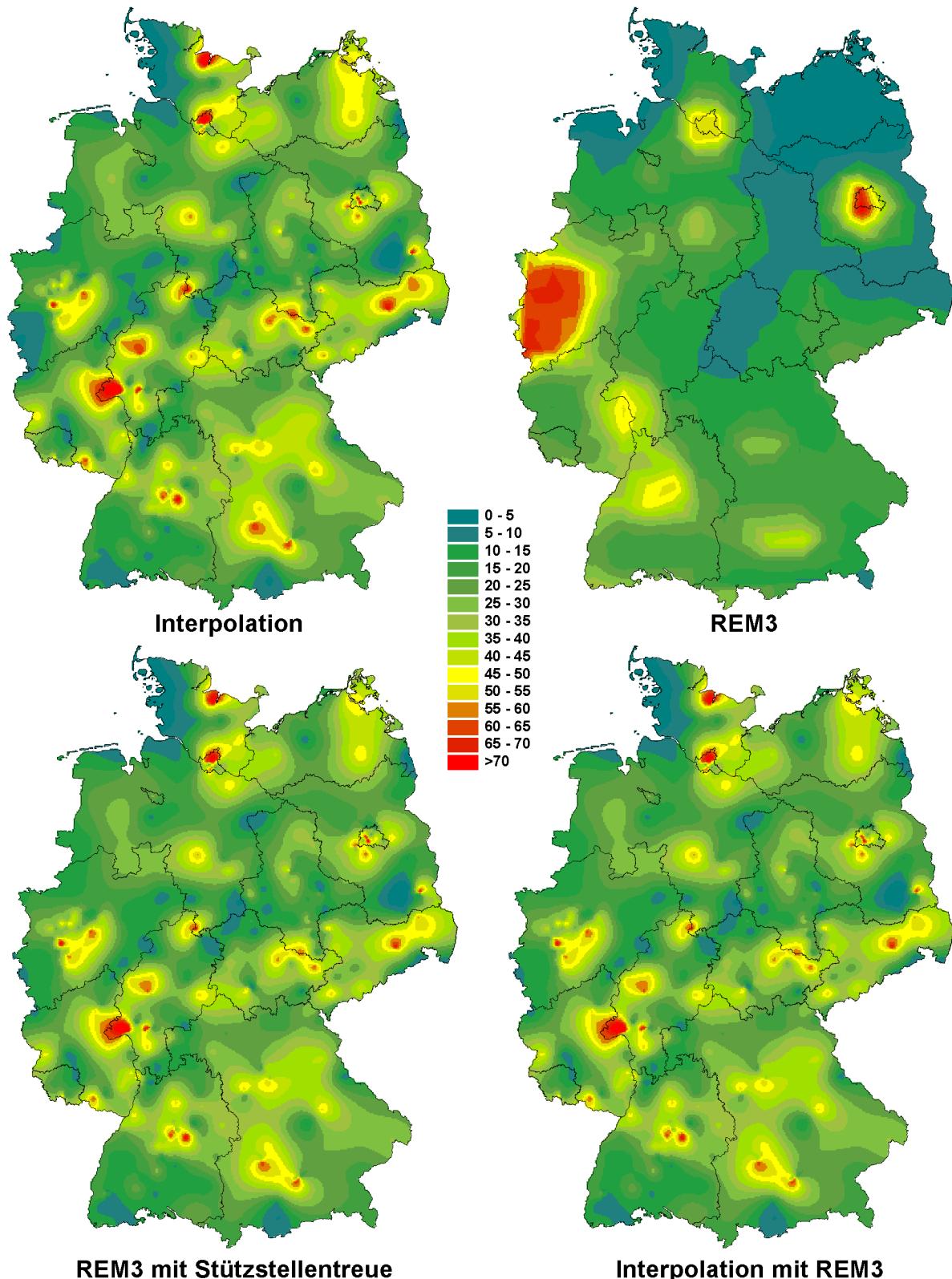


Abb. 12: Vergleich der Interpolation mit den reinen REM3-Modllergebnissen und zwei verschiedenen Integrationen für den 20.04.1997 21 Uhr (Werte in $\mu\text{g}/\text{m}^3$).

4.5 Vergleich für NO₂ Jahresmittelwerte 1997

Mit den vorgestellten Integrationsverfahren (Stützstellentreue, ohne Eichung) ist für den gesamten Datensatz der NO₂-Messungen des Jahres 1997 eine FLADIS-Rechnung durchgeführt worden.

In der Abb. 14 ist der entsprechende Jahresmittelwerte einer reinen Interpolation des kompletten Datensatzes und der ländlichen Stationen gegen den Jahresmittelwert der REM3-Modellergebnisse dargestellt. Deutlich zu erkennen in den Modellergebnissen sind die Ballungsräume z. B. Ruhrgebiet, Frankfurt, Stuttgart, München, Hamburg und Berlin. Die Darstellung des kompletten Datensatzes zeigt daneben aber noch weitere Bereiche in denen relativ hohe Konzentrationen gemessen werden. Bei den ländlichen Stationen liegt das Niveau der Jahresmittelwerte erwartungsgemäß niedriger, während das Niveau der Modellergebnisse tendenziell eher bei den kompletten Datensatz liegt. Eine Auflistung der einzelnen Jahresmittelwerte findet sich für alle Stationen in Tabelle 3 und für die ländlichen Stationen in Tabelle 4.

Die Abb. 15 zeigt im Vergleich die Integration der Modellergebnisse in FLADIS. Der Erklärungswert beträgt beim kompletten Datensatz 9,4 % und bei den ländlichen Stationen 7,5 %. Dieser in beiden Fällen relativ geringe Erklärungswert zeigt sich auch darin, dass das Modell die Interpolation nicht erkennbar beeinflusst. Das Verhalten, dass an exemplarischen Einzelstunden in Kapitel 4.3 und in Kapitel 4.4 dargestellt wurde tritt, auf das ganze Jahr betrachtet, seltener auf.

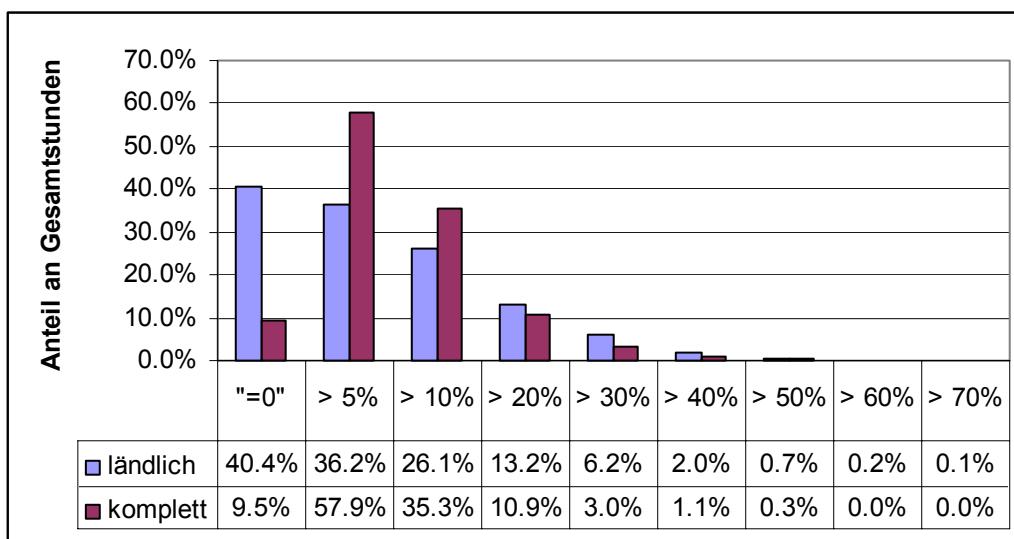


Abb. 13: Häufigkeit des Auftretens von bestimmten Erklärungswerten

Die Abb. 13 zeigt die Häufigkeit des Auftretens von Erklärungswerten mit bestimmter Größe im Vergleich zwischen dem kompletten Datensatz und der Berücksichtigung der ländlichen Stationen. Es ist deutlich, dass bei der Berücksichtigung der

ländlichen Stationen in mehr als 40 % der Fälle das Modell die gemessenen Werte überhaupt nicht erklärt.

In der Abb. 16 ist die Überschreitungshäufigkeit des Stundenmittelwertes gemäß der EU-Rahmenrichtlinie dargestellt. Im Gegensatz zur Darstellung in Abb. 14 wird deutlich, dass das Modell die Spitzenwerte nicht wiedergibt, obwohl es auch bei der Berücksichtigung der ländlichen Stationen zu mehr als 18 Überschreitungen von $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ kommt.

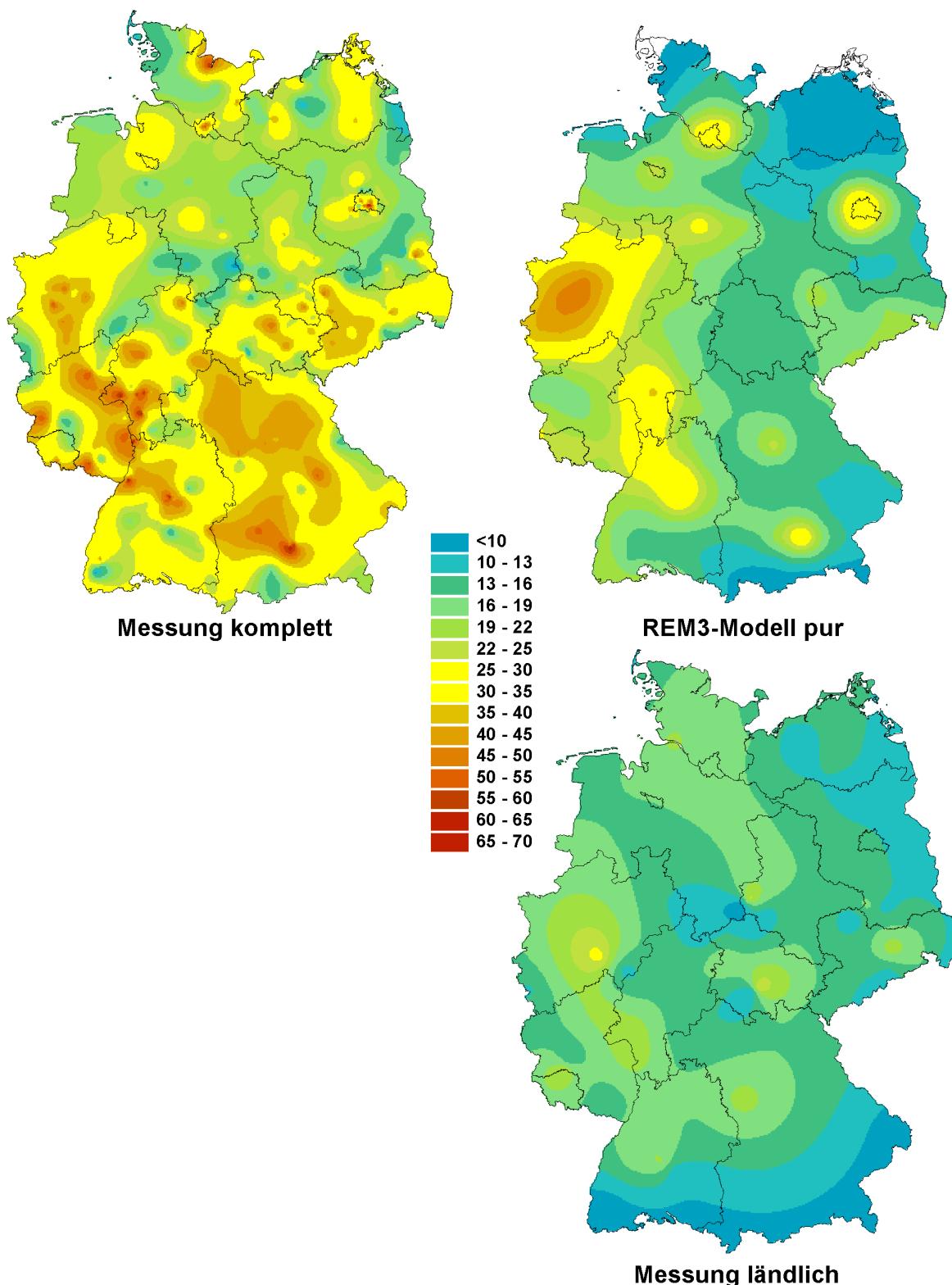


Abb. 14: Vergleich des Jahresmittelwerts NO_2 für 1997 für den kompletten Datensatz, die reinen REM3-Modelldaten und dem ländlichen Stationen (Werte in $\mu\text{g}/\text{m}^3$).

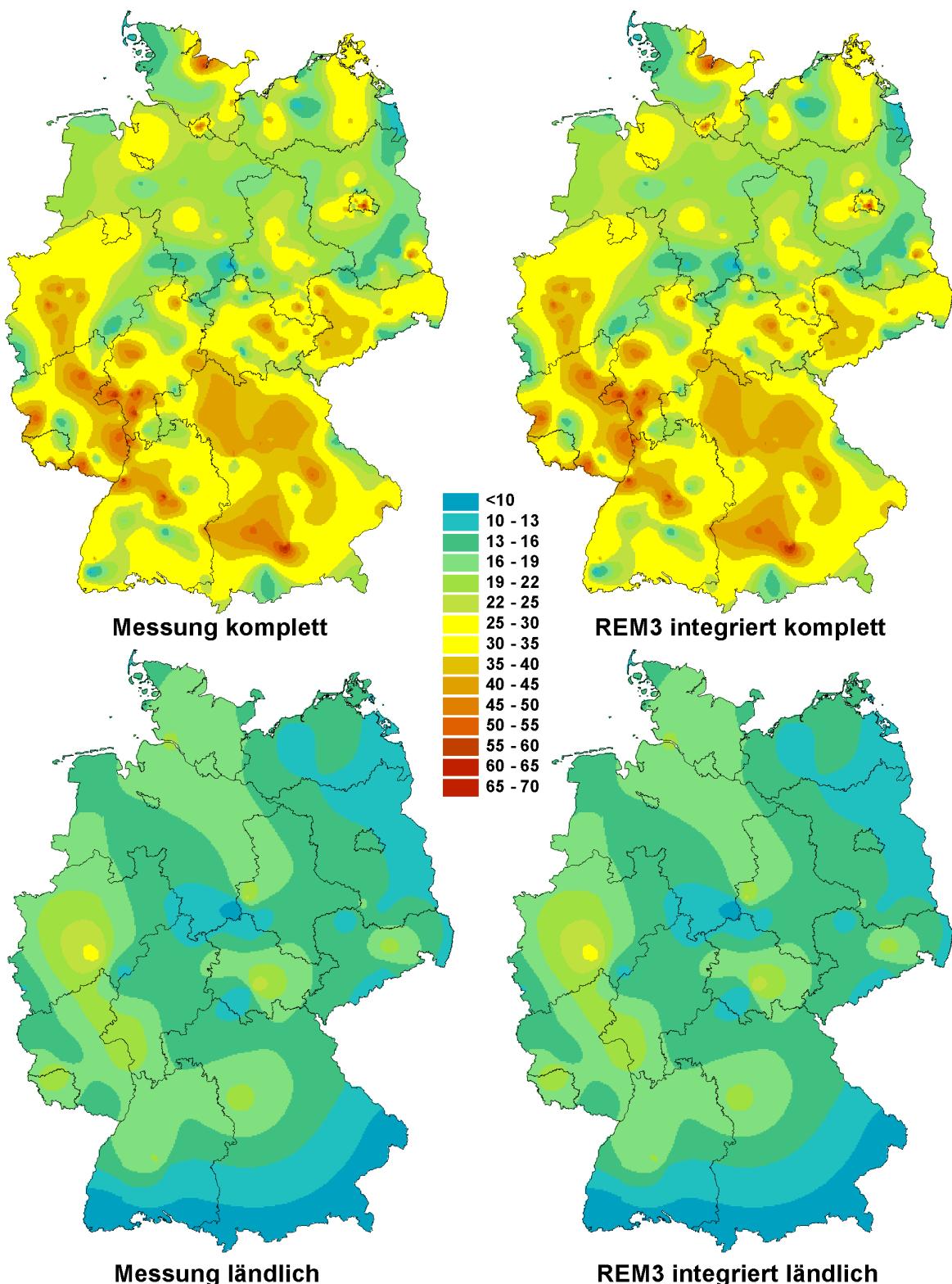


Abb. 15: Vergleich der Interpolation des Jahremittelwertes NO_2 1997 mit den integrierten Modellergebnissen für den kompletten Datensatz und den ländlichen Stationen (Werte in $\mu\text{g}/\text{m}^3$).

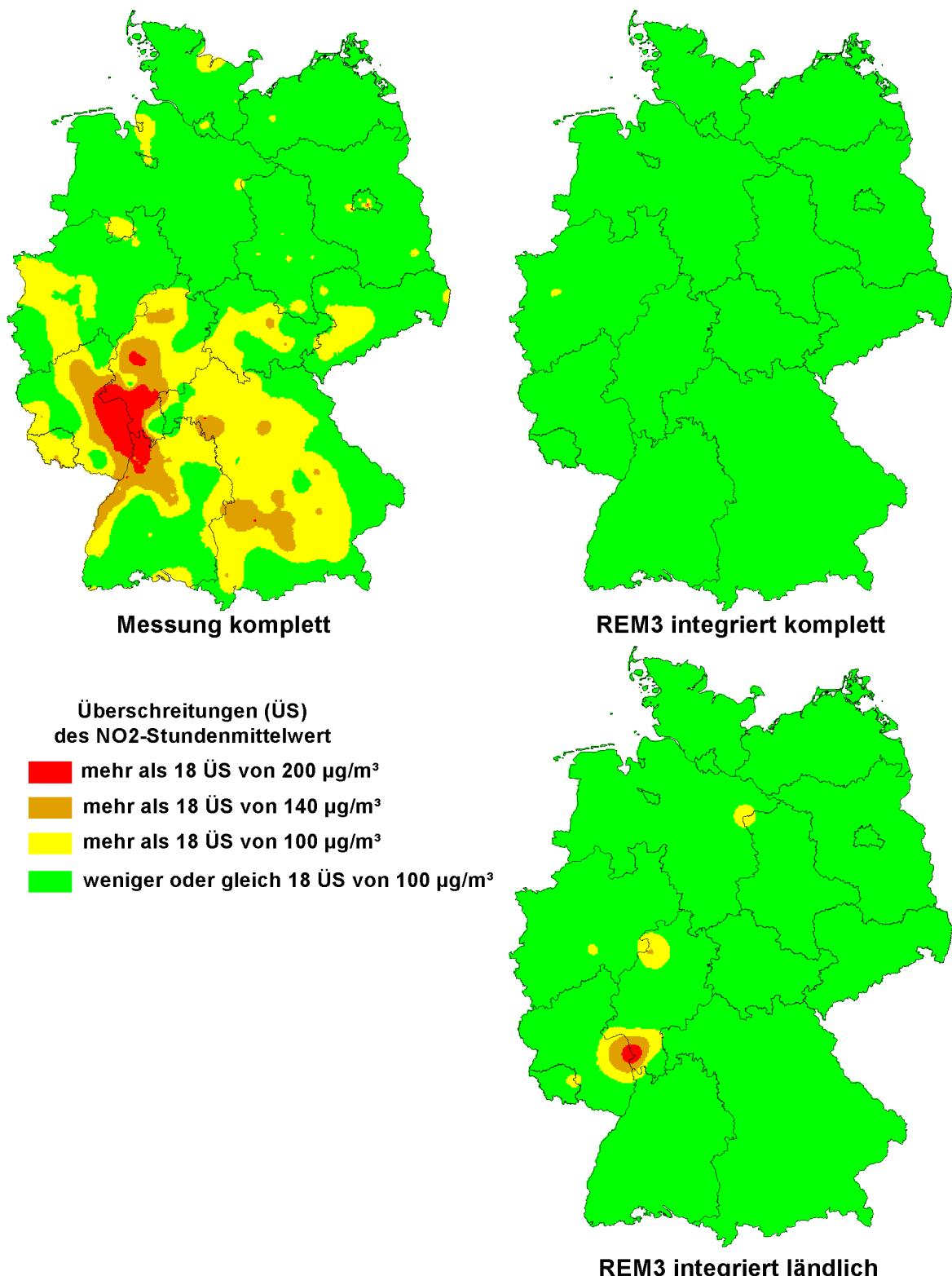


Abb. 16: Vergleich der Überschreitungshäufigkeiten des Stundenmittelwertes NO₂ in 1997 für den kompletten Datensatz, die reinen REM3-Modelldaten und die ländlichen Stationen.

5 Zusammenfassung

Die Auswahl der in der Interpolation verwendeten Stationen hat einen großen Einfluss auf die flächenhafte Darstellung der Immissionssituation. Deshalb ist es notwendig, eine plausible und relevante Charakterisierung der Mess-Stationen vorzunehmen. In der vorliegenden Untersuchung ist eine vorhandene Charakterisierung des Umweltbundesamtes verwendet worden, die nach unserer Auffassung einer Überarbeitung bedarf, insbesondere was die Unterscheidung in Stadt- und Landstationen betrifft. Die Auswahl der Stationen muss dann auch in dem Kontext mit der Fragestellung (Darstellung der Immissionssituation für ein Stadtquartier, einen Ballungsraum oder für ganz Deutschland) getroffen werden. Dies gilt auch für die Auflösung des verwendeten Ausbreitungsmodells.

Das REM3-Modell mit 30 km Auflösung kann die feinere Immissionsstruktur in Ballungsräumen nur begrenzt wiedergeben. Der Einsatz eines Modells für einzelne Ballungsgebiete und die Verwendung der Ergebnisse für eine flächenhafte Darstellung der Immissionssituation erfordert in solchen Gebieten eine Gitterauflösung im Kilometerbereich.

Da die Punktdichte des kompletten Datensatzes in Deutschland in den Ballungsgebieten sehr hoch ist, führt die Anforderung der Stützstellentreue dazu, dass die reine Mess-Interpolation das fertige Bild dominiert. Nur Strukturen in Bereichen in denen nicht gemessen wird, werden durch das Modell stärker beeinflusst. Die Verknüpfung von Messung und Modellrechnung bringt daher hauptsächlich in ländlichen Regionen zusätzliche Information in die Immissionsdarstellung.

6 Literatur

- [IVU96] Flächenhafte Darstellung der Immissionssituation. Umweltplanung, Arbeits- und Umweltschutz, Heft 201, Hessische Landesanstalt für Umwelt.
- [Abra91] Abramowski, S.; Müller, H.: Geometrisches Modellieren, BI Wissenschaftsverlag, 1991
- [Carl91] Carlson, R.E.; Foley, T.A.: The Parameter in multiquadratic interpolation; Comp. Math. Applic.; Vol.21, No.9, 1991
- [Fol87] Foley, T.A.: Interpolation and approximation of 3d and 4d scattered data; Comp. Math. Applic.; Vol.13, No.8, 1987
- [Fra80] Franke, R.; Nielson, G.: Smooth interpolation of large sets of scattered data; Inter. J. for Meth. in Eng.; Vol.8, No.4, 1980
- [Fra82a] Franke, R.: Smooth interpolation of scattered data by local thin plate splines, Comp. Math. Appl., Vol.8, No. 4, 1982
- [Fra82b] Franke, R.: Scattered data interpolation: Tests of some methods, Math. of Comp., Vol.18, No.157, 1982
- [Fra85] Franke, R.: Thin plat splines with tension; in Barnhill, R. E.; Böhm, W. (ed): Surface in CAGD '84; North Holland; 1985
- [Har90] Hardy, R.L.: Theory and application of the multiquadratic-biharmonic method, Comp. Math. Appl., Vol.19, No.8/9, 1990
- [Hos89] J.Hoschek, D. Lasser; Grundlagen der geometrischen Datenverarbeitung; B.G. Teubner Stuttgart 1989
- [Isaa89] Isaaks, H. E.; Mohan Srivastava, R.; An Introduction to Applied Geostatistics; Oxford University Press; 1989
- [She68] Shepard, D.: A two dimensional interpolation function for irregular spaced data; ACM National Conference; 1968

7 Anhang

Grafische Darstellung und Auflistung der in FLADIS berücksichtigten Stationen.

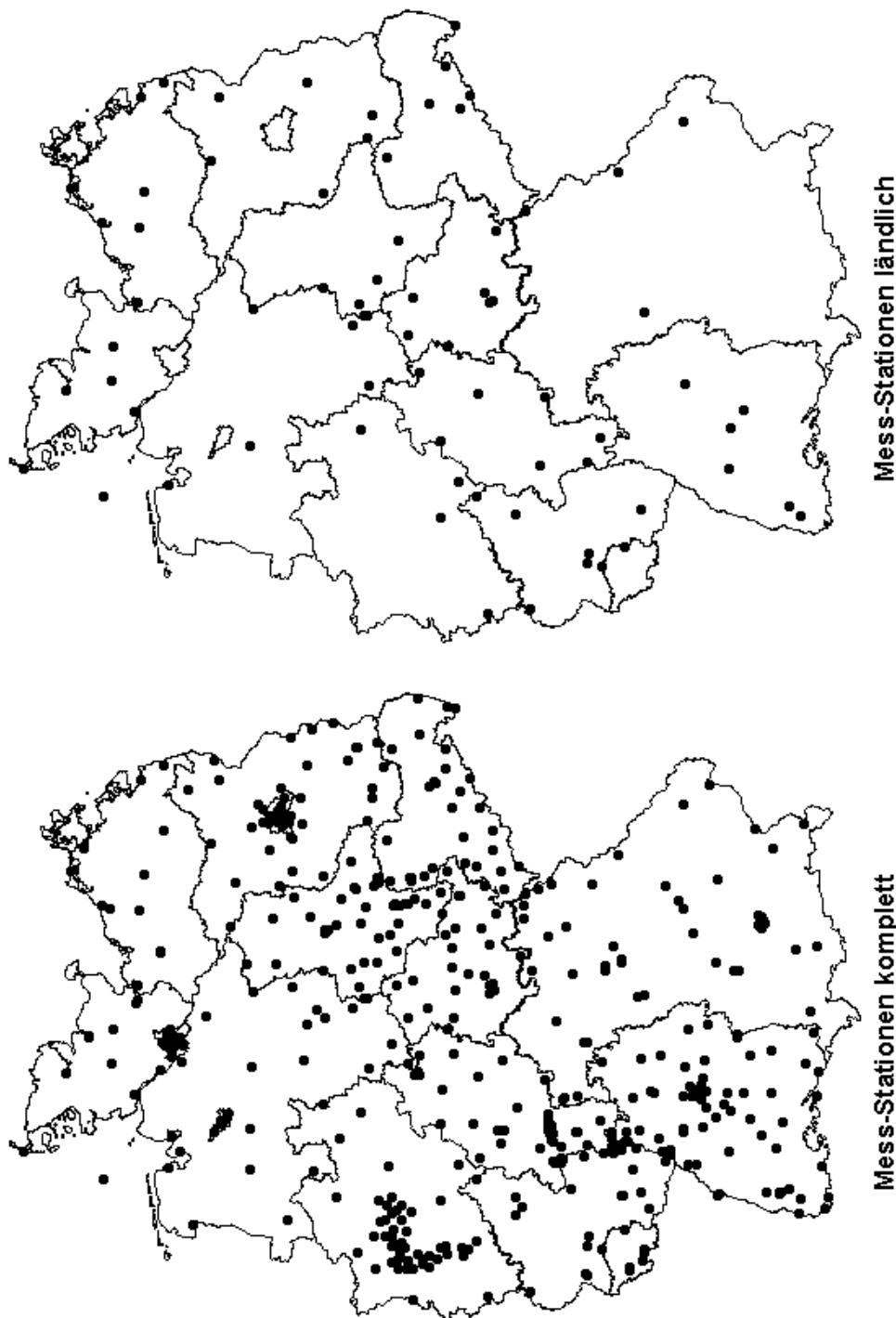


Abb. 17: Darstellung der in 1997 NO₂ messenden Stationen in Deutschland. Links der komplette Datensatz und rechts die Stationen, die als ländliche Stationen gekennzeichnet sind.

Tabelle 3: Auflistung der in 1997 verwendeten Mess-Stationen (Höhe in Meter, Anzwerte – Anzahl der berücksichtigten Messwerte je Station, Messung – Jahresmittelwert in $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Code	Name	Hoehe	Anzwerte	Messung
BB001	Burg Bahnhofstr.	54	8112	11.53
BB003	Brandenburg a.d. Havel	33	7754	28.85
BB006	Cottbus-Süd	76	7987	17.58
BB008	Finsterwalde	107	8132	26.79
BB010	Guben	46	7576	16.73
BB012	Herzberg	80	7095	16.53
BB016	Ludwigsfelde	41	7940	25.66
BB018	Oranienburg Bernauer Str.	35	8496	31.16
BB020	Potsdam-Hermannswerder	32	5743	17.68
BB021	Potsdam-Zentrum	31	6861	28.49
BB024	Senftenberg	103	8231	19.43
BB026	Spremberg-Süd	100	7917	15.86
BB028	Wittenberge	22	6919	18.41
BB029	Schwedt/Oder	10	8477	17.87
BB030	Premnitz	30	7999	17.22
BB031	Königs Wusterhausen	48	7828	24.53
BB032	Eisenhüttenstadt	40	8471	17.06
BB037	Rüdersdorf	60	7917	23.55
BB038	Prenzlau	30	6664	15.24
BB039	Bernau	80	6834	23.86
BB040	Nauen	32	6829	17.54
BB042	Frankfurt/Oder	45	5646	16.55
BB044	Cottbus, Bahnhofstr. 55	70	7642	60.59
BB046	Potsdam, Hans-Thoma-Str.	31	7323	48.67
BB047	Potsdam, Zeppelinstr.	31	7382	39.25
BE005	Tegel-Buddestraße	35	8736	27.37
BE010	Wedding-Amrumer Straße	35	8448	30.47
BE011	Wedding/Prenzl.B.-Beh	45	8242	25.87
BE014	Charlottenburg-Lerschpfad	50	8664	49.72
BE015	Tiergarten-Bachstraße	35	8633	30.14
BE017	Schmargendorf-Lentzeallee	50	6609	21.3
BE018	Schöneberg-Belziger Straße	40	8280	34.53
BE026	Lichterfelde-Wupperstr.	40	6692	23.48
BE027	Marienfelde-Schichauweg	45	8628	18.58
BE032	Grunewald (45m)	50	8181	14.48
BE034	Neukölln-Nansenstraße	35	8561	29.84
BE037	Frohnau, Funkturm (324 m)	50	8364	10.69
BE044	Mitte-Parochialstr.	35	8415	36.1
BE045	Pankow-Blankenfelder	45	4467	28.86
BE051	Buch	60	8702	15.95
BE056	Friedrichshagen	35	8638	17.23
BE057	Karlshorst	35	8649	33
BE061	Steglitz Schildhornstr.	45	8698	54.55
BE062	Frohnau	50	8666	18.23
BE063	Silbersteinstraße	40	7418	78.32
BE064	Karl-Marx-Straße	40	8760	53.48
BE065	Frankfurter Allee	40	8601	49.02
BW001	Karlsruhe-Mitte	115	8666	52.04
BW002	Karlsruhe-West	115	8549	44.32
BW004	Eggenstein	110	8553	28.06
BW005	Mannheim-Nord	95	8494	43.17
BW006	Mannheim-Mitte	95	8718	50.02
BW007	Mannheim-Süd	95	8421	48.28
BW008	Weinheim	101	8693	34.04
BW009	Heidelberg	110	8498	43.17
BW010	Wiesloch	160	8644	29.56
BW011	Stuttgart-Zuffenhausen	260	8741	50.97
BW012	Stuttgart-Mitte	260	8649	48.24
BW013	Stuttgart Bad Cannstatt	235	8704	46.16

Code	Name	Hoehe	Anzwerte	Messung
BW014	Stuttgart-Hafen	235	8738	43.34
BW015	Heilbronn	152	8671	38.37
BW016	Neckarsulm	160	8760	40.18
BW019	Ulm	480	8636	35.76
BW020	Rastatt	120	8625	41.88
BW021	Kehl-Süd	137	8730	34.86
BW022	Kehl-Hafen	135	8736	39.59
BW023	Weil a. Rhein	275	8591	30.92
BW024	Ludwigsburg	300	8494	42
BW025	Esslingen	240	8688	46.44
BW026	Plochingen	250	8625	48.42
BW027	Reutlingen	385	8576	36.35
BW028	Göppingen	318	8578	32.89
BW029	Aalen	420	8678	30.33
BW030	Welzheimer Wald	500	8658	15.31
BW031	Schwarzwald Süd	920	8371	7.34
BW032	Pforzheim-Mitte	250	8760	38.95
BW033	Pforzheim-West	260	8727	36.52
BW034	Waiblingen	275	8741	41.83
BW035	Böblingen	445	8760	35.48
BW036	Tübingen	330	8743	37.35
BW037	Freudenstadt	750	8657	17.86
BW038	Friedrichshafen	402	8726	32.72
BW039	Villingen Schwenningen	705	8683	23.68
BW040	Waldshut	340	8734	25.38
BW041	Rheinfelden	285	8680	35.04
BW042	Bernhausen	370	8699	44.8
BW044	Mosbach	147	8696	30.01
BW045	Balingen	520	8741	32.19
BW046	Biberach	560	8680	21.6
BW047	Calw	332	8753	24.19
BW048	Ehingen	530	8760	22.94
BW049	Emmendingen	200	8697	33.66
BW050	Heidenheim	480	8759	29.45
BW052	Konstanz	400	8456	31.51
BW053	Künzelsau	214	8760	25.07
BW054	Rottweil	660	8545	28.48
BW056	Schwäbisch Hall	300	8752	27.16
BW057	Sigmaringen	580	8376	29.77
BW059	Tauberbischofsheim	117	8704	21.61
BW060	Tuttlingen	643	8760	28.65
BW065	Ravensburg	435	8517	30.8
BW072	Bruchsal	113	8733	43.18
BW073	Neuenburg	227	8642	30.77
BW076	Baden-Baden	150	8759	29.3
BW080	Karlsruhe Straße	115	8327	71.18
BW081	Karlsruhe-Nordwest	110	8638	41.29
BW083	Freiburg-Nord	260	8674	32.5
BW084	Freiburg-Mitte	240	8742	26.78
BW087	Schwäbische Alb (Erpfingen)	799	8706	11.27
BW093	Brühl	100	8754	38.94
BW094	Isny	695	8732	21.74
BW095	Herrenberg	425	8760	30.1
BW096	Ulm-Straße	490	8448	50.8
BW097	Freiburg-Straße	260	8736	58.98
BW098	Mannheim-Straße	95	8620	71.87
BW099	Stuttgart-Mitte-Straße	245	8696	75.89
BW100	Stuttgart-Vaihingen-Straße	410	8650	53.54
BY001	Ansbach	402	8630	46.74
BY002	Arzberg	480	8666	27.48
BY003	Aschaffenburg/Krankenhaus	140	8523	39.98
BY004	Kleinwallstadt	120	8560	23.49

Code	Name	Hoehe	Anzwerte	Messung
BY005	Aschaffenburg/Bussardweg	130	8760	40.41
BY006	Augsburg/Königsplatz	460	8461	53.36
BY007	Augsburg/Bourges-Platz	470	8506	41.26
BY009	Bamberg	270	8721	35.23
BY010	Bayreuth	370	8662	44.58
BY012	Burghausen	400	8588	25.47
BY014	Coburg	290	8753	37.27
BY015	Erlangen/Werner-von-Siemens-Str.	280	8737	43.32
BY017	Erlangen/Häusling	300	8741	37.19
BY020	Hof	520	8737	29.65
BY021	Ingolstadt/Rechbergstr.	450	8700	40.59
BY028	Kelheim/Regensburger Str.	350	8640	27.4
BY031	Kempten (Allgäu)	680	8443	35.49
BY032	Kulmbach	306	8436	33.09
BY033	Landshut/Podewilsstr.	390	8702	39.14
BY034	Lauf a.d.Pegnitz	320	8580	39.41
BY037	München/Stachus	520	8657	56.55
BY038	München/Effnerplatz	530	8760	55.36
BY039	München/Lothstraße	520	8760	49.46
BY040	München/Pasing	530	8584	54.09
BY043	München/Moosach	510	8760	43.35
BY045	München/Westendstr.	530	8746	43.67
BY047	Naila	540	5531	18.55
BY049	Neustadt a.d.Donau/Eining	370	8466	19.08
BY052	Neu-Ulm	470	8263	43.5
BY053	Nürnberg/W.-Brandt-Platz	305	8760	45.7
BY055	Nürnberg/Olgastr.	320	8760	41.79
BY056	Fürth/Theresienstr.	280	8760	44.03
BY059	Nürnberg/Langwasser	320	8760	44.93
BY061	Passau	310	8742	38.98
BY063	Regensburg/Rathaus	336	8760	51.54
BY068	Schweinfurt	230	8727	43.36
BY069	Selb	540	8760	25.42
BY072	Tiefenbach	750	8476	13.66
BY075	Weiden i.d.OPf.	400	8594	39.66
BY076	Würzburg/Kardinal-Faulhaber-Platz	180	8301	44.3
BY078	Würzburg/Theodor-Heuss-Damm	180	8760	43.95
BY079	Bad Reichenhall	470	8760	19.84
BY085	München/Luise-Kiesselbach-Platz	550	8618	64.93
BY088	Trostberg	490	8760	27.7
BY089	München/Johanneskirchen	510	8731	31.68
BY092	Weilheim i.OB	560	8580	15.71
HB001	Bremen-Mitte	10	8547	34.84
HB002	Bremen-Ost	7	5580	22.33
HB003	Bremen-West	6	8330	34.96
HB004	Bremen-Nord	20	8731	29.83
HB005	Bremerhaven	3	8150	31.48
HE001	Darmstadt	140	8626	36.54
HE002	Biebesheim	90	731	82.48
HE003	Frankfurt-Bockenheim	98	8753	50.04
HE004	Frankfurt-Griesheim	95	8256	54.48
HE005	Frankfurt-Höchst	100	8722	57.52
HE007	Frankfurt-Niederrad	97	8712	54.1
HE008	Frankfurt-Ost	101	8760	51.52
HE009	Frankfurt-Sindlingen	96	8738	45.32
HE010	Gießen	150	8730	48.39
HE011	Hanau	110	8734	44.55
HE012	Kassel-Bettenhausen	143	8630	36.81
HE014	Kassel-Nord	167	7934	36.93
HE015	Maintal	102	8760	38.54
HE016	Mainz-Kastel	86	8748	46.03
HE017	Offenbach	105	8687	43.55

Code	Name	Hoehe	Anzwerte	Messung
HE018	Rauhheim	91	8760	45.25
HE019	Vierneim	99	8703	41.79
HE020	Wetzlar	154	8476	45.36
HE021	Wiesbaden-Mitte	115	1832	70.34
HE022	Wiesbaden-Süd	130	8747	46.55
HE023	Gebenau	373	8566	15.49
HE024	Witzenhausen/Wald	608	7692	10.64
HE025	Königstein	523	8471	20.34
HE026	Spessart	488	8468	13.27
HE027	Frankenberg	395	8507	15.48
HE028	Fürth/Odenwald	483	8568	16.81
HE029	Dillenburg	225	8751	44.31
HE030	Marburg	118	8760	31.59
HE031	Fulda	310	8740	44.6
HE032	Bebra	225	8302	27.86
HE033	Borken	225	8107	22.98
HE034	Nidda	194	8743	26.24
HE035	Kassel-Süd	152	8611	49.61
HE036	Frankfurt-Höhenstraße	102	8760	53.6
HE037	Wiesbaden-Ringkirche	120	8747	66.96
HE040	Darmstadt-Hügelstraße	140	8731	64.33
HE041	Frankfurt-Friedb.Ldstr.	100	8760	65.74
HE042	Linden/Leihgestern	172	8760	30.02
HE043	Riedstadt	90	8082	31.32
HH002	Lokstedt	11	8665	34.09
HH005	Rahlstedt	24	8647	27.84
HH006	Hochkamp	30	2144	32.43
HH007	Bahrenfeld	22	8565	40.03
HH008	Sternschanze	15	8615	35.94
HH009	Lübecker Straße	14	8036	39.15
HH014	Steinwerder	8	8741	39.13
HH015	Veddel	5	8528	43.7
HH016	Billbrook	5	8113	32.7
HH020	Kirchdorf	1	8760	31.57
HH021	Tatenberg	2	8576	20.09
HH022	Göhlbachtal	16	8601	23.5
HH026	Straße3-Stresemannstr	20	8639	59.01
HH030	Blankenese	20	6526	25.84
HH038	Flughafen Südwest	8	2241	28.03
HH040	Straße-Theodor-Heuss-Platz	9	8702	60.32
HH041	Straße-Simon-von-Utrecht-Straße	15	3894	52.56
HH042	Straße-Tarpenbekstraße	8	8754	47.34
HH043	Straße-Bremer Straße	14	7945	36.39
HH044	Straße-Barner Straße	29	7922	47.64
HH045	Straße-Nordschleswiger Straße	13	6395	52.69
HH046	Flughafen Nordost	15	5044	23.9
HH048	Max-Brauer-Allee	25	3651	62.37
MV001	Selmsdorf	63	8673	16.09
MV002	Rostock-Holbeinpl.	10	8635	31.55
MV003	Neubrandenburg	15	8588	37.25
MV004	Güstrow-Gützow	17	8670	10.01
MV005	Schwerin	42	8671	43.02
MV006	Stralsund	15	8715	35.72
MV007	Rostock-Stuhof	5	8753	13.88
MV012	Löcknitz/Mewegen	21	8307	10.5
NI011	Braunschweig/Broitzem	98	8398	20.6
NI014	Büddenstedt/Reinsdorf	130	8715	17.4
NI015	Salzgitter/Lebenstedt	94	8702	27.27
NI016	Oker-Mitte Bei der Eiche	220	8675	13.92
NI019	Solling/Dassel	500	8618	11.73
NI020	Wolfsburg	60	8343	21.88
NI021	Hann. Münden	195	8560	27.72

Code	Name	Hoehe	Anzwerte	Messung
NI028	Duderstadt	185	8239	16.99
NI029	Emden	1	8759	21.99
NI031	Wilhelmshaven/Voslapp	2	8760	16.07
NI036	Nordenham	2	8521	23.34
NI038	Osnabrück	95	8551	28.34
NI039	Buxtehude	2	8593	23.08
NI040	Lüneburg	13	8669	24.76
NI041	Rinteln	58	8095	21.65
NI042	Göttingen	165	8604	22.01
NI043	Lingen	30	8736	19.16
NI051	Wurmberg/Braunlage	992	8343	6.85
NI052	Walsrode	50	8760	18.52
NI053	Cloppenburg	42	7606	22
NI054	Hannover/Linden	95	8733	30.52
NW001	Werne	64	8461	28.78
NW002	Datteln	80	8296	30.42
NW004	Ickern	60	7836	36.82
NW006	Niederaden	58	8193	34.62
NW008	Dortmund2	75	8309	39.6
NW010	Unna	72	7933	31.13
NW011	Hörde Dortmund-	110	7976	37.88
NW012	Witten	105	8364	35.61
NW013	Schwerte	118	8102	35.06
NW015	Sickingmühle	42	8411	33.24
NW018	Herten	102	8152	33.68
NW021	Bottrop	40	8245	40.12
NW022	Gelsenkirchen	40	8137	39.5
NW023	Herne	70	8614	39.26
NW024	Vogelheim Essen-	47	8427	41.59
NW028	LIS-Essen (Bredeney) LUA Essen	153	8312	38.81
NW029	Hattingen	93	8417	30.41
NW030	Wesel	25	8115	30.17
NW034	Walsum Duisburg-	28	7836	37.76
NW036	Meerbeck	28	8020	35.64
NW037	Meiderich Duisburg-	30	8458	41.51
NW038	Styrum	37	8466	42.76
NW039	Kaldenhausen Duisburg-	30	8208	33.61
NW040	Buchholz Duisburg-	30	7707	37.26
NW042	Krefeld	32	8260	37.94
NW043	Essen-Ost (Verkehr)	100	8384	51.77
NW045	Ratingen	63	8652	37.63
NW047	Neuss	40	8196	38.25
NW048	Reisholz Düsseld.	40	8132	45.42
NW050	Dormagen	44	8554	39.01
NW051	Langenfeld	65	8624	36.71
NW053	Chorweiler Köln-	45	8417	39.09
NW054	Leverkusen	45	8427	46.87
NW058	Hürth	90	8289	33.86
NW059	Rodenkirchen Köln-	45	8491	39.46
NW060	Wesseling	58	8461	39.47
NW062	Bonn	57	8175	41.19
NW063	Eggegebirge	450	8075	13.19
NW064	Eifel	572	8532	12.24
NW065	Rothaargebirge	635	8235	11.35
NW066	Nettetal	49	7913	30.57
NW067	Bielefeld	102	8431	29.77
NW068	Soest	110	7817	24.83
NW071	Lörick Düsseld.-	32	8325	38.87
NW072	Mörsenbroich Düsseld.-	38	7508	60.56
NW073	Borken	42	7980	27.63
NW077	Hagen	145	8496	46.49
RP001	Ludwh.-Oppau	91	8741	42.27

Code	Name	Hohe	Anzwerte	Messung
RP002	Ludwh.-Mitte	93	8625	53.28
RP003	Ludwh.-Mundenheim	98	8461	47.62
RP006	Ludwh.-Pfalzgrafenpl.	94	8722	54.32
RP007	Mainz-Mombach	120	8658	42.93
RP008	Mainz-Goetheplatz	85	8689	47.63
RP009	Mainz-Zitadelle	110	8730	47.59
RP010	Mainz-Parcusstraße	85	8655	72
RP011	Mainz-Rheinallee	85	8577	59.21
RP012	Mainz-Stadthausstraße	85	8739	63.38
RP013	Westpfalz-Waldmohr	455	8396	17.7
RP014	Hunsrück-Leisel Idar	650	8686	14.87
RP015	Westeifel Wascheid (Prüm)	680	8728	14.23
RP016	Westerwald-Herford	480	8245	15.63
RP017	Pfälzer Wald-W. (Merza)	606	8535	13.03
RP018	Speyer St. G. Stifts.	110	8595	49.07
RP019	Kaiserslautern Rathausplatz	232	8387	37.29
RP020	Trier Ostallee	140	8600	50.63
RP021	Neuwied Hafenstraße	65	8670	42.45
RP022	Bad Kreuznach	108	8668	40.83
RP023	Worms Hagenstraße	90	8171	50.17
RP024	Koblenz F.-Ebert-Ring	68	8732	52.53
RP025	Wörth Marktplatz	104	8617	34.36
RP026	Frankenthal-Europaring	95	8667	55.6
RP027	Neustadt Strohmarkt	138	8340	43.9
RP028	Westerwald-Neuhäusel	540	8220	20.62
RP029	Koblenz Zentralplatz	68	8749	54.27
RP030	Trier Th.-Heuss-Allee	140	8371	57.46
RP031	Pirmasens Park-Brauerei	355	8730	56.23
RP032	Neuwied Heddersdorfer Str.	65	8125	48.23
RP033	Kaiserslautern Eisenbahnstr.	230	5687	40.8
SH001	Altendeich	1	8662	24.39
SH005	Lübeck-Schönböcken	16	8743	27.27
SH006	Schleswig	42	8760	17.93
SH007	Kiel-Schützenwall Verk.	17	8702	46.62
SH008	Bornhöved	45	8732	16.52
SH010	Lübeck-Lindenplatz Verk.	7	8664	46.54
SH011	Brunsbüttel	1	8704	19.82
SH016	Barsbüttel	42	8695	26.68
SH019	Kiel-Westring Verk.	25	8751	61.18
SL003	Dillingen City	185	8159	28.78
SL004	Diefflen(bach)	190	8036	28.73
SL008	Nonnweiler	440	8394	22.59
SL011	Saarbrücken-Eschberg	300	8478	29.19
SL012	Saarbrücken-City	187	8696	49.85
SL017	Völklingen-City Stadionstr.	190	8491	32.3
SN001	Annaberg-Buchholz	545	8604	35.5
SN002	Aue	348	8673	36.8
SN004	Bautzen	203	8641	35.44
SN005	Böhlen	130	8470	26.98
SN006	Borna	145	8467	42.5
SN011	Chemnitz-Mitte	300	8081	32.41
SN012	Delitzsch	100	8345	31.96
SN014	Dresden-Mitte	112	8281	34.42
SN017	Freiberg	393	8527	40.72
SN019	Glauchau	233	8464	38.18
SN020	Görlitz	210	7470	34.86
SN024	Klingenthal	540	8411	23.52
SN025	Leipzig-Mitte	110	8051	53.48
SN028	Leipzig-Süd	120	8164	33.09
SN034	Olbernhau	448	8707	33.68
SN036	Pirna	118	5387	31.07
SN038	Plauen	335	8499	27.48

Code	Name	Hoehe	Anzwerte	Messung
SN045	Zittau-Ost	230	8446	21.05
SN047	Zwickau	265	8551	41.4
SN048	Auerbach	459	8514	36.5
SN050	Hoyerswerda	117	8280	24.38
SN051	Radebeul-Wahnsdorf	246	7815	21.4
SN052	Zinnwald	877	6742	13.09
SN057	Mittelndorf	323	8159	16.86
SN059	Leipzig-West	115	8643	28.24
SN061	Dresden-Nord	112	8231	46.94
ST002	Burg	40	8604	20.4
ST005	Magdeburg/Zentrum	50	8646	30.42
ST006	Magdeburg/Zentrum-Ost	50	8638	29.99
ST011	Wernigerode	230	8475	23.39
ST014	Bitterfeld-Zentrum	80	8625	20.78
ST015	Grenzen	90	8620	17.69
ST016	Wolfen/Zentrum	85	8716	20.35
ST022	Halle/Zentrum	100	8662	27.25
ST025	Merseburg	100	8293	25.16
ST028	Zeitz	160	8617	22.09
ST029	Bernburg	60	8637	35.24
ST030	Dessau	60	8425	19.42
ST031	Bad Dürrenberg	100	8577	21.38
ST032	Genthin	40	8648	17.2
ST033	Köthen	80	8561	21.17
ST034	Quedlinburg	120	8590	19.37
ST036	Zerbst	65	8352	22.92
ST039	Brocken	1142	48	3.25
ST042	Eisleben	150	8445	20.32
ST044	Halberstadt	110	8502	21.79
ST050	Halle/Nord	120	8544	25.53
ST052	Hettstedt	160	8328	20.74
ST057	Magdeburg/Südost	51	8136	25.22
ST061	Schönebeck	50	8612	22.42
ST063	Stendal	35	8553	24.37
ST066	Wittenberg	80	7754	22.11
ST068	Pouch	80	8743	18.27
ST069	Salzwedel	20	8513	15.9
ST070	Harzgerode	385	8645	11.21
ST071	Sangerhausen	150	8444	20.33
ST072	Halle/Ost	100	8481	21.83
ST073	Dessau/Verkehr	60	8416	39.42
ST074	Halle/Südwest	100	8682	21.14
ST075	Halle/Verkehr	100	8704	44.07
ST076	Magdeburg/Verkehr	50	8587	51.9
ST077	Magdeburg/West	50	8505	31.52
ST078	Naumburg	130	8572	24.25
ST080	Schkopau	100	8616	25.51
ST081	Weissenfels/Verkehr	120	7990	50.58
ST082	Amsdorf	80	8631	15.42
ST089	Zartau/Waldstation	100	612	15.14
TH002	Gera Berliner Str.	200	8751	38.46
TH005	Saalfeld	210	8753	26.24
TH008	Pößneck	215	8562	46.21
TH009	Gera Friedericistr.	190	8702	36.34
TH011	Altenburg Theaterplatz	185	8571	30.84
TH013	Eisenach	210	8261	30.48
TH016	Arnstadt Alter Friedhof	275	8760	23.32
TH017	Apolda Busbahnhof	165	8725	27.85
TH018	Nordhausen	185	8721	33.18
TH020	Erfurt Krämpferstr.	190	8612	39.17
TH021	Mühlhausen Brunnenstr.	205	8683	28.6
TH024	Ilmenau	480	8711	24.76

Code	Name	Hoehe	Anzwerte	Messung
TH029	Sonneberg	380	8228	23.83
TH030	Zella-Mehlis	470	8502	20.06
TH031	Suhl	430	8655	37.54
TH032	Gotha Gartenstr.	290	8437	35.67
TH036	Greiz Mollbergstr.	270	8717	27.47
TH039	Weimar Sophienstiftsplatz	220	8715	50.43
TH040	Großer Eisenberg	907	8643	10.42
TH041	Jena Dammstr.	140	8651	24.59
TH042	Possen	420	8634	12.09
UB001	Westerland	12	7242	12.53
UB002	Deuselbach	480	8760	14.08
UB003	Brotjacklriegel	1016	4369	7.73
UB004	Schauinsland	1205	4971	6.2
UB005	Waldhof	74	6733	17.86
UB006	Hohenwestedt	75	8044	15.15
UB007	Bassum	52	8659	15.06
UB009	Meinerzhagen	510	8585	26.91
UB012	Rottenburg	427	7510	21
UB013	Ansbach	481	8760	20.47
UB016	Gittrup	43	7983	32.45
UB017	Regnitzlosau	595	5314	11.64
UB018	Herleshausen	380	8760	18.99
UB019	Schleiz	501	8246	17.5
UB020	Schwerin	59	8737	15.56
UB021	Wiesenburg	107	4407	18.14
UB022	Angermünde	56	6814	13.13
UB023	Doberlug	97	8610	11.7
UB024	Kyritz	40	8250	17.56
UB025	Lindenberg	98	7777	12.52
UB026	Ueckermünde	1	8042	11.08
UB027	Teterow	46	8696	15.16
UB028	Zingst	1	6567	12.78
UB029	Schmücke	937	6160	12.79
UB030	Neuglobsow	65	3367	9.05
UB031	Lückendorf	490	7010	9.64
UB032	Leinefelde	356	7913	13.39
UB033	Melpitz	86	7964	10.12
UB034	Helgoland	50	8737	12.86
UB035	Lehmühle	527	7592	11.79
UB036	Murnauer Moos	622	5649	11.05

Tabelle 4: Auflistung der in 1997 verwendeten ländlichen Mess-Stationen (Höhe in Meter, Anzwerte – Anzahl der berücksichtigten Messwerte je Station, Messung – Jahresmittelwert in $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Code	Name	Hoehe	Anzwerte	Messung
BB012	Herzberg	80	7095	16.53
BW030	Welzheimer Wald	500	8658	15.31
BW031	Schwarzwald Süd	920	8371	7.34
BW037	Freudenstadt	750	8657	17.86
BW087	Schwäbische Alb (Erpfingen)	799	8706	11.27
BY072	Tiefenbach	750	8476	13.66
HE002	Biebesheim	90	731	82.48
HE023	Grebennau	373	8566	15.49
HE024	Witzenhausen/Wald	608	7692	10.64
HE025	Königstein	523	8471	20.34
HE026	Spessart	488	8468	13.27
HE027	Frankenberg	395	8507	15.48
HE028	Fürth/Odenwald	483	8568	16.81
MV001	Selmsdorf	63	8673	16.09

Code	Name	Hoehe	Anzwerte	Messung
MV004	Güstrow-Gützow	17	8670	10.01
MV007	Rostock-Stuthof	5	8753	13.88
MV012	Löcknitz/Mewegen	21	8307	10.5
NI014	Büddenstedt/Reinsdorf	130	8715	17.4
NI016	Oker-Mitte Bei der Eiche	220	8675	13.92
NI019	Solling/Dassel	500	8618	11.73
NI031	Wilhelmshaven/Voslapp	2	8760	16.07
NI051	Wurmberg/Braunlage	992	8343	6.85
NW063	Eggegebirge	450	8075	13.19
NW064	Eifel	572	8532	12.24
NW065	Rothaargebirge	635	8235	11.35
RP013	Westpfalz-Waldmohr	455	8396	17.7
RP014	Hunsrück-Leisel Idar	650	8686	14.87
RP015	Westeifel Wascheid (Prüm)	680	8728	14.23
RP016	Westerwald-Herdorf	480	8245	15.63
RP017	Pfälzer Wald-W. (Merza)	606	8535	13.03
RP028	Westerwald-Neuhäusel	540	8220	20.62
SH006	Schleswig	42	8760	17.93
SH008	Bornhöved	45	8732	16.52
SH011	Brunsbüttel	1	8704	19.82
SL008	Nonnweiler	440	8394	22.59
SN051	Radebeul-Wahnsdorf	246	7815	21.4
SN052	Zinnwald	877	6742	13.09
SN057	Mittelndorf	323	8159	16.86
ST011	Wernigerode	230	8475	23.39
ST039	Brocken	1142	48	3.25
ST070	Harzgerode	385	8645	11.21
ST082	Amsdorf	80	8631	15.42
TH024	Ilmenau	480	8711	24.76
TH040	Großer Eisenberg	907	8643	10.42
TH042	Possen	420	8634	12.09
UB001	Westerland	12	7242	12.53
UB002	Deuselbach	480	8760	14.08
UB003	Brotjackriegel	1016	4369	7.73
UB004	Schauiinsland	1205	4971	6.2
UB005	Waldhof	74	6733	17.86
UB006	Hohenwestedt	75	8044	15.15
UB007	Bassum	52	8659	15.06
UB009	Meinerzhagen	510	8585	26.91
UB012	Rottenburg	427	7510	21
UB013	Ansbach	481	8760	20.47
UB017	Regnitzlosau	595	5314	11.64
UB018	Herleshausen	380	8760	18.99
UB019	Schleiz	501	8246	17.5
UB021	Wiesenburg	107	4407	18.14
UB022	Angermünde	56	6814	13.13
UB023	Doberlug	97	8610	11.7
UB025	Lindenberg	98	7777	12.52
UB026	Ueckermünde	1	8042	11.08
UB027	Teterow	46	8696	15.16
UB028	Zingst	1	6567	12.78
UB029	Schmücke	937	6160	12.79
UB030	Neuglobsow	65	3367	9.05
UB031	Lückendorf	490	7010	9.64
UB032	Leinefelde	356	7913	13.39
UB033	Melpitz	86	7964	10.12
UB034	Helgoland	50	8737	12.86
UB035	Lehnsmühle	527	7592	11.79