

Atmosphärische Deposition von Cadmium in landwirtschaftliche Nutzflächen in Deutschland

Ulrich Dämmgen, Manfred Lüttich und Cornelia Scholz-Seidel¹⁾

Zusammenfassung

Cadmium ist für praktisch alle Lebewesen giftig. In der Landwirtschaft beeinflussen die Cadmium-Konzentrationen in Böden den Cadmium-Übergang in die Pflanzen und damit in die menschliche Nahrungskette. Darüber hinaus beeinflussen diese Konzentrationen die mikrobiellen Lebensgemeinschaften und die Mesofauna im Boden nachteilig. Die detaillierte Kenntnis der Glieder der Cadmium-Bilanz landwirtschaftlicher Böden wird deshalb zur Voraussetzung für eine Abschätzung der möglichen und zukünftigen Belastungen der menschlichen Gesundheit über die Nahrungskette und der Lebensgemeinschaften in Böden.

Ein wichtiges Glied dieser Bilanz sind die Cadmium-Einträge (Depositionen) aus der Atmosphäre, die aus sedimentierenden Stäuben, Regen und Aerosolen herrühren. Während sich die Einträge aus sedimentierenden Partikeln mit Hilfe von Sammlern direkt erfassen lassen, müssen die Einträge aus Aerosolen über Cadmium-Konzentrationen in der Umgebungsluft, deren mittlere Partikeldurchmesser und den sich hierfür ergebenden Depositionsgeschwindigkeiten berechnet werden. Die für Deutschland vorhandenen Depositions- und Konzentrations-Datensätze, die hauptsächlich für Belastungsregionen oder Wälder ermittelt wurden, wurden gesammelt, verdichtet, hinsichtlich ihrer Repräsentativität für landwirtschaftlich genutzte Flächen bewertet und zu mittleren Gesamt-Depositionen für Bundesländer verarbeitet. Die Depositionen in landwirtschaftliche Nutzflächen liegen für 1996 bis 1998 bei 1 bis 2,5 g ha⁻¹ a⁻¹. Sie liegen damit in der gleichen Größenordnung wie die Einträge mit Düngemitteln und die Austräge mit Ernteprodukten einerseits und dem Sickerwasser andererseits.

Cadmium-Depositionen haben in den vergangenen beiden Jahrzehnten stark abgenommen. Es ist vorauszusehen, daß sie sich im Rahmen der angestrebten Maßnahmen zur Luftreinhaltung weiter verringern werden. Ein Vergleich der gemessenen mit durch Modellierung gewonnenen Depositionen und Konzentrationen macht deutlich, daß die derzeitigen Emissionsinventare die tatsächliche Emissionssituation nicht zutreffend widerspiegeln können.

Schlüsselworte: Cadmium, Deposition, Staubbiederschlag, Konzentration, Schwebstaub, landwirtschaftliche Nutzflächen

Summary

Atmospheric deposition of cadmium to agricultural areas in Germany

Cadmium is toxic to almost all living organisms. In agriculture, cadmium concentrations in soils influence cadmium uptake into plants and therewith into the human food chain. They have adverse effects on soil micro-organisms and the soil meso-fauna. Thus, the detailed knowledge of the constituents of the cadmium budgets of agricultural lands becomes a prerequisite for the assessment of potential and future risks to human health arising from the food chain, and to soil biota.

Atmospheric deposition is an important part of the cadmium budget. It comprises inputs from sedimenting particles including rain as well as inputs from aerosols. The deposition of sedimenting particles can be determined directly using deposition samplers. Deposition from aerosols has to be calculated from cadmium concentrations in aerosols, their mean particle diameter and the respective deposition velocity. The deposition and concentration data sets available for Germany, which normally have been obtained for industrial regions or forested areas, were collected, aggregated, valued with respect to their representativity for agricultural areas, and processed to yield mean depositions for single federal states (Bundesländer). For agricultural areas we obtained mean annual deposition rates of 1 to 2.5 g ha⁻¹ a⁻¹ Cd. This means that the atmospheric deposition of cadmium is in the same order of magnitude as the inputs with fertilisers, the cadmium removals with crops, and the output with seeping water.

Cadmium depositions have declined considerably through the last decades. A further reduction is likely to be observed in future due to legal measures to reduce the emission of particulates in general. A comparison between measured deposition and concentration data and those modelled for Germany reveals that the emission inventories feeding the models are insufficient and do not reflect the actual emission situation.

Keywords: Cadmium, deposition, sedimenting particles, concentration, aerosol, agricultural areas

¹⁾ Anschrift der Verfasser: Ulrich Dämmgen, Manfred Lüttich, Cornelia Scholz-Seidel, Institut für Agrarökologie der Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL), Bundesallee 50, 38116 Braunschweig

Einleitung

Cadmium (Cd) ist ein in landwirtschaftlich genutzten Böden unerwünschtes Spurenelement, da es zum einen aus den Böden über die Nahrungskette bereits in sehr geringen Mengen zur *Beeinträchtigung der menschlichen Gesundheit* führen kann. Die Stoffflüsse Cd-haltiger Spezies in der Nahrungskette sind daher seit einigen Jahrzehnten Gegenstand von Gesetzen und Regelwerken, deren Ziel es ist, humantoxikologisch wirksame Schwellen von Flüssen und Konzentrationen deutlich zu unterschreiten. Bei den geringen Konzentrationen, in denen Cd stets vorliegt, erscheinen Maßnahmen, die am Beginn der Nahrungskette bei solchen Stoffen ansetzen, die vergleichsweise hohe Cd-Konzentrationen aufweisen, in besonderer Weise geeignet, Cd-Flüsse in der Nahrungskette gering zu halten. Zum anderen beeinträchtigen schon geringe Cd-Gehalte in Böden *mikrobiologische Lebensgemeinschaften und die Mesofauna in Böden*. Cd-Flüsse und -konzentrationen sind daher Gegenstand nationaler und internationaler Gesetzes- und Regelwerke im Hinblick auf die menschliche Ernährung (z. B. BGVV 1997) sowie des Bundes-Bodenschutzgesetzes (BBodSchG 1998) und der Bodenschutzverordnung (BBodSchV 1999) (vgl. auch Schütze und Nagel, 1998).

In die Böden gelangt Cd sowohl natürlich als auch durch menschliche Einflüsse: Cd-haltige Ausgangsgesteine und Minerale verwittern; über die Atmosphäre werden Vulkan-Aschen eingetragen (Nriagu, 1979). Bergbau, Verhüttung und Verarbeitung Cd-haltiger Stoffe setzen Stäube und Abwässer frei, die dann sowohl über die Luft als auch nach Überschwemmung mit belasteten Oberflächenwässern in Böden gelangen. Mit Mineraldüngern, Wirtschaftsdüngern und Komposten wird Cd ebenfalls in Böden eingetragen (Zusammenstellung bei Boysen, 1992). Cd-Bilanzen für landwirtschaftliche Nutzflächen machen deutlich, daß die unterschiedlichen Einträge in diese Flächen in der Vergangenheit größer waren als die Austräge mit den Ernteprodukten oder mit der Auswaschung ins Grundwasser. Cd sollte sich daher im Lauf der Zeit in den Böden angereichert haben; dies wird auch tatsächlich beobachtet (vgl. z. B. Nicholson und Jones, 1994; Mench, 1998). Im Rahmen einer nachhaltigen Landwirtschaft kann dies nicht erwünscht sein. Mittelfristig werden also Maßnahmen erforderlich, die dazu beitragen, daß diese Anreicherung vermieden oder wenigstens minimiert wird (Dämmgen und Weigel, 2000).

Überschlägige Cd-Bilanzen für die Landwirtschaft wie etwa bei Isermann (1992), Wilcke und Döhler (1995) oder Spiegel et al. (1999) deuten darauf hin, daß in Deutschland und den benachbarten Staaten die Einträge aus der Luft in der gleichen Größenordnung wie die Einträge aus Düngemitteln liegen. Dies entspricht Messungen des atmosphärischen Anteils an den Gesamt-Cd-Gehalten in Kulturpflanzen (Nicholson et al., 1995, und dort zit. Lit.).

Eine detaillierte Erfassung der aktuellen atmosphärischen Deposition im Hinblick auf Cd-Bilanzen fehlt jedoch. Im vorliegenden Beitrag soll daher versucht werden, die atmosphärische Deposition von Cd in landwirtschaftliche Bestände in Deutschland unter Nutzung derzeit verfügbarer Datensätze zu quantifizieren und Prognosen über die Entwicklung der Depositionen zu geben. Hierzu werden die zur Bestimmung von Cd-Depositionen verfügbaren Datensätze zusammengestellt, verrechnet und bewertet. Im Hinblick auf die zukünftige Belastungssituation wird die Entwicklung und der Stand der Cd-Emissionen in Deutschland anhand vorliegender Emissionsinventare untersucht. Die so gewonnenen Daten werden als Randbedingungen für die Abschätzung des Handlungsbedarfs bei der Beschränkung von Cd-Einträgen etwa mit Düngern und Komposten angesehen.

Vorkommen und Verwendung von Cadmium, Cadmium-Verbindungen und Cadmium-haltigen Stoffen - potentielle Emissionsquellen

Cd ist ein ubiquitäres Element, das in Mineralen stets in geringen Konzentrationen vorliegt; alle bekannten Cd-Mineralen sind für eine technische Verwertung ohne Bedeutung. Dagegen ist Cd typisches Begleitelement zahlreicher sulfidischer Erze, insbesondere von Zink-(Zn)-Erzen (s. u.). Cd^{2+} -Ionen haben in Kristallgittern praktisch die gleichen Ionenradien wie Calcium-(Ca^{2+})-Ionen (Ca: 99 pm, Cd 97 pm). Cd kann daher Ca in ionischen Gittern vertreten (Diadochie). Organismen bauen Cd anstelle von Ca beispielsweise in die Körpersubstanz ein. Wegen des vom Ca abweichenden Bindungsverhaltens in Komplexen (vgl. Giesy, 1980) wird Cd deutlich weniger ausgeschieden und reichert sich in Organismen an. Aus dem gleichen Grund enthalten primäre Phosphatminerale aus magmatischen Gesteinen (etwa Kola-Phosphate) erheblich geringere Cd-Anteile als Apatite aus organischer Bildung (Boysen, 1992).

Cd ist ein technisch in vergleichsweise geringen Mengen verwendetes Metall, das jedoch in zahlreichen Produkten auftritt, in denen es nach heutigem Wissen teilweise nicht oder nur schlecht durch andere Elemente oder Stoffe ersetzt werden kann. So ist Cd Bestandteil von Batterien und Akkumulatoren, dient zur Herstellung von Stabilisatoren für Kunststoffe (PVC), zur Herstellung von Pigmenten für Kunststoffe, Keramik und Gläser (Tötsch, 1990a, b). Metallisches Cd als Oberflächenschutz für Stahl, Aluminium, Kupfer und Messing wird im Gegensatz zu früher (vgl. Umland und Cosack, 1984) nur noch in geringem Umfang verwendet. In Loten ist Cd Legierungsbestandteil (Nriagu, 1980; Balzer, 1996). Cd im Straßenstaub wird auch auf Reifenabrieb zurückgeführt (Sartorius et al., 1977; Fergusson und Stewart, 1992).

Cd ist Bestandteil praktisch aller Zink-Erze (Cd/Zn-Verhältnis zwischen 0,2 und 0,7 %). Es wird bei der Verhüt-

Tab. 1: Cd in technischen Produkten, die in Deutschland verbleiben, nach Mengen, Angaben in Mg α^{-1} Cd (Sartorius et al., 1977; Balzer, 1996)

Table 1: Cd in technical products remaining within Germany, amounts sorted according to quantities manufactured, in Mg α^{-1} Cd (Sartorius et al., 1977; Balzer, 1996)

| In | Westdeutschland | | Gesamt-Deutschland | | | |
|---|-----------------|-------|--------------------|-------|-------|-------|
| | 1973 | 1990 | 1991 | 1992 | 1993 | 1994 |
| Batterien | 470 | 471,3 | 691,0 | 681,7 | 543,2 | 611,2 |
| Schlacken und Recycling | 478 | 125,7 | 95,8 | 116,4 | 130,1 | 134,5 |
| Pigmente | 1200 | 159,9 | 149,4 | 105,8 | 108,2 | 104,3 |
| Stabilisatoren | | 206,0 | 141,0 | 154,0 | 100,0 | 91,0 |
| Deponiert | | 64,5 | 115,9 | 137,9 | 198,5 | 173,5 |
| Glasindustrie | 65 | 7,3 | 17,8 | 10,2 | 12,4 | 14,5 |
| Legierungen und Lote | | 10,5 | 6,4 | 6,5 | 2,5 | 3,2 |
| Verunreinigung in Zink, Kupfer und Blei | | 5,3 | 8,1 | 6,2 | 3,1 | 2,7 |
| Galvanotechnik | 40 | 0,6 | 0,1 | 0,1 | 1,5 | 2,4 |
| Sonstige | | 3,4 | 9,1 | 5,4 | 9,4 | 6,7 |

tung von Zink (Zn) weitgehend abgetrennt und als metallisches Cd gewonnen, da es die Eigenschaften von Zink nachteilig beeinflusst (Versprödung, Verringerung der Walzfähigkeit). Das Handelsprodukt „Primärzink“ enthält noch 0,003 bis 0,01 Gew.-% Cd, Gußlegierungen 0,003 bis 0,005 Gew.-% Cd (Normen DIN EN 1179, DIN EN 1774). Eine Zink-Halbzeug-Produktion von größenordnungsmäßig 100.000 Mg²⁾ (Statistisches Bundesamt 1996) enthält, so immer noch etwa 10 Mg Cd. Die Lebensdauer von Zinkblechen (Dachrinnen etc.) in der europäischen städtischen bzw. industriell verschmutzten Atmosphären beträgt etwa 20 Jahre. Mit den Korrosionsprodukten von Zn gelangt Cd in die Umwelt.

Von besonderer Bedeutung für Emissionen ist der Ersatz von Ca durch Cd-Ionen in solchen Calcium-Mineralen, die technisch in großem Umfang verwendet und thermisch aufbereitet werden, etwa in den Carbonatspäten Ankerit, Calcit und Dolomit. In Steinkohlen ist Cd im wesentlichen sulfidisch gebunden und wird damit der „organischen“ Fraktion der Begleitminerale zugeordnet (Brumsack et al., 1984). Entstehen bei diesen thermischen Prozessen Flugaschen oder -stäube, so findet sich Cd insbesondere in den Feinfraktionen der Flugstäube (Davidson et al., 1974), in die es beim Abkühlen der Rauchgase z.T. aus gasförmigen Spezies, etwa CdO, inkorporiert wird. Das so emittierte Cd wird auf dem Luftweg transportiert und aus der Luft sowohl als Aerosol als auch mit sedimentierenden Partikeln deponiert.

Als wichtige anthropogene Quellen für luftgetragene Cd-Spezies sind Großfeuerungsanlagen sowie die Eisen- und Stahlerzeugung zu nennen (vgl. Tab. 3). Als mäßige Quellen werden kleine Feuerungsanlagen, Sinter- und Konverteranlagen, Gießereien, die Verhüttung von Blei- und Kupfer-Erzen und die Aluminium-Verhüttung angese-

hen. Quellen von geringerer Bedeutung sind die Zement-Produktion, die Verbrennung von Hausmüll und Klärschlamm, die Produktion von Düngemitteln, Glas und Batterien (Berdowsky et al., 1995). In Bergbaugebieten kann Cd-haltiger Staub auch durch Resuspension von Ablagerungen in die Atmosphäre gelangen. Hiervon sind auch Flächen der ehemaligen Bergbau- und Hüttenbetriebe betroffen (vgl. Buntmetallbergbau und -verhüttung im Raum Hettstedt, Landesanstalt für Umweltschutz Sachsen-Anhalt, 1996).

Natürliche Quellen atmosphärischen Cadmiums treten in industriell geprägten Gegenden der Welt gegenüber den anthropogenen weit in den Hintergrund (Friedland, 1989, und dort zit. Lit.; Nriagu, 1989).

Die Erdoberfläche ist die einzige Senke für atmosphärisches Cadmium. Bei einer mittleren Verweildauer von Cd in der Atmosphäre in der Größenordnung von 1 Woche müssen Emissionen und Depositionen einander stets die Waage halten.

Cadmium-Depositionen

Cadmium-Spezies in der Atmosphäre

In der Atmosphäre wird Cd in Form von Aerosol-Teilchen und in nassen und trockenen sedimentierenden Teilchen beobachtet. Über die im atmosphärischen Aerosol vorhandenen Cd-Spezies ist vergleichsweise wenig bekannt. Jedoch handelt es bei den wenigen Untersuchungen zum größten Teil um vergleichsweise leicht lösliche Spezies (vgl. Nriagu, 1980, und dort zit. Lit.). Hlavay et al. (1996) ordnen Cd im Aerosol jedoch der schwerlöslichen Fraktion zu. Der Cd-Anteil am Gesamt-Aerosol ist sehr wechselnd.

Die Aerosol-Partikel werden zum einen durch trockene Deposition der Teilchen auf den Oberflächen von Pflan-

²⁾ 1 Mg = 1 t

zen, Böden, Gewässern und Bauwerken aus der Atmosphäre entfernt, zum anderen durch Koagulation oder Inkorporation zu Teilchen, die auf Grund ihrer Masse sedimentieren. Sie werden insbesondere mit Regentropfen zur Erdoberfläche transportiert.

Die Abscheidungseigenschaften der Partikel sind u.a. von ihrer Größe, ihrer Dichte, ihrer Benetzbarkeit und der Art und Größe der Rezeptorflächen abhängig. Von Aerosol-Konzentrationen („Staub-Immission“) kann daher weder auf Cd-Konzentrationen in der Umgebungsluft noch auf Depositionen geschlossen werden.

In der Nähe von Cd-Emittenten werden erhöhte Depositionen beobachtet, die jedoch mit zunehmender Entfernung schnell abnehmen (Halbierung der Bulk-Deposition in der Größenordnung von etwa 500 m; van Alphen, 1999). Cd-Emissionen selbst starker Punktquellen sind bereits in einer Entfernung von 15 bis 20 km nicht mehr von der Hintergrundbelastung zu unterscheiden (Nürnberg et al., 1984).

Abscheidungsmechanismen

Die Abscheidung aus der Atmosphäre geschieht für Aerosol-Teilchen und sedimentierende Teilchen auf unterschiedliche Weise:

Sedimentierende Partikel folgen praktisch ausschließlich den durch die Wirkung der Schwerkraft und des jeweils herrschenden Windes vorgegebenen Bahnen. Ihre Partikeldurchmesser $d(P)$ sind größer als 100 μm . Die Struktur der Oberfläche, auf der sie deponiert werden, hat im Prinzip keinen Einfluß auf die Abscheidung selbst.

Partikel mit Durchmessern $0,1 \mu\text{m} < d(P) < 10 \mu\text{m}$ sinken im Schwerfeld der Erde nicht mit nennenswerter Geschwindigkeit zu Boden. Sie werden in der Atmosphäre durch turbulente Luftbewegung transportiert und an Oberflächen durch Impaktion abgeschieden. Das Ausmaß der Flüsse hängt deshalb von der jeweiligen Konzentration, der Korngrößenverteilung, den atmosphärischen Transporteigenschaften und der Art und Größe der Oberflächen ab.

Für Partikel mit $10 \mu\text{m} < d(P) < 100 \mu\text{m}$ sind beide Prozesse am Transport beteiligt, wobei der Anteil der Sedimentation mit zunehmenden Partikeldurchmessern zunimmt. In der Regel durchläuft die Korngrößenverteilung der atmosphärischen Partikel allerdings in diesem Bereich ein Minimum.

Experimentelle Methoden zur Bestimmung der Deposition sedimentierender Partikel

Sedimentierende Partikel fallen im Schwerfeld der Erde ausschließlich nach unten. Keine Eigenschaft der Senke fördert oder behindert ihren Fluß; die treibende Potentialdifferenz im Gravitationsfeld ist senkenunabhängig und unabhängig von den Stoffeigenschaften der sedimentierenden Partikel. Es liegt daher nahe, statt des

eigentlich betrachteten Rezeptorsystems ein Surrogatsystem zu exponieren, das die Erfassung der betreffenden Stoffflüsse leichter zu erfassen gestattet als das Rezeptorsystem selbst. Da das Rezeptorsystem mit den einmal deponierten Stoffen reagieren kann, muß die Surrogatfläche eigentlich die mechanischen, chemischen und elektrostatischen Eigenschaften des als Senke betrachteten Systems widerspiegeln.

In der Praxis exponiert man Surrogatflächen (Depositionssammler) in Form von nach oben offenen Töpfen oder Trichtern mit Sammelflaschen. Zahlreiche, zum Teil sehr unterschiedliche Bauformen sind im Einsatz (vgl. DVWK, 1994). Depositionssammler sind prinzipiell nicht kalibrierbar: Weder Topf- noch Trichter-Flasche-Sammler stellen vollständige Meßverfahren im Sinne von Norm DIN 1319 dar. Auch die genormten Verfahren (Bergerhoff-Sammler, vgl. Norm VDI 2119) werden als sog. Konventionsverfahren betrieben, weil Referenzmaterialien nicht hergestellt werden können (Norm VDI 2449). Grundsätze der Bestimmung der Stoffdeposition wurden als Empfehlungen oder Normen festgelegt (Normen VDI 3870; WMO, 1971; UN/ECE, 1994; LAWA, 1996; DVWK, 1994).

Die Abscheidungseigenschaften der Sammler werden wesentlich durch ihre baulichen Eigenschaften bestimmt (Höhe und Durchmesser der Trichter, Beschaffenheit der Kante, verwendete exponierte Werkstoffe). Obschon die praktischen Konsequenzen seit langem bekannt sind (z.B. Köhler und Fleck, 1966; Galloway und Likens, 1976), gibt es noch keine Standard-Depositionssammler. Der für die Bestimmung des Staubniederschlags herangezogenen Bergerhoff-Sammler nach Norm VDI 2119 ist eigentlich kein Depositionssammler im oben beschriebenen Sinn der Surrogatflächen.

Als Surrogatflächen dienen in der Regel Bulk-Sammler und Naß-Sammler. Bulk-Sammler sind ständig exponierte Surrogatsysteme, in denen sich nasse und trockene sedimentierende Partikel abscheiden; Naß-Sammler werden nur bei Niederschlagsereignissen geöffnet. Einmal gesammelte Stoffmengen sollen nicht durch Auswehung während des Sammelzeitraums entfernt werden.

Qualität der gängigen Bulk-Depositionsmessungen

Die in Deutschland gebräuchlichen Sammler sind in der Regel kaum im Hinblick auf ihre Sammeleigenschaften untersucht worden. Dies betrifft sowohl ihre Sammeleigenschaften für Niederschläge und sedimentierende Partikel (vollständige Abscheidung erwünscht) als auch ihre Sammeleigenschaften für Gase und Schwebstäube (keine Abscheidung erwünscht).

Die Menge der mit Hilfe von Surrogatflächen gemessenen Einträge weicht jedoch grundsätzlich von den Stoffmengen ab, die durch die Bestandesoberfläche hindurch treten, da die Sammler in bewegter Luft Strömungshindernisse darstellen. Je nach Aufstellungsort betragen die

gemessenen Einträge 85 bis 95 % der tatsächlich sedimentierenden Stoffmengen. Scharfe Kanten an den Sammlern und ungünstige elektrostatische Eigenschaften führen zu Mehreinträgen von Aerosol-gebundenen Partikeln. Je geringer die Windgeschwindigkeiten am Aufstellungsort des Sammlers sind, desto geringer sind die beim Sammeln entstehenden Fehler (vgl. Dämmgen et al., 2000).

Eine einfache Korrektur ist ohne zusätzliche Messungen oder ohne zusätzliche Kenntnis der Sammlertypen, der Orte, an denen sie aufgestellt sind, und der Expositionshöhe nicht möglich (Winkler und Raider, 1997). Insgesamt gehen wir deshalb in der folgenden Betrachtung davon aus, daß die *Größenordnung* der in den unterschiedlichen Meßnetzen bestimmten Bulk-Depositionen vergleichbar und richtig ist. Über den Anteil der nassen Deposition an der Bulk-Deposition liegen für Cd kaum belastbare Zahlen vor. Grefen et al. (1984) geben den Anteil der Naß-Deposition an Gesamtschwermetall-Niederschlag für Reinluftgebiete und Cd mit 70 bis 93 % an. Dies stimmt mit Werten überein, die bei Dämmgen et al. (1996) genannt werden.

Deposition aus Schwebstäuben

Depositionen von Schwebstäuben sind nur mit einem sehr hohen Aufwand direkt meßbar. Messungen beschränken sich daher in der Regel auf wenige Orte und kurze Zeiträume. Es ist jedoch möglich, aus den dort gewonnenen Zusammenhängen die Cd-Depositionen (Flußdichten) aus Schwebstäuben (F_{Cd}), aus Konzentrationsangaben (Partialdichten) für Cd (ρ_{Cd}) in der Umgebungsluft, den Korngrößenverteilungen für Cd-haltige Stäube und darauf bezogenen Depositionsgeschwindigkeiten (v_D) für bestimmte Senken nach

$$F_{Cd} = \rho_{Cd} \cdot v_D$$

abzuschätzen. Hierzu sind entsprechende, zueinander passende Wertekombinationen von Konzentrationen, Korngrößenverteilungen und von turbulenten Eigenschaften der Atmosphäre über den zu betrachtenden Beständen zu bestimmen. Für Deutschland sind zur Zeit keine der benötigten Informationen flächendeckend vorhanden. Vergleichsweise häufig werden die sog. „Konzentrationen in der Umgebungsluft“ gemessen. Diese Konzentrationsmessungen müssen aber auf ihre räumliche Repräsentativität untersucht werden; Depositionsgeschwindigkeiten müssen aus Literaturdaten bei Kenntnis von Korngrößenverteilungen, Senkeneigenschaften und atmosphärischen Austauschigenschaften abgeleitet werden.

Korngrößenverteilungen lassen sich klassiert mit Impaktoren bestimmen. Die Arbeitsbereiche der Impaktoren sind meist auf Teilchendurchmesser $d(P) < 10 \mu m$ beschränkt. Impaktoren werden praktisch nie in Routineuntersuchungen eingesetzt. In der Regel müssen deshalb die Ergebnisse von Meßkampagnen ausgewertet werden, deren zeitliche und örtliche Repräsentativität nicht oder nur unzureichend bekannt ist. Schwerpunkt der zugänglichen Untersuchungen waren in den meisten Fällen städtische Schwebstäube. Die bei Untersuchungen an Stäuben in mehreren deutschen Städten ermittelten Daten sind in Tab. 2 zusammengestellt. Aus den Untersuchungen von Heits und Israel (1982) in Berlin geht hervor, daß die Hauptmenge des Cd in Teilchen mit $d(P) < 1,8 \mu m$ gefunden wird. Im Solling im Sommer 1980 durchgeführte Impaktormessungen ergaben einen mittleren Durchmesser $d(P)$ von $0,26 \mu m$ (Höfken et al., 1981).

Maßnahmen zur Verringerung der Staubemissionen, die seit diesen Messungen durchgeführt wurden, haben auch zu einer Veränderung der Zusammensetzung der emittierten Stäube und ihres Korngrößenspektrums geführt. Modernere Untersuchungen befaßten sich mit Schwebstaub am Oberrhein und über Wasser: Zehringer et al. (1989) fanden bei Impaktormessungen für den Raum Basel ebenso wie Steiger et al. (1989) in der Deutschen

Tab. 2: Korngrößenverteilungen für Cd-haltige Aerosole. Messungen in Deutschland. Daten aus Laskus et al. (1979), zur Methode vgl. Laskus und Bake (1976)

Table 2: Frequency distribution of particle sizes of Cd containing aerosols in Germany. Data source: Laskus et al. (1979); the method applied is described in Laskus and Bake (1976)

| Ort | Meßjahr | Typ | 50-%-Wert der Korngrößenhäufigkeitsverteilung μm | Bemerkung |
|------------------------------|---------|-----------------|--|-----------------|
| Berlin-Marienfelde | 1976 | Städtisch | 0,5 | Einzelmessungen |
| Hannover-Linden | 1976 | Städtisch | 1,3 | Einzelmessungen |
| Nordenham | 1976 | Zink-Hütte | 0,2 | Einzelmessungen |
| Duisburg-Hochfeld | 1976 | Industriegebiet | 0,5 | Einzelmessungen |
| Frankfurt Flughafen | 1976 | | 0,3 | Einzelmessungen |
| Mannheim/Friesenheimer Insel | 1976 | | 0,4 | Einzelmessungen |
| München-Schwabing | 1976 | Städtisch | 0,3 | Einzelmessungen |

Bucht, daß für die Hauptmenge der Cd-haltigen Aerosole $0,1 \mu\text{m} < d(P) < 0,5 \mu\text{m}$ war. Rojas et al. (1993) haben Schwebstäube über der südlichen Nordsee auf ihre Korngrößenzusammensetzung und ihre Depositionsgeschwindigkeit untersucht. Im Gegensatz zu anderen Studien haben sie eine Verteilung mit einem deutlichen Maximum bei $d(P) > 5 \mu\text{m}$ beobachtet. Für Winde, die von Land her kamen, wurde eine Depositionsgeschwindigkeit $v_D(\text{Cd}) = 0,26 \pm 0,16 \text{ cm s}^{-1}$ bestimmt. Eine ähnliche Korngrößenverteilung bestimmten Laskus et al. (1989) für städtische Schwebstäube. Korngrößenuntersuchungen für Wien und seine ländliche Umgebung ergaben ein Maximum der Häufigkeitsverteilung für S-haltige Partikel im Bereich von um $0,5 \mu\text{m}$ (Horvath et al., 1996). Anthropogenes S und Cd im Aerosol korrelieren hoch miteinander (Dämmgen, 1986).

Davidson und Wu (1990) haben Depositionsgeschwindigkeiten für Partikel-Depositionen von Spurenelementen in Funktion vom Partikeldurchmesser für Cd-haltige Aerosole zusammengestellt und ausgewertet. Eine Regression unter Verwendung aller verwertbaren Messungen ergab, daß für mittlere Teilchendurchmesser $d(P) = 0,5 \mu\text{m}$ mit einer mittleren Depositionsgeschwindigkeit $v_D = 0,3 \text{ cm s}^{-1}$ gerechnet werden kann. Die Messungen von Duyzer und Bosveldt (1986) für größere Teilchen passen zu diesem Bild, ebenso die wenigen Angaben in Nicholson (1988). Sie entsprechen dem bei Steiger et al. (1989) angegebenen $v_D = 0,34 \text{ cm s}^{-1}$ und größenordnungsmaßig den bei Vawda et al. (1989) genannten Werten. Bei Davidson (1980) werden v_D im Bereich von $0,1$ bis $1,9 \text{ cm s}^{-1}$ ohne Angabe der Oberflächen genannt.

Die Abschätzung der Deposition aus Aerosolen beruht deshalb auf folgenden Annahmen:

Der mittlere Teilchendurchmesser beträgt etwa $0,5 \mu\text{m}$, die mittlere Depositionsgeschwindigkeit $0,3 \text{ cm s}^{-1}$.

Für die Konzentration von $\rho_{\text{Cd}} = 1 \text{ ng m}^{-3}$ läßt sich dann eine mittlere Deposition F_{Cd} von $1 \text{ g ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ abschätzen:

$$\begin{aligned} F_{\text{Cd}} &= r_{\text{Cd}} \cdot v_D \\ &= 1,0 \text{ ng m}^{-3} \cdot 0,003 \text{ m s}^{-1} \cdot 60 \cdot 60 \cdot 24 \cdot 365 \text{ s a}^{-1} \\ &\quad \cdot 10^{-9} \text{ g ng}^{-1} \cdot 10^4 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1} \\ &= 0,95 \text{ g ha}^{-1} \text{ a}^{-1} \approx 1 \text{ g ha}^{-1} \text{ a}^{-1} \end{aligned}$$

Untersuchungen von Zimmerling et al. (2000a) über die örtliche Variabilität der Zusammensetzung von Schwebstäuben in einer Region lassen den Schluß zu, daß Messungen in der Umgebungsluft ohne Anwesenheit von starken Quellen als großräumig (mehrere 1000 km^2) repräsentativ gelten können.

Verfügbare Depositions- und Konzentrationsdaten

Die Bestimmungen von Cd-Bulk-Depositionen bzw. von Inhaltsstoffen des Staubniederschlags und von Konzentrationen im Aerosol (Schwebstaub) werden im Rahmen der Luftüberwachungsprogramme einzelner Bundes-

länder routinemäßig dort vorgenommen, wo eine Überwachung nach den Immissionsschutzgesetzen des Bundes und der Länder geboten ist. Dies ist vor allem in Industriegebieten bzw. in der Nähe von Emittenten (Punktquellen) der Fall. Emittentenferne Messungen von Cd-Depositionen werden vom Umweltbundesamt im Rahmen der Überwachung grenzüberschreitender Luftverunreinigungen an seinen Meßstellen vorgenommen. Vor allem bei den Programmen zur Erforschung der „neuartigen Waldschäden“ wurden bei Depositionsmessungen teilweise auch Schwermetall-Depositionen im Freiland erfaßt. Bodendauerbeobachtungsflächen in Wäldern und landwirtschaftlichen Nutzflächen sind mit Einrichtungen zur Messung der Bulk-Deposition ausgerüstet. Die Bestimmung der Deposition von Cd erfolgt jedoch nicht notwendigerweise. In Einzelfällen werden in Meßprogrammen von Hochschulen und Forschungseinrichtungen Depositionen bestimmt. Die Ergebnisse dieser Messungen werden vorzugsweise in Forschungsberichten und Jahresberichten der entsprechenden Ämter, in manchen Fällen auch im Internet dargestellt. In einigen Fällen sind die Daten nicht veröffentlicht.

Für diesen Bericht wurden die erhaltenen Depositionsdaten zunächst den Land- und Stadtkreisen zugeordnet, in denen sie gemessen wurden. Lagen in einem Kreis mehrere Messungen im Bezugszeitraum vor, so wurden die arithmetischen Mittel gebildet. Da hierbei eine vergleichsweise kleinräumige Auflösung erreicht wird, lassen sich Gebiete mit starken Punkt- oder Flächenquellen identifizieren. Im Hinblick darauf, daß dieser Bericht eine der Grundlagen zur europäischen Rechtsangleichung bei den Höchstgehalten von Cd in Düngemitteln sein soll, wird zunächst eine Aggregation auf der Bundesländerebene erforderlich³⁾. Gebiete, die unmittelbar durch Punkt- oder Flächenquellen belastet sind, werden bei dieser Mittelwertbildung nicht berücksichtigt. Alle anderen Kreise gehen flächengewichtet in die Mittelwertbildung für die Bundesländer ein.

Konzentrationsmessungen an Aerosolen sind aufwendiger als Depositionsmessungen, jedoch für größere Räume repräsentativ. Anhand der Depositionsdaten werden diejenigen Landkreise identifiziert, deren atmosphärische Zusammensetzung durch lokale Quellen beeinflusst wird. Meßwerte, die deutlich ersichtlich in Belastungsgebieten gewonnen wurden, wurden nicht ausgewertet.

Da die Belastung landwirtschaftlicher Flächen durch die Bewirtschaftung eigentlich die Betrachtung der Zeiträume typischer Fruchtfolgen erfordert, werden in diesem Bericht bei der Betrachtung der Depositionen jeweils drei

³⁾ „The data that need to be generated/determined should be representative of national, and where relevant, regional values. Indeed, where soil characteristics and agricultural practices vary significantly from one region to another within the same Member State, it will be necessary to obtain the data required for the different regions.“ (ERM 1999)

Jahre zusammengefaßt. Dies entspricht dem Immissionskennwert I1V3 der TA Luft (1986) und der internationalen Anleitung zur Ermittlung von Emissionen aus der Landwirtschaft (IPCC, 1996).

Die für die einzelnen Bundesländer zur Verfügung stehenden Quellen sind im folgenden zusammengefaßt und ihre Bewertung erläutert.

In den Abbildungen 1 bis 8 im Anhang sind die für Depositionen und Konzentrationen verfügbaren Datensätze und die Größenordnung der Belastung für einzelne Kreise zusammengestellt.

Für die Berechnung der mittleren Cd-Gesamtdeposition (Abb. 9 und 10) der einzelnen Bundesländer für die Jahre 1994 bis 1995 und 1996 bis 1998 wurden die Depositionen der einzelnen Stationen zusätzlich einer statistischen Analyse unterzogen, die die Identifikation von Ausreißern gestattete (SPSS, 1999). Die Ausreißer erwiesen sich alle als Stationen in Gebieten mit starken Punkt- oder Flächenquellen. Sie wurden bei der Bildung der Mittelwerte nicht berücksichtigt. Konzentrationsmessungen, die an dergleichen Meßstelle durchgeführt wurden, wurden dann ebenfalls nicht berücksichtigt.

Baden-Württemberg:

Quellen: Trüby (1983); Iburg et al. (1992); Schulte et al. (1996); Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg (2000); Umweltbundesamt (2000a)

Datengrundlage (Anzahl der Kreise mit Messungen):

Depositionen:

- 84-89: 9 Kreise
- 90-92: 7 Kreise
- 93-95: 8 Kreise
- 96-98: 8 Kreise

Konzentrationen:

- 86-89: 7 Kreise
- 90-92: 7 Kreise
- 93-95: 1 Kreis
- 96-98: 1 Kreis

Bayern:

Quellen: Bayerisches Landesamt für Umweltschutz (2000a); Bayerische Landesanstalt für Wald- und Forstwirtschaft, laufende Mitteilungen an das Umweltbundesamt (2000c); Umweltbundesamt (2000a)

Anmerkungen:

- (1) In Bayern werden von Landesämtern keine Messungen von Cd-Konzentrationen im Aerosol durchgeführt (Bayerisches Landesamt für Umweltschutz, 2000b).
- (2) Aus den Monatswerten der Inhaltsstoffe des Staubbiederschlags, die vom des Bayerischen Landesamt für Umweltschutz (2000a) zur Verfügung gestellt wurden, wurden die zeitgewichteten Jahresdepositionen berechnet.
- (3) Hantschel et al. (1985) geben für Oberwarmensteinach im Fichtelgebirge nur Halbjahressummen der Deposition an.

Datengrundlage (Anzahl der Kreise mit Messungen):

Depositionen:

- 84-89: 7 Kreise
- 90-92: 7 Kreise
- 93-95: 7 Kreise
- 96-98: 29 Kreise

Konzentrationen:

- 86-89: 1 Kreis
- 90-92: 1 Kreis
- 93-95: 1 Kreis
- 96-98: 1 Kreis

Berlin:

Quellen: Marschner et al. (1991); Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umweltschutz, laufende Mitteilungen an das Umweltbundesamt (2000c); Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft, Institut für Forstökologie und Walderfassung (2000)

Anmerkungen: Die Messungen von Heits und Israël (1982) an Staubinhaltsstoffen (Konzentrationen) in Berlin wurden nicht berücksichtigt. Messungen von Cd-Konzentrationen im Schwebstaub wurden von der Senatsverwaltung für Stadtentwicklung, Umweltschutz und Technologie (2000) nicht vorgenommen.

Datengrundlage (Messungen liegen vor):

Depositionen:

- 84-89: ja
- 90-92: ja
- 93-95: ja
- 96-98: ja

Konzentrationen:

- 86-89: nein
- 90-92: nein
- 93-95: nein
- 96-98: nein

Brandenburg

Quellen: Landesumweltamt Brandenburg (1993, 1994, 1995a, b, 1996, 1997, 1998, 1999); Landesforstanstalt Eberswalde (2000); Zimmerling et al. (2000); Umweltbundesamt (2000a)

Anmerkungen: Depositions-Messungen vor 1993 sind Rastermessungen in Siedlungsgebieten; der Datenbruch zu nachfolgenden Jahren ist offensichtlich.

Datengrundlage (Anzahl der Kreise mit Messungen):

Depositionen:

- 84-89: 2 Kreise
- 90-92: 4 Kreise
- 93-95: 16 Kreise
- 96-98: 18 Kreise

Konzentrationen:

- 86-89: 4 Kreise
- 90-92: 4 Kreise
- 93-95: 7 Kreise
- 96-98: 6 Kreise

Bremen:

Quellen: keine Daten ausgewertet

Hamburg:

Quellen: Georgii et al. (1982); Mayer et al. (1985); Freie und Hansestadt Hamburg, Umweltbehörde (1997, 2000); Universität Hamburg, Institut für Bodenkunde, Meldungen an das Umweltbundesamt (2000c)

Datengrundlage (Messungen liegen vor):

Depositionen:

| | |
|--------|------|
| 84-89: | ja |
| 90-92: | ja |
| 93-95: | ja |
| 96-98: | nein |

Konzentrationen:

| | |
|--------|------|
| 86-89: | nein |
| 90-92: | nein |
| 93-95: | ja |
| 96-98: | ja |

Hessen:

Quellen: Georgii et al. (1982); Balázs (1991); GfA (1993a, b, c, 1994, 1995, 1996, 1997, 1998, 1999, 2000); Schulte et al. (1996); Hessische Landesanstalt für Umwelt (1996); Balázs 1998; Scholz-Seidel und Dämmgen (2000); Hessische Landesanstalt für Forsteinrichtung, Walderfassung und Waldökologie, Meldungen an das Umweltbundesamt (2000c); Hessische Landesanstalt für Umwelt und Geologie (2000); Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft, Institut für Forstökologie und Walderfassung (2000)

Anmerkungen: Die Angaben von Konzentrationen der Bulk-Deposition für 1975 und Frankfurt bzw. Kleiner Feldberg bei Müller und Beilke (1977) können nicht ausgewertet werden, da die Niederschlagsmengen fehlen.

Datengrundlage (Anzahl der Kreise mit Messungen):

Depositionen:

| | | |
|--------|----|--------|
| 84-89: | 8 | Kreise |
| 90-92: | 8 | Kreise |
| 93-95: | 9 | Kreise |
| 96-98: | 12 | Kreise |

Konzentrationen:

| | | |
|--------|----|--------|
| 86-89: | 0 | Kreise |
| 90-92: | 10 | Kreise |
| 93-95: | 11 | Kreise |
| 96-98: | 10 | Kreise |

Mecklenburg-Vorpommern:

Quellen: Umweltminister des Landes Mecklenburg-Vorpommern (1994); Ministerium für Bau, Landesentwicklung und Umwelt (1996); Umweltministerium Mecklenburg-Vorpommern (1998); Landesamt für Umwelt, Naturschutz und Geologie Mecklenburg-Vorpommern (2000); Umweltbundesamt (2000a)

Datengrundlage (Anzahl der Kreise mit Messungen):

Depositionen:

| | | |
|--------|----|--------|
| 84-89: | 0 | Kreise |
| 90-92: | 4 | Kreise |
| 93-95: | 8 | Kreise |
| 96-98: | 10 | Kreise |

Konzentrationen:

| | | |
|--------|---|--------|
| 86-89: | 0 | Kreise |
| 90-92: | 1 | Kreis |
| 93-95: | 6 | Kreise |
| 96-98: | 5 | Kreise |

Niedersachsen:

Quellen: Georgii et al. (1982); Mayer (1983); Meiwes (1984); Schultz (1986a, b); Dämmgen (1986); Dämmgen et al. (1996); Hartwig-Hanitz et al. (1996); Niedersächsische Forstliche Versuchsanstalt (2000); Niedersächsisches Landesamt für Ökologie (1997, 1998a, b, 1999, 2000a, b); Umweltbundesamt (2000a, c); Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft, Institut für Forstökologie und Walderfassung (2000)

Anmerkungen:

- (1) Im Aerosol in ländlichen Räumen in Niedersachsen wurden nach Mitteilung des Niedersächsischen Landesamts für Ökologie (2000a) in den unmittelbar zurückliegenden Jahren $0,3 \text{ ng m}^{-3} < \rho_{\text{Cd}} < 0,5 \text{ ng m}^{-3}$ gemessen. Für die Abschätzung der derzeitigen trockenen Deposition wurden daher landesweit $\rho_{\text{Cd}} = 0,4 \text{ ng m}^{-3}$ angesetzt (Niedersächsisches Landesamt für Ökologie 2000a).
- (2) Die von Ruppert (1975) für eine Meßstelle in der Stadt Göttingen beobachteten Cd-Depositionen ($32 \mu\text{g m}^{-2} \text{ Monat}^{-1}$) wurden nicht berücksichtigt, da sie nur die Monate Mai und September 1972 beschreiben.
- (3) Die Angaben in Schultz (1986) widersprechen Schultz (1985). Die schlechter dokumentierten Angaben in Schultz (1985) wurden nicht genutzt.
- (4) In der Atmosphäre im Solling bestimmten Höfken et al. (1981, 1983) die mittlere Cd-Konzentration im Aerosol für Februar bis Oktober 1980 zu $1,6 \text{ ng m}^{-3}$. Die entsprechenden Depositionsmessungen umfassen ebenfalls nur 9 Monate; extrapoliert man auf ein Jahr, so betrug die Deposition etwa $4 \text{ g ha}^{-1} \text{ a}^{-1} \text{ Cd}$.
- (5) Die Ergebnisse der Depositionsmessungen zur Schwermetallniederschlagsbelastung 1982-1984 für die Meßgebiete Nordenham und Oker/Harlingerode (Niedersächsischer Minister für Bundesangelegenheiten 1985) wurden nicht berücksichtigt, da diese Belastungsregionen als nicht typisch für landwirtschaftliche Flächen angesehen werden.

Datengrundlage (Anzahl der Kreise mit Messungen):

Depositionen:

| | | |
|--------|----|--------|
| 84-89: | 20 | Kreise |
| 90-92: | 18 | Kreise |
| 93-95: | 21 | Kreise |
| 96-98: | 33 | Kreise |

Konzentrationen:

| | |
|--------|----------|
| 86-89: | 4 Kreise |
| 90-92: | 3 Kreise |
| 93-95: | 3 Kreise |
| 96-98: | 1 Kreis |

Nordrhein-Westfalen:

Quellen: Nürnberg et al. (1982, 1984); Georgii et al. (1982); Schulte et al. (1996); Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen (1996, 1997a, b, c, 1999a, b, 2000); Landesanstalt für Ökologie, Bodenordnung und Forsten (2000); Umweltbundesamt (2000a)

Anmerkungen:

- (1) NRW hat sehr detaillierte Messungen zur Cd-Belastung im Staubbiederschlag durchgeführt, deren Ergebnisse auf Kreisflächen bezogen wurden. Für die Jahre 1996 bis 1998 wurden aus den Messungen des Landesumweltamtes nur die sog. ballungsgebietfernen Stationen und die Mittelgebirgsstation Eifel herangezogen.
- (2) Bei der Angabe von wet-only-Depositionen (Nürnberg et al., 1982, 1984) wird angenommen, daß die Naß-Deposition 80 % der Bulk-Deposition ausmacht.
- (3) Die Konzentrationsangaben in Bruckmann und Pfeifer (1992) sind keinen Kreisen zuzuordnen und wurden deshalb nicht berücksichtigt.

Datengrundlage (Anzahl der Kreise mit Messungen):**Depositionen:**

| | |
|--------|-----------|
| 84-89: | 6 Kreise |
| 90-92: | 30 Kreise |
| 93-95: | 19 Kreise |
| 96-98: | 5 Kreise |

Konzentrationen:

| | |
|--------|-----------|
| 86-89: | 2 Kreise |
| 90-92: | 1 Kreis |
| 93-95: | 12 Kreise |
| 96-98: | 16 Kreise |

Rheinland-Pfalz:

Quellen: Georgii et al. (1982); Schulte et al. (1996); Umweltbundesamt (2000a); Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft, Institut für Forstökologie und Walderfassung (2000)

Datengrundlage (Anzahl der Kreise mit Messungen):**Depositionen:**

| | |
|--------|-----------|
| 84-89: | 13 Kreise |
| 90-92: | 10 Kreise |
| 93-95: | 10 Kreise |
| 96-98: | 6 Kreise |

Konzentrationen:

| | |
|--------|---------|
| 86-89: | 1 Kreis |
| 90-92: | 1 Kreis |
| 93-95: | 1 Kreis |
| 96-98: | 1 Kreis |

Saarland:

Quelle: Staatliches Institut für Gesundheit und Umwelt (2000)

Datengrundlage (Anzahl der Kreise mit Messungen):**Depositionen:**

| | |
|--------|----------|
| 84-89: | 0 Kreise |
| 90-92: | 3 Kreise |
| 93-95: | 3 Kreise |
| 96-98: | 3 Kreise |

Konzentrationen:

| | |
|--------|----------|
| 86-89: | 0 Kreise |
| 90-92: | 0 Kreise |
| 93-95: | 2 Kreise |
| 96-98: | 2 Kreise |

Sachsen:

Quellen: Matschullat und Bozau (1996); Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie (1997, 1998, 1999)

Anmerkungen:

- (1) Bei den Daten aus den Belastungsgebieten Dresden, Riesa und Taubenheim (Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie 1997) wurden die Angaben für 1992/1993 für beide Jahre in die Tabelle übernommen.
- (2) Für 1998 wurden die Konzentrationen der Schwebstaubinhaltsstoffe (TSP) und Schwebstaubinhaltsstoffe (PM₁₀) angegeben. Aus dem Vergleich der Verfahren kann gefolgert werden, daß für die Zwecke dieser Untersuchung die Konzentrationen als gleich betrachtet werden können (Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie 1999).

Datengrundlage (Anzahl der Kreise mit Messungen):**Depositionen:**

| | |
|--------|-----------|
| 84-89: | 3 Kreise |
| 90-92: | 5 Kreise |
| 93-95: | 22 Kreise |
| 96-98: | 21 Kreise |

Konzentrationen:

| | |
|--------|-----------|
| 86-89: | 0 Kreise |
| 90-92: | 0 Kreise |
| 93-95: | 14 Kreise |
| 96-98: | 14 Kreise |

Sachsen-Anhalt:

Quellen: Ministerium für Umwelt und Naturschutz des Landes Sachsen-Anhalt (1994); Niehus und Brüggemann (1995); Ministerium für Raumordnung, Landwirtschaft und Umwelt des Landes Sachsen-Anhalt (1996); Ministerium für Raumordnung und Umwelt des Landes Sachsen-Anhalt (1998), Landesamt für Umweltschutz (1996, 1997, 1998, 1999)

Anmerkungen: Bei den flächendeckend durchgeführten Meßprogrammen mit Bergerhoff-Sammlern für die Jahre 1995 bis 1998 wurden die zahlreichen Einzeldaten für die Landkreise arithmetisch gemittelt zusammengefaßt.

Datengrundlage (Anzahl der Kreise mit Messungen):**Depositionen:**

| | |
|--------|-----------|
| 84-89: | 0 Kreise |
| 90-92: | 19 Kreise |
| 93-95: | 24 Kreise |
| 96-98: | 24 Kreise |

Konzentrationen:

| | |
|--------|-----------|
| 86-89: | 0 Kreise |
| 90-92: | 0 Kreise |
| 93-95: | 10 Kreise |
| 96-98: | 10 Kreise |

Schleswig-Holstein:

Quellen: Staatliches Umweltamt Itzehoe (1999, 2000); Lehmhaus et al. (1998); Landesamt für Natur und Umwelt des Landes Schleswig-Holstein (2000); Umweltbundesamt (2000a); Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft, Institut für Forstökologie und Walderfassung (2000)

Datengrundlage (Anzahl der Kreise mit Messungen):**Depositionen:**

| | |
|--------|-----------|
| 84-89: | 12 Kreise |
| 90-92: | 11 Kreise |
| 93-95: | 11 Kreise |
| 96-98: | 12 Kreise |

Konzentrationen:

| | |
|--------|----------|
| 86-89: | 1 Kreis |
| 90-92: | 3 Kreise |
| 93-95: | 4 Kreise |
| 96-98: | 4 Kreise |

Thüringen:

Quellen: Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft Gotha (2000); Thüringer Landesanstalt für Umwelt (2000)

Anmerkungen: Daten für Level-II-Flächen der Forsten: meteorologisches Jahr (November x-1 bis Oktober x).

Datengrundlage (Anzahl der Kreise mit Messungen):**Depositionen:**

| | |
|--------|-----------|
| 84-89: | 0 Kreise |
| 90-92: | 2 Kreise |
| 93-95: | 4 Kreise |
| 96-98: | 18 Kreise |

Konzentrationen:

| | |
|--------|----------|
| 86-89: | 0 Kreise |
| 90-92: | 1 Kreis |
| 93-95: | 5 Kreise |
| 96-98: | 6 Kreise |

Aggregierte Daten für mehrere Bundesländer bzw. die gesamten Alten und Neuen Bundesländer

Die Angaben von Marquardt et al. (1990) zur Schwermetall-Deposition in der DDR für die Jahre 1983 bis 1988 blieben wegen fehlender räumlicher Differenzierung unberücksichtigt.

Datensätze vor 1980

Vor 1980 wurden in Deutschland Schwermetall-Depositionen kaum bestimmt (vgl. auch Schladot und Nürnberg (1982)). Einige Daten finden sich zusammengefaßt bei Sartorius et al. (1977) und Schulte-Schrepping (1978). Heinrichs und Mayer (1977, 1980) geben für den Solling als Mittel für die Jahre 1974/1975 bzw. 1974 bis 1977 Freiland-Depositionen von 13 bzw. 35 g ha⁻¹ a⁻¹ Cd an.

Ausländische Datensätze, die zum Vergleich herangezogen werden

„Historische“ Daten für Reinluftgebiete werden bei Cawse (1982) angegeben. Die gleiche Arbeit weist darauf hin, daß vor etwa 1980 Korngrößenverteilungen für Cd-haltige Aerosole nicht bestimmt wurden. Ein Vergleich heutiger Daten mit „historischen“ (Dams und De Jonge 1976) läßt den Schluß zu, daß in ländlichen Gebieten nunmehr Konzentrationen vorherrschen, die denen von europäischen Reinluftgebieten vor 25 Jahren entsprechen.

Die Entwicklung der Konzentrationen in ländlichen Gebieten Großbritanniens entspricht weitgehend denen in Deutschland (Harrison und Jones, 1995).

Die Cadmium-Depositionen in landwirtschaftlichen Stoffhaushalten in Deutschland

Die oben gemachten Angaben und die Abb. 1 bis 8 zeigen, daß sich aus Meßdaten nur schwer eine flächendeckende Informationen über die Deposition von Cadmium in landwirtschaftliche Nutzflächen erhalten läßt. Während in den nördlichen und östlichen Bundesländern im letzten Mittelungszeitraum zahlreiche Meßstellen eine recht sichere Einschätzung der Bulk-Deposition erlauben, sind die Angaben zur Bulk-Deposition in den westlichen und südlichen Bundesländern nur spärlich. Für Messungen der Cd-Konzentrationen im Schwebstaub treffen diese Aussagen in verstärktem Maße zu. Messungen zur Korngrößenverteilung liegen überhaupt nicht vor. Es ist durchaus fraglich, ob bei den derzeit beobachteten Konzentrationen und mit den derzeit verfügbaren Sammel- und Analysetechniken eine Bestimmung von Korngrößenverteilungen noch mit vertretbarem Aufwand durchgeführt werden kann.

Einen Ausweg aus dieser Situation könnte die Modellierung der Deposition mit Hilfe eines Emissionskatasters, eines Transmissionsmodells und eines Depositionsmodells sein. Entsprechende Kataster werden von den Bundesländern bzw. dem Umweltbundesamt erstellt; Transmission und Deposition werden vom Meteorological Synthesizing Centre East in Moskau für Europa mit einer vergleichsweise hohen räumlichen Auflösung modelliert.

Ein Vergleich der Meßdaten der Bulk-Deposition bzw. des Staubbiederschlags in den ausgewerteten 15 Jahren (Abb. 1 bis 4) und der Cd-Konzentrationen in den

Schwebstäuben (Abb. 5 bis 8) läßt zunächst den Schluß zu, daß offenbar ein erheblicher Rückgang der Emissionen erreicht wurde. Auch wenn Meßstellen in unmittelbarer Nähe von Punktquellen, insbesondere von Zink- und Stahl-Hütten, nicht in die Grafiken aufgenommen wurden, so prägten diese doch auch die Depositionen auch in größeren ländlichen Gebieten, etwa im Landkreis Goslar in Niedersachsen oder in Riesa in Sachsen.

Nur für die beiden Mittelungszeiträume 1993 bis 1995 und 1996 bis 1998 erschien uns die Datenlage hinreichend für eine bundesweite Darstellung der Gesamt-Deposition. Zumindest für den letzten Mittelungszeitraum kann angenommen werden, daß die strukturellen Änderungen der Wirtschaft in Sachsen-Anhalt, Sachsen und Brandenburg zu einem Abschluß gekommen sind.

Die Gesamt-Depositionen bewegen sich gegenwärtig größenordnungsmäßig zwischen 1 und 2,5 g ha⁻¹ a⁻¹ Cd (Abb. 9 und 10) bei einer angenommenen Unsicherheit von ± 0,3 g ha⁻¹ a⁻¹ und unterschreiten damit die Angaben in Wilcke und Döhler (1995) von 2,5 g ha⁻¹ a⁻¹ im Flächenmittel deutlich. Die industriell geprägten Bundesländer Nordrhein-Westfalen, Thüringen und Sachsen heben sich merklich von den anderen Bundesländern ab. Die atmosphärischen Einträge liegen über den mittleren Einträgen mit Mineral- und Wirtschaftsdüngern (etwa 0,9 g ha⁻¹ a⁻¹ Cd, S. Schroetter, Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde der FAL, unveröffentlicht). Flächen, auf denen Klärschlämme ausgebracht werden, sind mit größenordnungsmäßig 2 bis 2,5 g ha⁻¹ a⁻¹ Cd belastet. Die

Annahme einer mittleren Belastung ist nicht praxisgerecht. Die Cd-Einträge mit Komposten lassen sich derzeit schlecht abschätzen. Ihr mittlerer Beitrag zur gegenwärtigen Cd-Bilanz ist gering. Die regelmäßige Ausbringung auf Entsorgungsflächen kann allerdings erhebliche Summen ergeben (4 bis 7 g ha⁻¹ a⁻¹, B. Osterburg, Institut für Betriebswirtschaft, Agrarstruktur und ländliche Räume der FAL, in Vorbereitung).

Überschlägige regionale Cd-Bilanzen ergeben, daß in einigen Bundesländern die Einträge aus der Atmosphäre und aus Mineral- und Wirtschaftsdüngern die Austräge mit dem Erntegut unterschreiten (Bayern, Niedersachsen, Saarland; Schroetter, unveröffentlicht). Es bleibt jedoch zu befürchten, daß insbesondere in Thüringen und Sachsen die Vorratsänderungen im Boden im Mittel zwar geringer sind, als bei Wilcke und Döhler (1995) angenommen, daß aber auch heute in einigen Bundesländern die Einträge die Austräge übersteigen und Cd weiterhin in landwirtschaftlich genutzten Böden angereichert wird.

Die modellierten Cd-Depositionen (Abb. 11) weichen deutlich von den aus Messungen abgeleiteten Depositionen ab; sie betragen nur ein Drittel bis ein Fünftel der Depositionen in Abb. 10. Die Abweichungen zwischen modellierten und gemessenen Werten werden in ganz Europa beobachtet. Sie werden bei Ilyin et al. (2000) ausführlich diskutiert und lassen den Schluß zu, daß gegenwärtig die Modelle nicht in der Lage sind, die Wirklichkeit realistisch abzubilden.

Tab. 3: Cd-Emissionen aus technischen Quellen in Deutschland. Angaben in kg a⁻¹ Cd (Umweltbundesamt 1997, 2000b)
Table 3: Cd emissions from technical sources in Germany in kg a⁻¹ Cd (Umweltbundesamt, 1997, 2000b)

| Quelle | SNAP 94 ¹⁾ | 1985 | 1990 | 1995 |
|--|-----------------------|-------|-------|-------|
| Verbrennungsprozesse in Energie- und Stoffumwandlung | 01 | 14250 | 7420 | 1923 |
| Nicht-industrielle Verbrennungsanlagen | 02 | 1000 | 770 | 500 |
| Verbrennungsanlagen in der verarbeitenden Industrie | 03 | 20150 | 14260 | 4540 |
| - Verbrennung in Kesseln, Gasturbinen etc. | 0301 | 8020 | 6010 | 140 |
| - Hochöfen (Eisen- & Stahlproduktion) | 030203 | 250 | 220 | 620 |
| - Kontakt-Prozesse | 0303 | 11880 | 8030 | 3780 |
| --- Sinteranlagen | 030301 | 1810 | 1680 | 1100 |
| --- Grauguß-Gießereien | 030303 | 580 | 180 | 40 |
| --- Primärblei-Verhüttung | 030304 | 7300 | 5300 | 2300 |
| --- Zementindustrie | 030311 | 1310 | 690 | 160 |
| --- Glasindustrie | 030315 | 880 | 180 | 180 |
| Produktionsprozesse in der Eisen- und Stahlherstellung | 0402 | 9480 | 8410 | 3750 |
| - Koks-Herstellung | 040201 | 1240 | 800 | 260 |
| - offene Herdverfahren | 040205 | 2000 | 2000 | 0 |
| - Blasstahl-Verfahren | 040206 | 980 | 700 | 560 |
| - Elektrostahlverfahren | 040207 | 5260 | 4910 | 2930 |
| Alle Bereiche | | 44880 | 30860 | 10713 |

¹⁾ Selected Nomenclature für Air Pollutants, vgl. EEA (1996)

Zukünftige Depositionen

Gegenwärtige Quellen für Cd-Emissionen

Cd stammt im wesentlichen aus der Verbrennung fossiler Brennstoffe. Die Emissionen aus Großfeuerungsanlagen betragen 1990 etwa 25 Mg a⁻¹, 1995 17 Mg a⁻¹ (Umweltbundesamt, 2000b). Allein in Westdeutschland wurde die Cd-Emission aus Kraftwerken für 1981 auf 14 Mg a⁻¹ geschätzt (Brumsack et al., 1984). Kleinf Feuerungen trugen 1990 und 1995 nur 1 Mg a⁻¹ zur Gesamtemission bei. Die stoffverarbeitenden Industrien emittierten 1990 noch 15 Mg a⁻¹, 1995 5 Mg a⁻¹ Cd (Umweltbundesamt, 2000b). Insbesondere die Verhüttung von Eisen stellt eine wichtige Quelle dar (Jockel, 1993; Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen, 2000) Die Prozesse zur Herstellung von Cd trugen hierzu mit 1 Mg a⁻¹ bei (Balzer, 1996; s. u.). Als einzige wichtige Emission nennt Balzer (1996) die Emission der Hütten. Die Emissionen bei Verarbeitung und Recycling sind demgegenüber gering.

Dieses Emissionskataster ist Grundlage von Ausbreitungs- und Depositionsmodellen, die innerhalb des Genfer Luftreinhalteabkommens zur Betrachtung grenzüberschreitender Luftverunreinigungen angewendet werden. Die Ergebnisse solcher Modellierungen für das Jahr 1996 sind in Abb. 11 dargestellt. Sie weichen erheblich von den gemessenen Depositionen ab. Entsprechendes gilt auch für die Cd-Konzentrationen im Aerosol (Ilyin et al., 2000). Der Grund hierfür kann nach Ilyin et al. (2000) nur darin bestehen, daß die Emissionskataster die Emissionen deutlich unterschätzen. Sie geben an, daß Cd-Emissionen, die von unterschiedlichen Experten im gleichen Jahr geschätzt wurden, um den Faktor 2,8 voneinander abweichen können. Bartnicki (1998) geht deshalb davon aus, daß die Cd-Emissionen in ganz Europa um etwa 50 % unterschätzt werden.

Maßnahmen zur Verbesserung der Luftqualität

In der Vergangenheit haben die Maßnahmen zur Verringerung der Belastung der Umgebungsluft bereits zur Folge gehabt, daß die nach TA Luft (1986) zulässigen mittleren Schwebstaub-Konzentrationen (IW1 = 0,15 mg m⁻³) bzw. nach Norm VDI 2310 (Jahresmittelwert 0,075 mg m⁻³) überall in Deutschland - auch in den Industrieregionen - unterschritten wurden. In der EU-Richtlinie 1999/30/EG (Europäische Gemeinschaft, 1999) über Grenzwerte für Schwefeldioxid, Stickoxide, partikelförmige Luftverunreinigungen und Blei in der Umgebungsluft, die bis zum 19.7.2001 in nationales Recht umzusetzen ist, wird festgelegt, daß am 1.1.2005 ein Jahresmittel von 40 µg m⁻³ (PM₁₀) nicht mehr überschritten werden, ein 24-h-Mittel von 50 µg m⁻³ nur an 35 Tagen im Jahr. Am 1.1.2010 sind diese Werte auf 20 µg m⁻³ (Jahresmittel) bzw. 50 µg m⁻³ als 24-h-Mittel, das nur noch an 7 Tagen im Jahr überschritten werden darf, deutlich weiter reduziert. Damit

erscheint es aus heutiger Sicht geboten, „in Belastungsschwerpunkten Feinstaubquellen und deren Immissionsbeiträge zu identifizieren und Minderungsmaßnahmen aufzuzeigen“ (Bröker et al., 2000).

Es ist daher wie in der Vergangenheit aus Gründen, die nicht originär mit der Vermeidung von Cd-Emissionen zusammenhängen (vgl. Umweltbundesamt, 1994), wahrscheinlich, daß die Belastung landwirtschaftlicher Flächen mit atmosphärischen Cd-Depositionen weiter zurückgehen wird und in etwa 10 Jahren auf einem Niveau, das Größenordnungsmäßig der Hälfte des derzeitigen Niveaus entspricht, liegen wird.

Dank

Die Arbeit faßt Meßdaten zusammen, die von zahlreichen Anstalten und Ämtern gemessen und zusammengestellt wurden. Hinter jedem entsprechenden Zitat steckt in der Regel eine Kollegin oder ein Kollege, die bzw. der es auf sich nahm, uns die Daten zu übermitteln. Mancher klärende Anruf war notwendig. Hilfsbereitschaft war stets über die eigentliche Auskunft selbst gegeben. Wir möchten allen, die daran mitgewirkt haben, daß dieser Bericht zustande kam, herzlich danken.

Das Umweltbundesamt, Berlin, hat uns bei den Recherchen und den Bewertungen in vielfältiger Weise und schnell geholfen. Danken möchten wir insbesondere Frau Huck und Frau Dreher.

Herr Dr. Gauger vom Institut für Navigation der Universität Stuttgart hat uns vor allem zu Beginn viele Türen zu Institutionen, die Depositionen messen, geöffnet. Hierfür danken wir herzlich.

Herr Dr. Lux vom Institut für Forstökologie und Walderfassung der Bundesanstalt für Forst- und Holzwirtschaft in Eberswalde hat dankenswerterweise Depositionsdaten für die Dauerbeobachtungsflächen zur Umweltkontrolle im Wald – Level II - zusammengestellt und übermittelt.

Literatur

- Balázs, Á. (1991): Niederschlagsdeposition in Waldgebieten des Landes Hessen. Ergebnisse der „Waldökosystemstudie Hessen“. Hessisches Ministerium für Landesentwicklung, Wohnen, Landwirtschaft, Forsten und Naturschutz. Forschungsber. Hessische Forstliche Versuchsanstalt 11, 120 S.
- Balázs, Á. (1998): 14 Jahre Niederschlagsdeposition in Hessischen Waldgebieten. Ergebnisse von den Meßstationen der Waldökosystemstudie Hessen. Hessische Landesanstalt für Forsteinrichtung, Waldforschung und Waldökologie. Forschungsbericht, Bd 25. Hessische Landesanstalt für Forsteinrichtung, Waldforschung und Waldökologie. Hannoversch Münden, 129 S.
- Balzer, D. (1996): Eintrag von Blei, Cadmium und Quecksilber in die Umwelt. Bilanzen über Verbrauch und Verbleib. Bd 1. Blei und Cadmium. Forschungsber. 106 01 047 für das Umweltbundesamt. Landesgewerbeanstalt Bayern, Nürnberg, 95 S.
- Bartnicki, J. (1998): Heavy Metals Eulerian Transport Model – HMET. Model Description and Results. Norwegian Meteorological Institute, Oslo. Report 65, 286 S.
- Bayerisches Landesamt für Umweltschutz (2000a), schriftl. Mitteilung Bayerisches Landesamt für Umweltschutz (2000b), mündl. Mitteilung BBodSchG (1998): Gesetz zum Schutz vor schädlichen Bodenveränderungen und zur Sanierung von Altlasten (Bundes-Bodenschutzgesetz – BBodSchG) vom 17. März 1998, BGBl 1/1998, 502
- BBodSchV (1999): Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV) vom 12. Juli 1999, BGBl 1/1999:1554
- Berdowski, J.J.M., Veldt, C., Baas, J., Bloos, J.P.J., Klein, A.E. (1995): Technical Paper to the OSPARCOM-HELCOM-UNECE Emission Inventory of Heavy Metals and Persistent Organic Pollutants. TNO-Report TNO-MEP – R 95/247. TNO Institute of Environmental Sciences, Energy Research and Process Innovation, Delft, 42 S.
- BGVV (Bundesinstitut für gewerblichen Verbraucherschutz und Veterinärmedizin) (Hrsg.) (1997): Richtwerte für Schadstoffe in Lebensmitteln. Bundesgesundheitsblatt 40, 182-184
- Boysen, P. (1992): Schwermetalle und andere Schadstoffe in Düngemitteln – Literaturswertung und Analysen. Umweltbundesamt, Berlin, Texte 55/92, 54 S. zzgl. Anhänge
- Bröker, G., Bruckmann, P., Geucke, K.-J., Hoffmann, V., Pfeffer, H.-U., Schmidt, W., Termath, S. (2000): Feinstaubemissionen – eine Herausforderung für die Luftreinhaltung. Landesumweltamt NRW, Jahresbericht 99, <http://www.lua.nrw.de/jab99/jab99a15.htm>
- Bruckmann, P., Pfeffer, H.-U. (1992): Langjährige Entwicklung der Luftqualität in urbanen Gebieten am Beispiel des Ballungsraums Rhein-Ruhr. VDI-Ber. 952, 151-166
- Brumsack, H., Heinrichs, H., Lange, H. (1984): West German coal power plants as sources of potentially toxic emissions. Environ. Technol. Lett. 5, 7-22
- Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft, Institut für Forstökologie und Walderfassung (2000), schriftl. Mitt.
- Cawse, P.A. (1982): Inorganic Particulate Matter in the Atmosphere. Environmental Chemistry 2, 1-69. The Royal Society of Chemistry, London, Specialist Periodical Report
- Dämmgen, U. (1986): Schwebstaub-Konzentrationen im Raum Königs-lutter östlich von Braunschweig. Braunschweiger Naturk. Schr. 2, 595-606
- Dämmgen, U., Grünhage, L., Küsters, A., Scholz-Seidel, C., Jäger, H.-J. (1996): Flußdichten sedimentierender Partikel. I. Depositionen anorganischer Spezies. Landbauforschung Völkenrode Sonderheft 170, 103-153
- Dämmgen, U., Scholz-Seidel, C., Zimmerling, R. (2000): Die Qualität von Messungen der Bulk-Deposition anorganischer Spezies. In: Grünhage, L., Hanewald, K., Jäger, H.-J., Ott, W. (Hrsg.): Auswirkungen dynamischer Veränderungen der Luftzusammensetzung und des Klimas auf terrestrische Ökosysteme in Hessen. III. Umweltbeobachtungs- und Klimafolgenforschungsstation Linden. Berichtszeitraum 1996 – 1999. Umweltplanung, Arbeits- und Umweltschutz 274, 130-177
- Dämmgen, U., Weigel, H.-J. (2000): Stoffliche Belastung von Atmosphäre und Boden bei der Landbewirtschaftung. Landbauforschung Völkenrode Sonderheft 212, 133-152
- Dams, R., De Jonge, J. (1976): Chemical composition of Swiss aerosols from the Jungfrauoch. Atmos. Environ. 10, 1079-1084
- Davidson, C.I. (1980): Dry deposition of cadmium from the atmosphere. In: Nriagu, J.O. (Hrsg.): Cadmium in the Environment. Part 1. Ecological Cycling. Wiley, New York, S. 115-139
- Davidson, C.I., Wu, Y.-L. (1990): Dry Deposition of Particles and Vapors. In: Lindberg, S.E., Page, A.L., Norton, S.A. (Hrsg.): Acidic Precipitation. Vol. 3: Sources, Deposition and Canopy Interactions. Springer, New York, S. 103-216
- Davidson, R.L., Natusch, D.F.S., Wallace, J.R. (1974): Trace Elements in Fly Ash. Dependence of Concentration on Particle Size. Environ. Sci. Technol. 8, 1107-1113
- Duyzer, J.H., Bosveldt, F. (1986): Meting van droge depositie van luchtverontreiniging. Interim-rapport. TNO Hoofdgroep Maatschappelijke Technologie, Delft, 56 S.
- DVWK (Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau) (Hrsg.) (1994): Grundsätze zur Ermittlung der Stoffdeposition. DVWK-Merkblätter zur Wasserwirtschaft 229, Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas u. Wasser, Bonn
- EEA (European Environment Agency) (1996): AIR. Joint EMEP/CORINAIR Atmospheric Emission Inventory Guidebook, 1. Aufl., CD-ROM, Kopenhagen
- ERM (Environmental Resources Management) (1999): Study on Data Requirements and Programme for Data Production and Gathering to Support a Future Evaluation of the Risks to Health and The Environment From Cadmium in Fertilisers. Schlußbericht für die Europäische Kommission, DG III, 71 S. zzgl. Anhänge
- Europäische Gemeinschaft (1999): Richtlinie 1999/30/EG des Rates vom 22. April 1999 über Grenzwerte für Schwefeldioxid, Stickstoffdioxid und Stickstoffoxide, Partikel und Blei in der Luft. Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften L 163/41 vom 29.6.99
- Fergusson, J.E., Stewart, C. (1992): The transport of airborne trace elements copper, lead, cadmium, zinc and manganese from a city into rural areas. Sci. Total Environ. 121, 247-269
- Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg, Freiburg (2000), schriftl. Mitt.
- Freie und Hansestadt Hamburg, Umweltbehörde (1997): Ergebnisse der Staubniederschlags- und Schwebstaubmessungen mit anschließender Bestimmung von Staubinhaltsstoffen im Zeitraum 1993 bis 1997 in Hamburg. Hamburger Umweltberichte 54/97.

- Freie und Hansestadt Hamburg, Umweltbehörde (2000): Schwermetalldepositionen in ausgewählten Meßgebieten. http://www.hamburg.de/Behoerden/Umweltbehoerde/duawww/dea8/22/f2_75e6.htm
- Friedland, A.J. (1989): The movement of metals through soils and ecosystems. In: Shaw, A.J. (Hrsg.): *Heavy Metal Tolerance in Plants: Evolutionary Aspects*. CRC, Boca Raton, S. 7-19
- Galloway, J.N., Likens, G.E. (1976): Calibration of collection procedures for the determination of precipitation chemistry. *Water Air Soil Pollut.* 6, 241-258
- Georgii, H.-W., Perseke, C., Rohbock, E. (1982): Feststellung der Deposition von sauren und langzeitwirksamen Luftverunreinigungen aus Belastungsgebieten. Abschlußbericht Projekt 104 02 600 für das Umweltbundesamt, Inst. für Meteorologie und Geophysik der Universität Frankfurt/Main, 205 S.
- GfA (Gesellschaft für Arbeitsplatz- und Umweltanalytik mbH) (1993a): Immissionsbelastung durch schwebstaubgebundene Schwermetalle im Bundesland Hessen im Jahr 1990. GfA-Ber. 62100-035 B 02 für das Hessische Landesamt für Umwelt und Geologie, Gesellschaft für Arbeitsplatz- und Umweltanalytik mbH, Münster-Roxel, 117 S.
- GfA (Gesellschaft für Arbeitsplatz- und Umweltanalytik mbH) (1993b): Immissionsbelastung durch schwebstaubgebundene Schwermetalle im Bundesland Hessen im Jahr 1991. GfA-Ber. 62100-035 B 03 für das Hessische Landesamt für Umwelt und Geologie, Gesellschaft für Arbeitsplatz- und Umweltanalytik mbH, Münster-Roxel, 139 S.
- GfA (Gesellschaft für Arbeitsplatz- und Umweltanalytik mbH) (1993c): Immissionsbelastung durch schwebstaubgebundene Schwermetalle im Bundesland Hessen im Jahr 1992. GfA-Ber. 62100-035 B 04 für das Hessische Landesamt für Umwelt und Geologie, Gesellschaft für Arbeitsplatz- und Umweltanalytik mbH, Münster-Roxel, 152 S.
- GfA (Gesellschaft für Arbeitsplatz- und Umweltanalytik mbH) (1994): Immissionsbelastung durch schwebstaubgebundene Schwermetalle im Bundesland Hessen im Jahr 1993. GfA-Ber. 62100-035 B 05 für das Hessische Landesamt für Umwelt und Geologie, Gesellschaft für Arbeitsplatz- und Umweltanalytik mbH, Münster-Roxel, 105 S.
- GfA (Gesellschaft für Arbeitsplatz- und Umweltanalytik mbH) (1995): Immissionsbelastung durch schwebstaubgebundene Schwermetalle im Bundesland Hessen im Jahr 1994. GfA-Ber. 62100-035 B 06 für das Hessische Landesamt für Umwelt und Geologie, Gesellschaft für Arbeitsplatz- und Umweltanalytik mbH, Münster-Roxel, 103 S.
- GfA (Gesellschaft für Arbeitsplatz- und Umweltanalytik mbH) (1996): Immissionsbelastung durch schwebstaubgebundene Schwermetalle im Bundesland Hessen im Jahr 1995. GfA-Ber. 62100-035 B 07 für das Hessische Landesamt für Umwelt und Geologie, Gesellschaft für Arbeitsplatz- und Umweltanalytik mbH, Münster-Roxel, 102 S.
- GfA (Gesellschaft für Arbeitsplatz- und Umweltanalytik mbH) (1997): Immissionsbelastung durch schwebstaubgebundene Schwermetalle im Bundesland Hessen im Jahr 1996. GfA-Ber. 62100-035 B 08 für das Hessische Landesamt für Umwelt und Geologie, Gesellschaft für Arbeitsplatz- und Umweltanalytik mbH, Münster-Roxel, 87 S.
- GfA (Gesellschaft für Arbeitsplatz- und Umweltanalytik mbH) (1998): Immissionsbelastung durch schwebstaubgebundene Schwermetalle im Bundesland Hessen im Jahr 1997. GfA-Ber. 62100-035 B 09 für das Hessische Landesamt für Umwelt und Geologie, Gesellschaft für Arbeitsplatz- und Umweltanalytik mbH, Münster-Roxel, 94 S.
- GfA (Gesellschaft für Arbeitsplatz- und Umweltanalytik mbH) (1999): Immissionsbelastung durch schwebstaubgebundene Schwermetalle im Bundesland Hessen im Jahr 1998. GfA-Ber. 62100-035 B 10 für das Hessische Landesamt für Umwelt und Geologie, Gesellschaft für Arbeitsplatz- und Umweltanalytik mbH, Münster-Roxel, 94 S.
- GfA (Gesellschaft für Arbeitsplatz- und Umweltanalytik mbH) (2000): Immissionsbelastung durch schwebstaubgebundene Schwermetalle im Bundesland Hessen im Jahr 1999. GfA-Ber. 62100-035 B 14 für das Hessische Landesamt für Umwelt und Geologie, Gesellschaft für Arbeitsplatz- und Umweltanalytik mbH, Münster-Roxel, 96 S.
- Giesy, J.P. (1980): Cadmium interactions with naturally occurring organic ligands. In: Nriagu, J.O. (Hrsg.): *Cadmium in the Environment. Part 1. Ecological Cycling*. Wiley, New York, S. 237-256
- Grefen, K., Heinz, J., Helber, J., Peters, F. (1984): *Schwermetalle in der Umwelt. Grundsatzstudie im Auftrag des BMI und des UBA. F+E-Vorhaben I0403186. VDI-Kommission Reinhaltung der Luft, Düsseldorf*
- Hamburger Umweltbehörde (2000): Schwermetalldeposition in ausgewählten Meßgebieten. http://www.Hamburg.de/Behoerden/Umweltbehoerde/duawww/dea8/22/f2_75e6.htm
- Hantschel, R., Kaupenjohann, M., Schaaf, W., Horn, R., Zech, W. (1985): Wasser- und Elementtransport in unterschiedlich gedüngten, geschädigten Waldökosystemen. *Mitt. Dtsch. Bodenkdl. Ges.* 43, 963-968
- Harrison, R.M., Jones, M. (1995): The chemical composition of airborne particles in the UK atmosphere. *Sci. Total Environ.* 168, 195-214
- Hartwig-Hanitz, B., Dämmgen, U., Küsters, A., Grünhage, L., Jäger, H.-J. (1996): Konzentrationen von Luftinhaltsstoffen. III. Schwebstaub-inhaltsstoffe (Schwermetalle). *Landbauforschung Völknerode Sonderheft* 170, 274-291
- Heinrichs, H., Mayer, R. (1977): Distribution and Cycling of Major and Trace Elements in Two Central European Forest Ecosystems. *J. Environ. Qual.* 6, 402-407
- Heinrichs, H., Mayer, R. (1980): The Role of Forest Vegetation in the Biogeochemical Cycle of Heavy Metals. *J. Environ. Qual.* 9, 111-118
- Heits, B., Israel, G.W. (1982): Physikalische und chemische Charakterisierung des innerstädtischen Schwebstaubs. *Staub Reinh. Luft* 42, 347-355
- Hessische Landesanstalt für Umwelt (1996): Immissionsbericht Hessen 1996, *Umweltplanung Arbeits- und Umweltschutz* 210, 127 S.
- Hessische Landesanstalt für Umwelt und Geologie (Hrsg.) (2000): *Schwebstaubbelastung in Hessen 1983 bis 1998*. Im Druck
- Hlavay, J., Polyák, K., Bódog, K., Molnár, Á., Mészáros, E. (1996): Distribution of trace elements in filter-collected aerosol samples. *Fres. Z. Anal. Chem.* 354, 227-232
- Höfken, K.-D., Georgii, H.-W., Gravenhorst, G. (1981): Untersuchungen über die Deposition atmosphärischer Spurenstoffe an Buchen- und Fichtenwald. *Ber. Inst. für Meteorologie und Geophysik, Universität Frankfurt/Main* 46, 141 S. zzgl. Anhang
- Höfken, K.D., Meixner, F.X., Ehhalt, D.H. (1983): Deposition of atmospheric trace constituents onto different natural surfaces. In: Pruppacher, H.R., Semonin, R.G., Slinn, W.G.N. (Hrsg.): *Precipitation Scavenging, Dry Deposition and Resuspension, Vol. 2. Dry Deposition and Resuspension*. Elsevier, New York, S. 825-835
- Horvath, H., Kasahara, M., Pesava, P. (1996): The size distribution and composition of the atmospheric aerosol at a rural and a nearby urban location. *J. Aerosol Sci.* 27, 417-435
- Iburg, J., Fritsche, U., Eiden, R., Marfels, H. (1992): Anorganische partikelförmige Bestandteile in der Außenluft. *Zeitliche und örtliche*

- Verteilung an repräsentativen Standorten in Baden-Württemberg. Staub Reinh. Luft 52, 233-238
- Ilyin, I., Ryaboshapko, A., Travnikow, O., Berg, T., Hjellbrekke, A.-G., Larsen, R. (2000): Heavy Metal Transboundary Pollution in Europe: Monitoring and Modelling Results for 1997 and 1998. EMEP Report 3/2000, Meteorological Synthesizing Centre – East, Moskau, 139 S.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (1996): Reporting The National Inventory. In: Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Vol. I. Greenhouse Gas Inventory Reporting Instructions. IPCC WGI Technical Support Group, Bracknell, S. 2.3
- Isermann, K. (1992): Cadmium-Ökobilanz der Landwirtschaft. In: Die biologische Bedeutung der Mengen und Spurenelemente. Mengen- und Spurenelemente. Ber. der 12. Arbeitstagung der Friedrich-Schiller-Universität Jena. Universität Jena, S. 200-208
- Jockel, W. (1993): Schwermetallemissionen in die Atmosphäre. Entsorgungspraxis 93(10), 716-721
- Köhler, A., Fleck, W. (1966): Vergleichende Staubniederschlags- und Staubkonzentrationsmessungen. Staub Reinh. Luft 26, 105-110
- Landesamt für Natur und Umwelt des Landes Schleswig-Holstein (2000): Zusammenfassende Mitteilung der Jahreswerte der Bulk-Deposition aus dem Niederschlagsmeßnetz. Landesamt für Natur und Umwelt des Landes Schleswig-Holstein, Flintbek
- Landesamt für Umwelt, Naturschutz und Geologie Mecklenburg-Vorpommern (2000), Abteilung Immissions- und Klimaschutz, schriftl. Mitt.
- Landesamt für Umweltschutz Sachsen-Anhalt (1996): Immissionschutzbericht 1995. Ber. Landesamt für Umweltschutz Sachsen-Anhalt 19, 179 S.
- Landesamt für Umweltschutz Sachsen-Anhalt (1997): Immissionschutzbericht 1996. Ber. Landesamt für Umweltschutz Sachsen-Anhalt 22, 100 S. zzgl. Tabellen, Abbildungen
- Landesamt für Umweltschutz Sachsen-Anhalt (1998): Immissionschutzbericht 1997. Ber. Landesamt für Umweltschutz Sachsen-Anhalt 27, 100 S. zzgl. Tabellen, Abbildungen
- Landesamt für Umweltschutz Sachsen-Anhalt (1999): Immissionschutzbericht 1998. Ber. Landesamt für Umweltschutz Sachsen-Anhalt 31, 120 S. zzgl. Tabellen, Abbildungen
- Landesanstalt für Ökologie, Bodenordnung und Forsten, Recklinghausen (LÖBF) (2000), schriftl. Mitt.
- Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft Gotha (2000), schriftl. Mitt.
- Landesforstanstalt Eberswalde (2000), schriftl. Mitt.
- Landesumweltamt Brandenburg (1993): Luftqualität in Brandenburg. Jahresbericht 1992. Landesumweltamt Brandenburg, Potsdam, 76 S.
- Landesumweltamt Brandenburg (1994): Luftqualität in Brandenburg. Jahresbericht 1993. Landesumweltamt Brandenburg, Potsdam, 88 S.
- Landesumweltamt Brandenburg (1995a): Luftqualität in Brandenburg. Jahresbericht 1994. Landesumweltamt Brandenburg, Potsdam, 129 S.
- Landesumweltamt Brandenburg (1995b): Luftqualität 1975 bis 1990. Studien und Tagungsberichte Band 5. Landesumweltamt Brandenburg, Potsdam, 112 S.
- Landesumweltamt Brandenburg (1996): Luftqualität in Brandenburg. Jahresbericht 1995. Landesumweltamt Brandenburg, Potsdam, 119 S.
- Landesumweltamt Brandenburg (1997): Luftqualität in Brandenburg. Jahresbericht 1996. Landesumweltamt Brandenburg, Potsdam, 80 S.
- Landesumweltamt Brandenburg (1998): Luftqualität in Brandenburg. Jahresbericht 1997. Landesumweltamt Brandenburg, Potsdam, 84 S.
- Landesumweltamt Brandenburg (1999): Luftqualität in Brandenburg. Jahresbericht 1998. Landesumweltamt Brandenburg, Potsdam, 62 S.
- Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen (1996): Luftqualität in Nordrhein-Westfalen. Diskontinuierliche Luftqualitätsmessungen. LIMES-Jahresbericht 1994. Reihe B – Schwebstaub und Inhaltsstoffe, Kohlenwasserstoffe. Landesumweltamt Nordrhein-Westf., Essen, 142 S.
- Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen (1997a): Luftqualität in Nordrhein-Westfalen. LUQS-Jahresbericht 1997. Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen, Essen, 122 S.
- Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen (1997b): Luftqualität in Nordrhein-Westfalen. Diskontinuierliche Luftqualitätsmessungen. LIMES-Jahresbericht 1995 und Sondermessungen, 1. Halbjahr 1996. Reihe A – Staubbiederschlag und Inhaltsstoffe. Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen, Essen, 56 S. zzgl. Karten
- Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen (1997c): Luftqualität in Nordrhein-Westfalen. Diskontinuierliche Luftqualitätsmessungen. LIMES-Jahresbericht 1996. Reihe B – Schwebstaub und Inhaltsstoffe, Kohlenwasserstoffe. Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen, Essen, 151 S.
- Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen (1999a): Luftqualität in Nordrhein-Westfalen. LUQS-Jahresbericht 1997. Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen, Essen, 122 S.
- Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen (1999b): Luftqualität in Nordrhein-Westfalen. LUQS-Jahresbericht 1998. Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen, Essen, 84 S.
- Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen (2000): NRW-Emissionskataster LUFT 1996/1997. http://www.lua.nrw.de/emikat97/ekl_info/3i000000.htm
- Laskus, L., Bake, D. (1976): Erfahrungen bei der Korngrößenanalyse von Luftstäuben mit dem Andersen-Impaktor. Staub Reinh. Luft 36, 102-106
- Laskus, L., Bake, D., Kura, L., Möller, M. (1979): Konzentration und Korngrößenverteilung von Inhaltsstoffen im Luftstaub deutscher Städte. WaBoLu-Ber. 1979(2), 24 S. zzgl. Anhang
- Laskus, L., Bake, D., König, R., van der Meulen, A., van Elzakker, B.G. (1989): Measurements of particle size distribution and dust concentration. Staub Reinh. Luft 49, 395-400
- Lehmhaus, J., Eckermann, U., Pommerening, C. (1998): Atmosphärische Stoffeinträge in Schleswig-Holstein. Sonderbericht Nr. 8 der Lufthygienischen Überwachung Schleswig-Holstein (aktualisierte Fassung). Staatliches Umweltamt Itzehoe, 84 S.
- Marquardt, D., Lüderitz, P., Leppin, S. (1990): Untersuchungen der Immission von Schwermetallen mit dem Staubbiederschlag in verschiedenen Regionen der DDR. Ergebnisse einer landesweiten Untersuchung an 144 Meßpunkten (1983-1988). Z. gesamte Hyg. 36, 484-488
- Marschner, B., Stahr, K., Renger, M. (1991): Element Inputs and Canopy Interactions in two Pine Forest Ecosystems in Berlin, Germany. Z. Pflanz. Bodenk. 154, 147-151
- Matschullat, J., Bozau, E. (1996): Atmospheric element input in the Eastern Ore Mountains. Appl. Geochem. 11, 149-154
- Mayer, R. (1983): Schwermetalle in Waldökosystemen der Lüneburger Heide. Mitt. Dtsch. Bodenkdl. Ges. 38, 251-256.

- Mayer, R., Rastin, N., Ulrich, B. (1985): Belastung der Landesforsten Hamburg durch Deposition von Schwermetallen. II. Depositionsraten und Austrag mit dem Sickerwasser. In: Bodenzustand und Depositionsbelastung von Waldökosystemen im Forstamt Hamburg. Ber. Forschungszentrum Waldökosysteme/Waldsterben der Universität Göttingen 10, S. 332-343
- Meiwes, K.J. (1984): Arbeitsbericht zur bodenkundlichen Grundaufnahme, zum chemischen Bodenzustand und zur Bodeninventur in einem Buchenwaldökosystem auf Kalkgestein im Projekt der DFG Nr. BE 713/8-1. Abt. Bodenkunde Waldernährung der Universität Göttingen
- Mench, M.J. (1998): Cadmium availability to plants in relation to major long-term changes in agronomy systems. *Agric. Ecosys. Environ.* 67, 175-187
- Ministerium für Bau, Landesentwicklung und Umwelt Mecklenburg-Vorpommern (1996): Luftgütebericht 1994/1995. Landesamt für Umwelt und Natur, Gülzow, 80 S.
- Ministerium für Raumordnung, Landwirtschaft und Umwelt des Landes Sachsen-Anhalt (Hrsg.) (1996): Luftreinhalteplan Untersuchungsgebiet 9 – Großraum Halle-Merseburg. Band 2: Immissions- und Wirkungskataster, 260 S.
- Ministerium für Raumordnung und Umwelt des Landes Sachsen-Anhalt (Hrsg.) (1998): Luftreinhalteplan Untersuchungsgebiet 9 – Großraum Dessau-Wittenberg-Bitterfeld. Band 2: Immissions- und Wirkungskataster, 217 S.
- Ministerium für Umwelt und Naturschutz des Landes Sachsen-Anhalt (Hrsg.) (1994): Luftreinhalteplan Untersuchungsgebiet 10 - Großraum Halle-Hohemölsen-Weißenfels-Zeitz. 2: Immissions- und Wirkungskataster, 287 S.
- Müller, J., Beilke, S. (1977): Wet removal of heavy metals from the atmosphere. *Proc. of the International Conference on Heavy Metals in the Environment*, 27.-31.10.1975. Institute for Environmental Studies, Toronto, S. 987-999
- Nicholson, K.W. (1988): The dry deposition of small particles: a review of experimental measurements. *Atmos. Environ.* 22, 2653-2666
- Nicholson, F.A., Jones, K.C. (1994): Effect of Phosphate Fertilizers and Atmospheric Deposition on Long-Term Changes in the Cadmium Content of Soils and Crops. *Environ. Sci. Technol.* 28, 2170-2175
- Nicholson, F.A., Jones, K.C., Johnston, A.E. (1995): The significance of the retention of atmospherically deposited cadmium on plant surfaces to the cadmium content of herbage. *Chemosphere* 31, 3043-3049
- Niedersächsische Forstliche Versuchsanstalt Göttingen (2000), schriftl. Mitt.
- Niedersächsischer Minister für Bundesangelegenheiten (Hrsg.) (1985): Umweltschutz in Niedersachsen. Reinhaltung der Luft 8. Hannover, 231 S.
- Niedersächsisches Landesamt für Ökologie (1997): Lufthygienisches Überwachungssystem Niedersachsen. Jahresbericht 1996. o.O., 100 S.
- Niedersächsisches Landesamt für Ökologie (1998a): Lufthygienisches Überwachungssystem Niedersachsen. Jahresbericht 1997. o.O., 98 S.
- Niedersächsisches Landesamt für Ökologie (1998b): 20 Jahre Lufthygienisches Überwachungssystem Niedersachsen. Datenkatalog zur Luftgüte in Niedersachsen 1978 – 1997. Nachhaltiges Niedersachsen 7. Niedersächsisches Landesamt für Ökologie, Hildesheim, 45 S. zzgl. Anlagen.
- Niedersächsisches Landesamt für Ökologie (1999): Lufthygienisches Überwachungssystem Niedersachsen. Jahresbericht 1998. o.O., 98 S.
- Niedersächsisches Landesamt für Ökologie (2000a), schriftl. Mitt. Giesen
- Niedersächsisches Landesamt für Ökologie (2000b), schriftl. Mitt. Jankowski
- Niehus, B., Brüggemann, L. (1995): Untersuchungen zur Deposition luftgetragener Stoffe in der Dübener Heide. *Beitr. Forstwirtschaft Landschaftsökologie* 29, 160-163
- Norm DIN 1319, Teil 1 (1995): Grundbegriffe der Meßtechnik; Messen, Zählen, Prüfen. Beuth, Berlin, 35 S.
- Norm DIN EN 1179 (1995): Zink und Zinklegierungen. Primärzink. Beuth, Berlin, 4 S.
- Norm DIN EN 1774 (1997): Zink und Zinklegierungen. Gußlegierungen. In Blockform und in flüssiger Form. Beuth, Berlin, 6 S.
- Norm LAWA (Länderarbeitsgemeinschaft Wasser) (Hrsg.) (1996): Atmosphärische Deposition. Richtlinie für Beobachtung und Auswertung der Niederschlagsbeschaffenheit. Entwurf Juli 1996. Senatverwaltung für Stadtentwicklung, Umweltschutz und Technologie Berlin, 78 S.
- Norm UN/ECE (United Nations Economic Commission for Europe) (1994): International Co-operative Programme on Assessment and Monitoring of Air Pollution Effects on Forests. Manual on methods and criteria for harmonized sampling, assessment, monitoring and analysis of the effects of air pollution on forests. 3. Aufl., Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft, Hamburg, 177 S.
- Norm VDI 2119, Bl. 2 (1972): Messung partikelförmiger Niederschläge. Bestimmung des partikelförmigen Niederschlages mit dem Bergerhoff-Gerät (Standardverfahren). VDI, Düsseldorf, 4 S.
- Norm VDI 2119, Bl. 2 (1996): Messung partikelförmiger Niederschläge. Bestimmung des Staubniederschlages mit Auffanggefäßen aus Glas (Bergerhoff-Verfahren) oder Kunststoff. VDI, Düsseldorf, 12 S.
- Norm VDI 2310, Bl. 19 (1992): Maximale Immissions-Werte zum Schutze des Menschen. Maximale Immissions-Konzentration für Schwebstaub. Beuth, Berlin, 67 S.
- Norm VDI 2449, Bl. 1 (1995): Prüfkriterien von Meßverfahren. Ermittlung der Verfahrenskenngrößen für die Messung gasförmiger Schadstoffe (Immission). VDI, Düsseldorf, 45 S.
- Norm VDI 2449, Bl. 2 (1987): Grundlagen zur Kennzeichnung vollständiger Meßverfahren. Begriffsbestimmungen. VDI, Düsseldorf, 6 S.
- Norm VDI 3870, Bl. 1(1985): Messen von Regeninhaltsstoffen; Kriterien für Aufbau, Aufstellung und Betrieb von Regensammlern. Beuth, Berlin, 4 S.
- Norm WMO (World Meteorological Organization) (1971): WMO Operations Manual for Sampling and Analysis Techniques for Chemical Constituents in Air and Precipitation. *J. Air Pollut. Contr. Assoc.* 299, 1-23
- Nriagu, J.O. (1979): Global inventory of natural and anthropogenic emissions of trace metals to the atmosphere. *Nature* 279, 409-411
- Nriagu, J.O. (1980): Production, uses and properties of cadmium. In: Nriagu, J.O. (Hrsg.): *Cadmium in the Environment. Part 1. Ecological Cycling*. Wiley, New York., S. 35-70
- Nriagu, J.O. (1989): A global assessment of natural sources of atmospheric trace metals. *Nature* 338, 47-49
- Nürnberg, H.W., Nguyen, V.D., Valenta, P. (1984): Deposition von Säure und toxischen Schwermetallen mit den Niederschlägen in der

- Bundesrepublik Deutschland. Jahresber. Kernforschungsanlage Jülich 1982/83, S. 41-53
- Nürnberg, H.W., Nguyen, V.D., Valenta, P. (1985): Deposition von Säure und ökotoxischen Schwermetallen mit den Niederschlägen in der Bundesrepublik Deutschland. Beiträge des Symposiums „Schwermetalle und saure Depositionen“ Bielefelder ökologische Beiträge, Bd 1
- Nürnberg, H.W., Valenta, P., Nguyen, V.D. (1982): Wet deposition of toxic metals from the atmosphere in the Federal Republic of Germany. In: Georgii, H.-W., Pankrath, J. (Hrsg.): Deposition of Atmospheric Pollutants. Reidel, Dordrecht, S. 143-157
- Oldiges, H., Fabig, W. (1989): Effekte niedriger Schadgasbelastung auf Klonfichten in Open-Top-Kammern und auf Freiflächen. UBA-FB 96-040, FKZ 10803046/01, 3 Bde, 562 S.
- Rojas, C.M., Injuk, J., Van Grieken, R.E., Laane, R.W. (1993): Dry and wet deposition fluxes of Cd, Cu, Pb and Zn into the southern bight of the North Sea. *Atmos. Environ.* 27A, 251-259
- Ruppert, H. (1975) Geochemical investigations on atmospheric precipitation in a medium-sized city (Göttingen, FRG). *Water Air Soil Pollut.* 4, 447-460
- Sächsisches Landeamt für Umwelt und Geologie (Hrsg.) (1997): Materialien zur Luftreinhaltung 1997. Jahresbericht zur Immissionssituation 1996. Lößnitz-Druck, Radebeul, 66 S.
- Sächsisches Landeamt für Umwelt und Geologie (Hrsg.) (1998): Materialien zur Luftreinhaltung 1998. Jahresbericht zur Immissionssituation 1997. Lößnitz-Druck, Radebeul, 63 S.
- Sächsisches Landeamt für Umwelt und Geologie (Hrsg.) (1999): Materialien zur Luftreinhaltung. Jahresbericht zur Immissionssituation 1998. Lößnitz-Druck, Radebeul, 70 S.
- Sartorius, R., Seifert, B., Vahrenholt, F. (1977): Emissionsquellen und Immissionssituation für Cadmium in der Bundesrepublik Deutschland. *Staub Reinh. Luft* 37, 422-426
- Schladot, J.D., Nürnberg, H.W. (1982): Atmosphärische Belastung durch toxische Metalle in der Bundesrepublik Deutschland. Emission und Deposition. Ber. Forschungsprojekt 10402 605/B im Auftrag des Umweltbundesamtes. Jül - 1776, KFA Jülich, 80 S.
- Scholz-Seidel, C., Dämmgen, U. (2000): Depositionen sedimentierender anorganischer Luftinhaltsstoffe (Januar 1996 bis Dezember 1998). In: Grünhage, L., Hanewald, K., Jäger, H.-J., Ott, W. (Hrsg.): Auswirkungen dynamischer Veränderungen der Luftzusammensetzung und des Klimas auf terrestrische Ökosysteme in Hessen. III. Umweltbeobachtungs- und Klimafolgenforschungsstation Linden. Berichtszeitraum 1996 - 1999. *Umweltplanung, Arbeits- und Umweltschutz* 274, 178-195
- Schütze, G., Nagel, H.-D. (1998): Kriterien für die Erarbeitung von Immissionsminderungszielen zum Schutz der Böden und Abschätzung der langfristigen räumlichen Auswirkungen anthropogener Stoffeinträge auf die Bodenfunktion. Umweltbundesamt, Berlin, Texte 19/98, 251 S. zzgl. Karten
- Schulte, A., Balazs, A., Block, J., Gehrmann, J. (1996): Entwicklung der Niederschlags-Deposition von Schwermetallen in West-Deutschland. 1. Blei und Cadmium. *Z. Pflanz. Bodenk.* 159, 377-383
- Schulte-Schrepping, K.-H. (1978): Cadmiumemission und Staubbiederschlag, ein Beitrag zur Aufklärung der Zusammenhänge. *Staub Reinh. Luft* 38, 172-174
- Schultz, R. (1985): Unterschiede der Schwermetalleinträge in Buchen- und Fichtenwälder exponierter und geschützter Lagen. *VDI-Ber.* 560, 439-456
- Schultz, R. (1986a): Messungen der Deposition und des Austrags von Schwermetallen auf den Standorten Heide, Solling, Spanbeck und Harste. In: Ulrich, B. (Hrsg.): Raten der Deposition, Akkumulation und des Austrags toxischer Luftverunreinigungen. Ber. Forschungszentrum Waldökosysteme/Waldsterben. Reihe B Bd. 2, Universität Göttingen, S. 56-78
- Schultz, R. (1986b): Spurenstoffe (Schwermetalle). In: Büttner, G., Lamersdorf, N., Schultz, R., Ulrich, B. (Hrsg.): Deposition und Verteilung chemischer Elemente in küstennahen Waldstandorten - Fallstudie Wingst, Abschlußbericht. Ber. Forschungszentrum Waldökosysteme/Waldsterben, Reihe B, Bd. 1, S. 48-58
- Senatsverwaltung für Stadtentwicklung, Umweltschutz und Technologie - Referat Öffentlichkeitsarbeit (2000): <http://www.sensut.berlin.de/sensut/umwelt/uisonline/dua96/html/uaimpres.htm>
- Spiegel, H., Dachler, M., Böhm, K.E., Pfundner, E., Roth, K., Sager, M. (1999): Cadmium in der Umwelt - ein Statusbericht für Österreich (Review). 1. Mitteilung: Gehaltswerte in Umweltkompartimenten und Eintragspfade in den Boden. *Bodenkultur* 50, 293-304
- SPSS (1998): SPSS for Windows, Release 8.0, SPSS Inc, Chicago
- Staatliches Institut für Gesundheit und Umwelt (Saarbrücken) (2000), schriftl. Mitt.
- Staatliches Umweltamt Itzehoe (Hrsg.) (1999): Immissionsüberwachung der Luft in Schleswig-Holstein. Meßbericht 1998. Staatliches Umweltamt, Itzehoe, 74 S.
- Staatliches Umweltamt Itzehoe (2000), schriftl. Mitt.
- Statistisches Bundesamt (Hrsg.) (1996): Statistisches Jahrbuch 1996 für die Bundesrepublik Deutschland. Metzler-Poeschel, Stuttgart, 755 S.
- Steiger, M., Schulz, M., Schwikowski, M., Naumann, K., Dannecker, W. (1989): Variability of aerosol distributions above the North Sea and its implication to dry deposition estimates. *J. Aerosol Sci.* 20, 1229-1232
- TA Luft (Erste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundesimmissionschutzgesetz - Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft) (1996), *GMBI* 1986, 27.2.1986, 95 S
- Thüringer Landesanstalt für Umwelt (Jena) (2000), schriftl. Mitt.
- Tötsch, W. (1990a): Cadmium - uses and possibilities of substitution. *Toxicol. Environ. Chem.* 27, 123-130
- Tötsch, W. (1990b): Cadmium - Anwendung, Recycling und Ersatzprodukte. *Z. Umweltchem. Ökotox.* 2, 226-230
- Trüby, P. (1983): Elementumsatz in einer bewässerten Pararendzina der südlichen Oberrheinebene unter besonderer Berücksichtigung der Schwermetalle. *Freiburger Bodenk. Abh.* 12, Institut für Bodenkunde und Waldernährungslehre der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg i. Br., 262 S.
- Umland, F., Cosack, E. (1984): Cadmium Statement. *Fres. Z. Anal. Chem.* 318, 581-587
- Umweltbundesamt (1994): Daten zur Umwelt 1992/93. E. Schmidt, Berlin, 688 S.
- Umweltbundesamt (1997): Daten zur Umwelt, Ausgabe 1997. E. Schmidt, Berlin, 570 S.
- Umweltbundesamt (2000a): Zusammenstellung von Depositions- und Konzentrationsdaten, Umweltbundesamt, Langen, schriftl. Mitt.
- Umweltbundesamt (2000b): Emissionskataster für Cadmium, Umweltbundesamt Berlin, schriftl. Mitt.

- Umweltbundesamt (2000c): Zusammenstellung von Cd-Depositionsdaten, Mitteilung durch das Institut für Navigation der Universität Stuttgart
- Umweltminister des Landes Mecklenburg-Vorpommern (1994): Luftgütebericht 1992/1993. Landesamt für Umwelt und Natur, Gülzow, 66 S.
- Umweltministerium Mecklenburg-Vorpommern (1998): Luftgütebericht 1996/1997. Landesamt für Umwelt und Natur, Gülzow, 106 S.
- Umweltministerium Mecklenburg-Vorpommern (2000), schriftl. Mitt.
- van Alphen, M. (1999): Atmospheric heavy metal deposition plumes adjacent to a primary lead-zinc smelter. *Sci. Total Environ.* 236, 119-134
- Vawda, Y., Colbeck, I., Harrison, R.M., Nicholson, K.W. (1989): The effects of particle size on deposition rates. *J. Aerosol Sci.* 20, 1155-1158
- Wilcke, W., Döhler, H. (1995): Schwermetalle in der Landwirtschaft. Quellen, Flüsse, Verbleib. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft KTBL, Arbeitspapier 219, Landwirtschaftsverlag Münster, 98 S.
- Winkler, P., Roider, G. (1997): HELCOM-EMEP-PARCOM-AMAP-Field Intercomparison of Heavy Metals in Precipitation 1995. Ber. Nr. 98-059/e, UFOPLAN Nr. 204 08 540 für das Umweltbundesamt. Deutscher Wetterdienst, Meteorologisches Observatorium Hohenpeissenberg, 149 S.
- Zehringer, M., Hohl, C., Schneider, A., Schüpbach, M.R. (1989): Untersuchungen zur Verteilung von Metallen in Schwebstäuben. *Staub Reinh. Luft* 49, 439-443
- Zimmerling, R., Dämmgen, U., Behrens, U. (2000a): Konzentrationen versauernd und eutrophierend wirkender Spurengase und Aerosol-Bestandteile in Nordost-Brandenburg. *Landbauforschung Völkenrode Sonderheft* 213, 43-93
- Zimmerling, R., Dämmgen, U., Haenel, H.-D. (2000b): Flüsse versauernd und eutrophierend wirkender Spezies zwischen Atmosphäre und Wald- und Forstökosystemen. *Landbauforschung Völkenrode Sonderheft* 213, 95-127

Anhang: Abbildungen

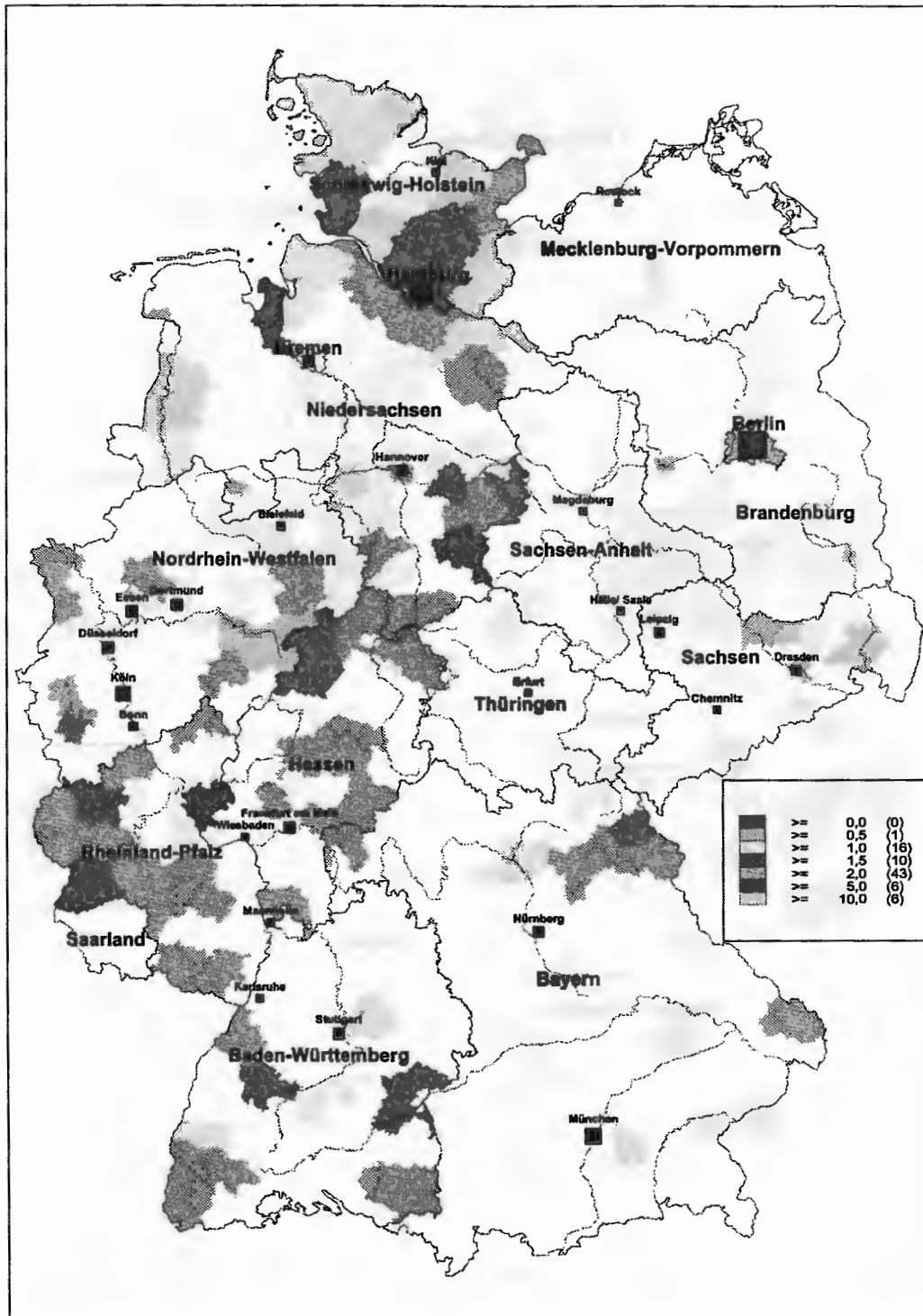


Abb. 1: Cadmium in der Bulk-Deposition bzw. im Staubniederschlag. Mittelwerte für 1984 bis 1989. Angaben in g ha⁻¹ a⁻¹ Cd. In Klammern: Anzahl der Kreise innerhalb einer Klasse
 Fig. 1: Cadmium deposition with sedimenting particles. Means for 1984 to 1989, in g ha⁻¹ a⁻¹ Cd. Figures in brackets indicate the number of districts within the respective category.

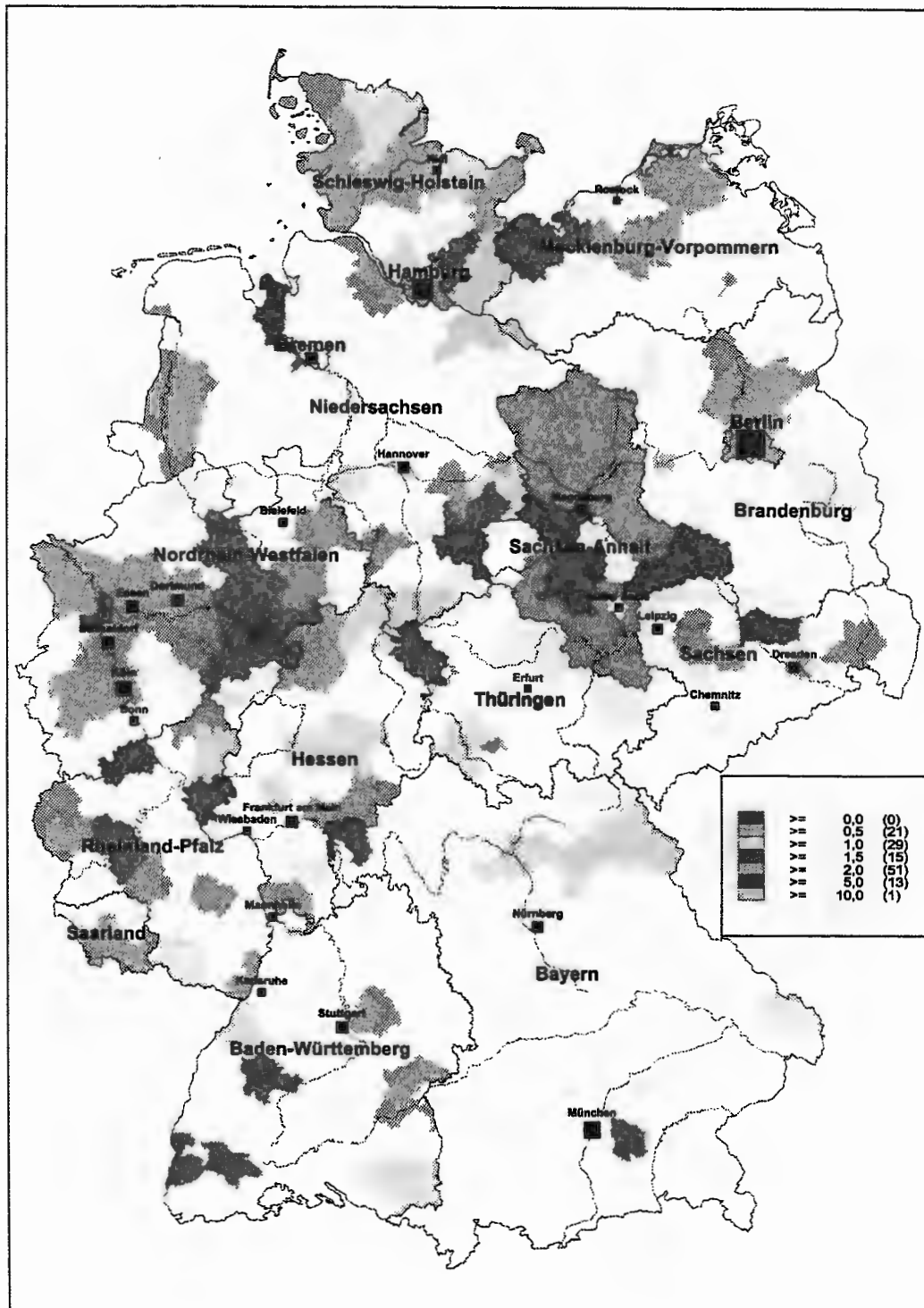


Abb. 2: Cadmium in der Bulk-Deposition bzw. im Staubniederschlag. Mittelwerte für 1990 bis 1992. Angaben in $g\ ha^{-1}\ a^{-1}$ Cd. In Klammern: Anzahl der Kreise innerhalb einer Klasse
 Fig. 2: Cadmium deposition with sedimenting particles. Means for 1990 to 1992, in $g\ ha^{-1}\ a^{-1}$ Cd. Figures in brackets indicate the number of districts within the respective category.

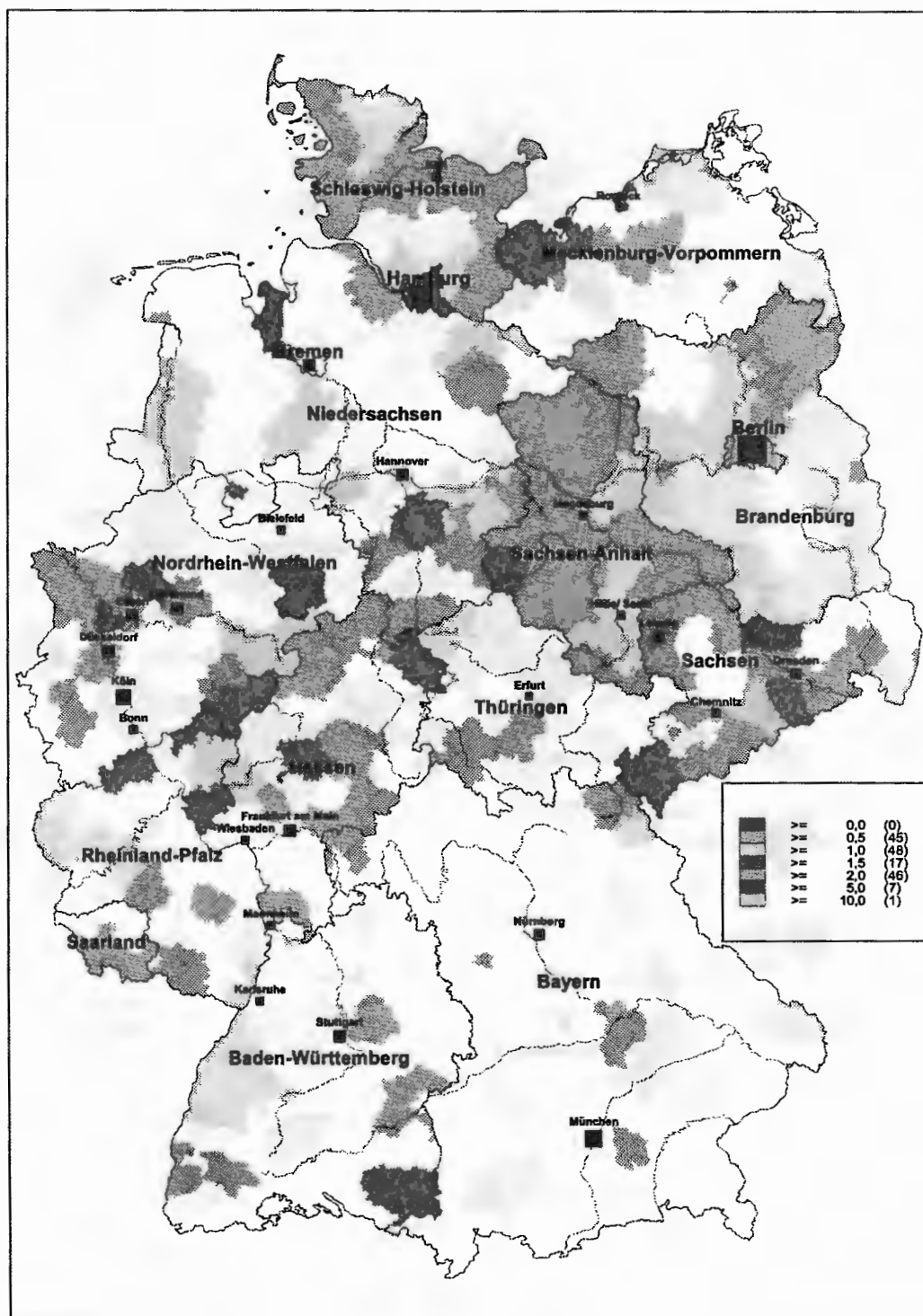


Abb. 3: Cadmium in der Bulk-Deposition bzw. im Staubniederschlag. Mittelwerte für 1993 bis 1995. Angaben in $\text{g ha}^{-1} \text{a}^{-1} \text{Cd}$. In Klammern: Anzahl der Kreise innerhalb einer Klasse

Fig. 3: Cadmium deposition with sedimenting particles. Means for 1993 to 1995, in $\text{g ha}^{-1} \text{a}^{-1} \text{Cd}$. Figures in brackets indicate the number of districts within the respective category.

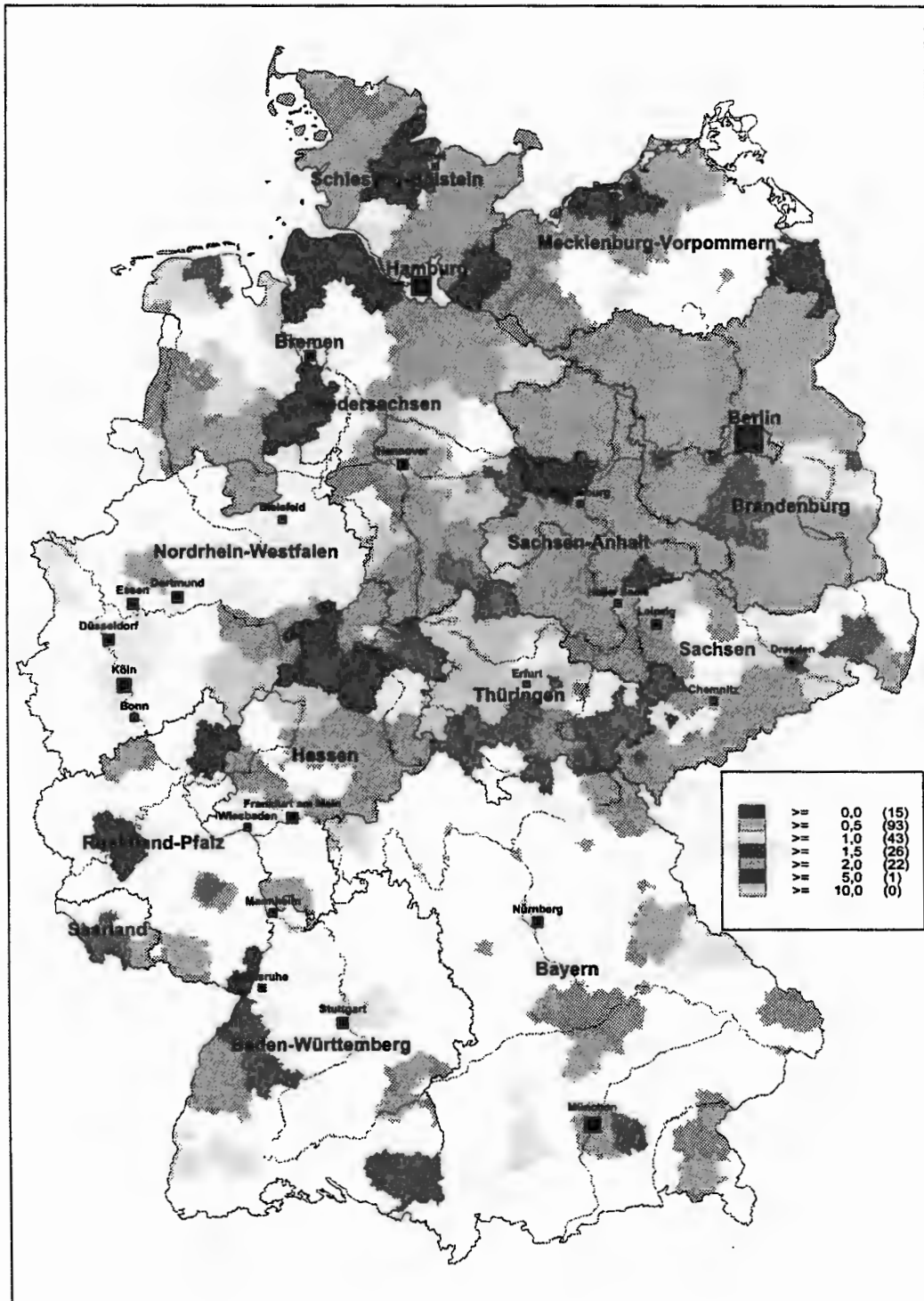


Abb. 4: Cadmium in der Bulk-Deposition bzw. im Staubniederschlag. Mittelwerte für 1996 bis 1998. Angaben in g ha⁻¹ α¹ Cd. In Klammern: Anzahl der Kreise innerhalb einer Klasse
 Fig. 1: Cadmium deposition with sedimenting particles. Means for 1996 to 1998, in g ha⁻¹ α¹ Cd. Figures in brackets indicate the number of districts within the respective category.

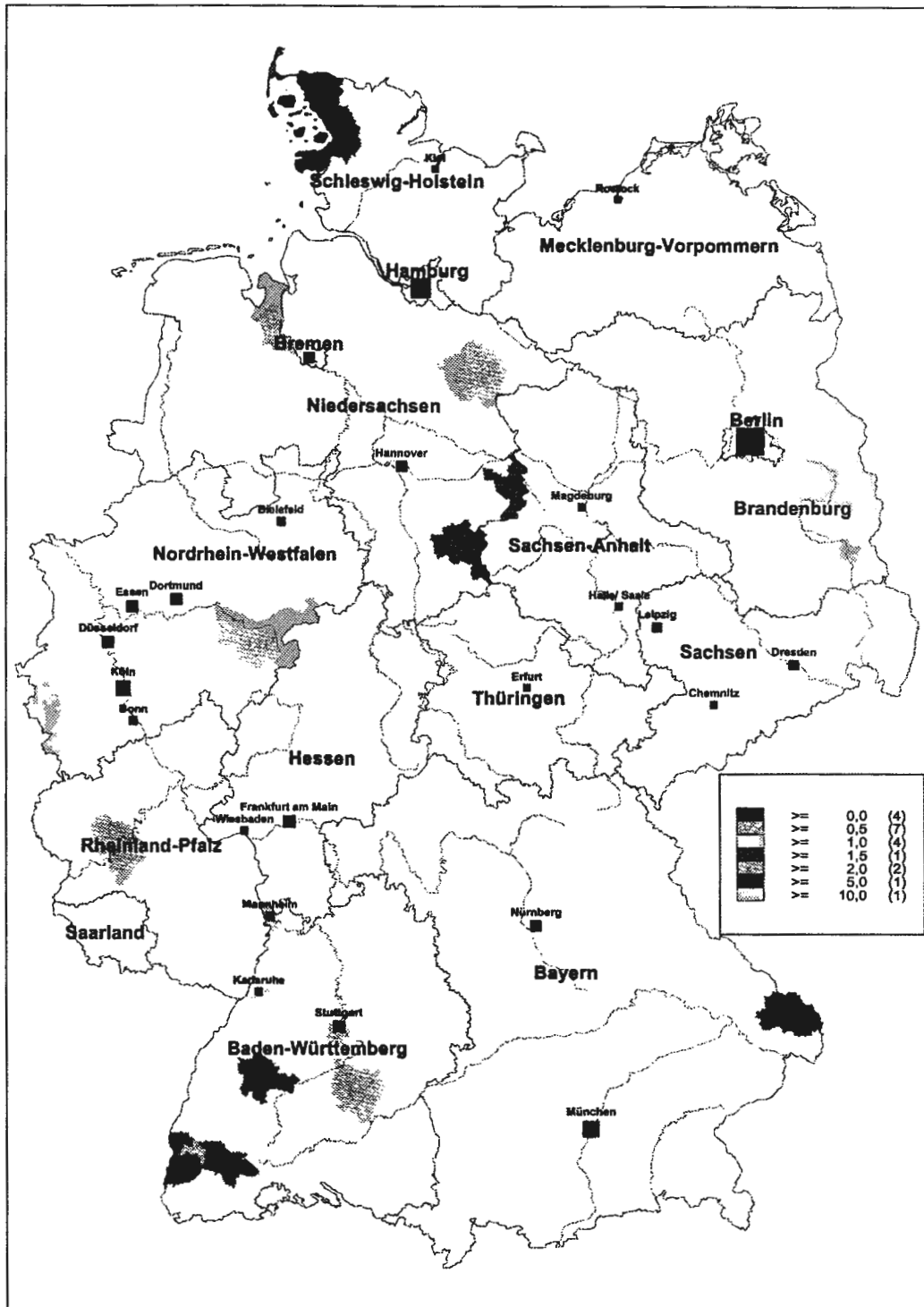


Abb. 5: Cadmium-Konzentrationen im Schwebstaub. Mittelwerte für 1986 bis 1989. Angaben in ng m⁻³ Cd. In Klammern: Anzahl der Kreise innerhalb einer Klasse

Fig. 5: Cadmium concentration in aerosols. Means for 1986 to 1989, in ng m⁻³ Cd. Figures in brackets indicate the number of districts within the respective category.

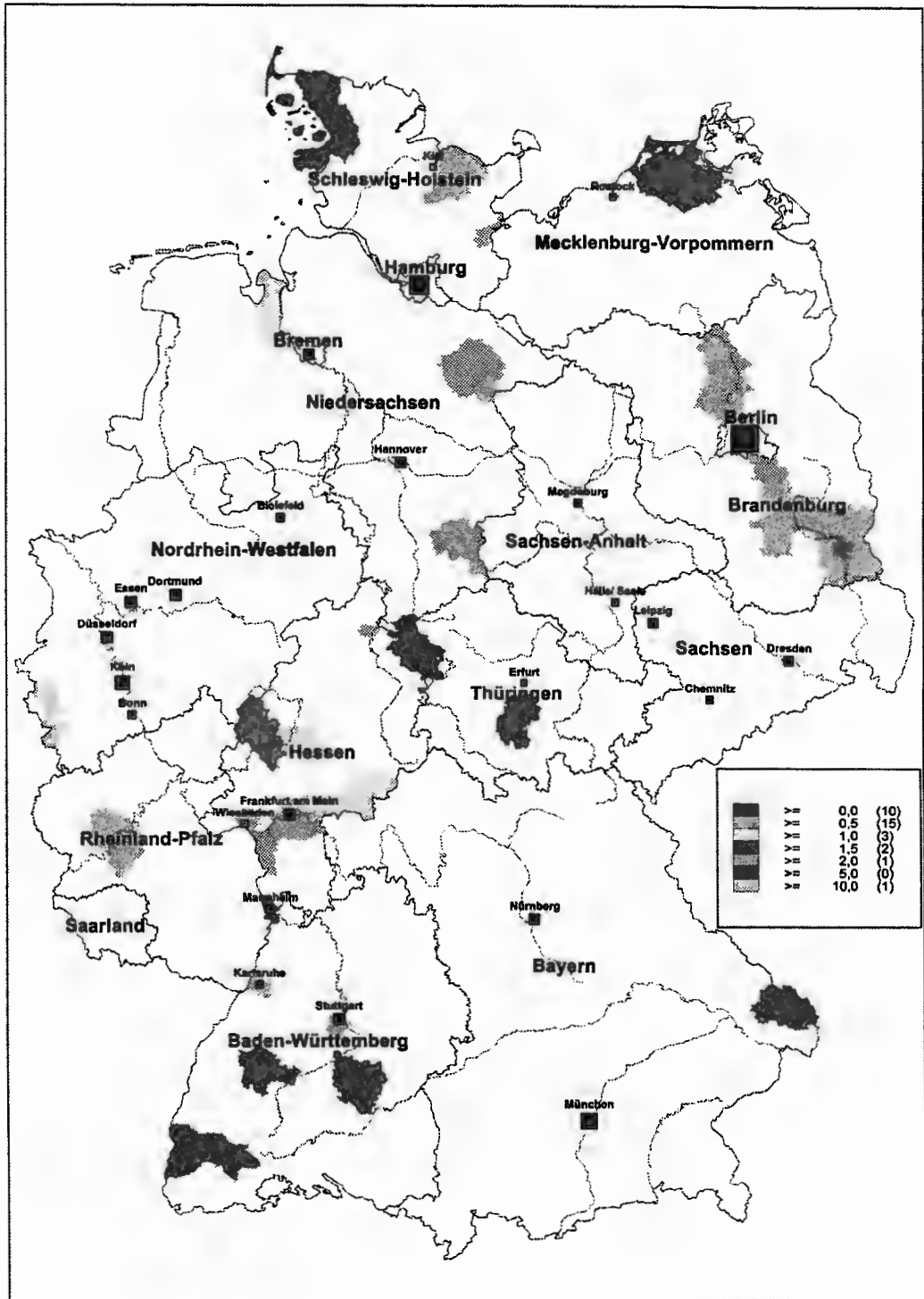


Abb. 6: Cadmium-Konzentrationen im Schwebstaub. Mittelwerte für 1990 bis 1992. Angaben in ng m^{-3} Cd. In Klammern: Anzahl der Kreise innerhalb einer Klasse
 Fig. 6: Cadmium concentration in aerosols. Means for 1990 to 1992, in ng m^{-3} Cd. Figures in brackets indicate the number of districts within the respective category.

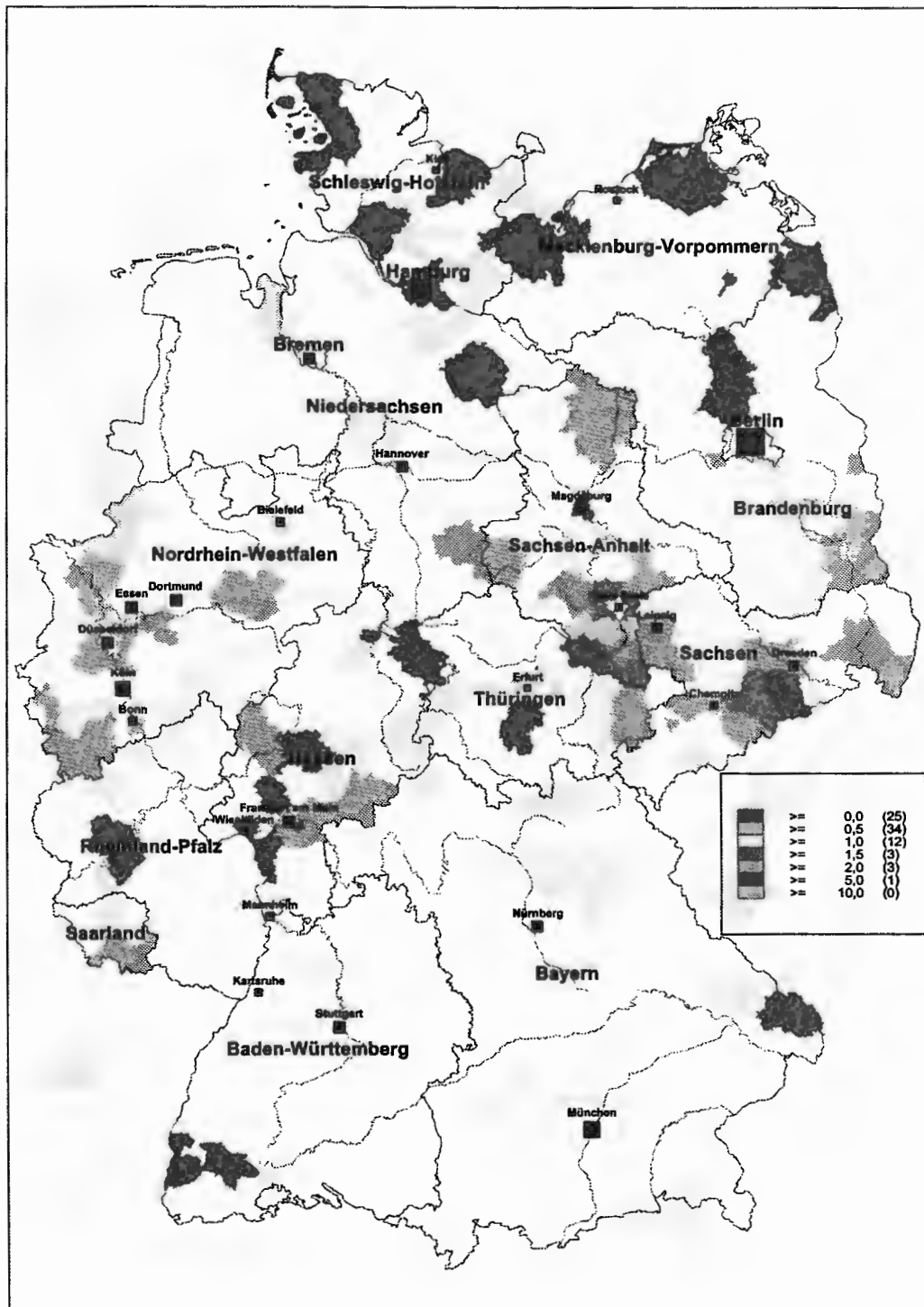


Abb. 7: Cadmium-Konzentrationen im Schwebstaub. Mittelwerte für 1993 bis 1995. Angaben in ng m^{-3} Cd. In Klammern: Anzahl der Kreise innerhalb einer Klasse
 Fig. 7: Cadmium concentration in aerosols. Means for 1993 to 1995, in ng m^{-3} Cd. Figures in brackets indicate the number of districts within the respective category.

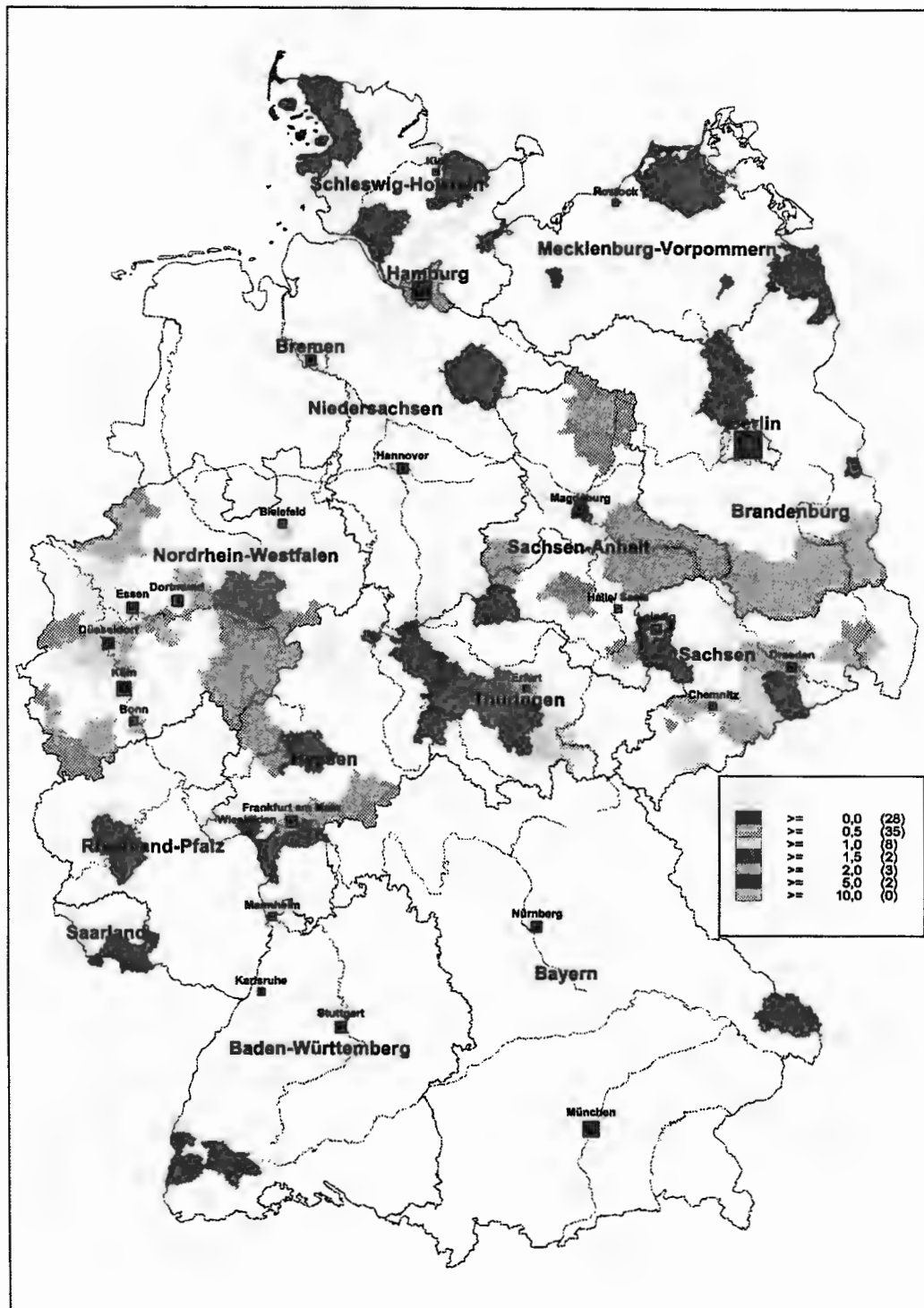


Abb. 8: Cadmium-Konzentrationen im Schwebstaub. Mittelwerte für 1996 bis 1998. Angaben in ng m^{-3} Cd. In Klammern: Anzahl der Kreise innerhalb einer Klasse
 Fig. 8: Cadmium concentration in aerosols. Means for 1996 to 1998, in ng m^{-3} Cd. Figures in brackets indicate the number of districts within the respective category.

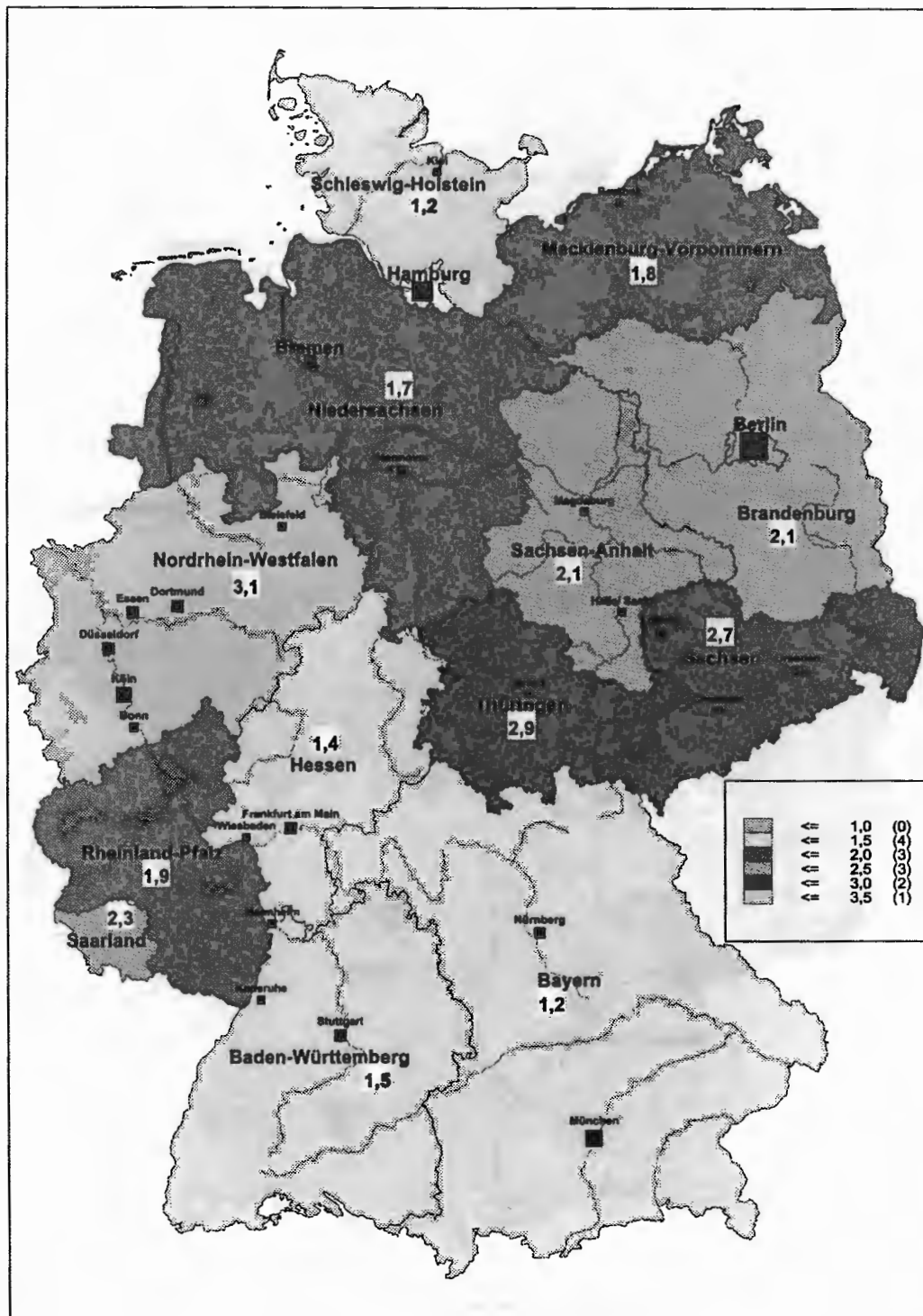


Abb. 9: Abschätzung der mittleren atmosphärischen Gesamt-Depositionen von Cd in landwirtschaftliche Nutzflächen 1993 bis 1995. Angaben für die Bundesländer in g ha⁻¹ a⁻¹ Cd

Fig. 9: Estimate of the mean total atmospheric deposition of Cd into agricultural areas of the German federal states (Bundesländer) for 1993 to 1995, in g ha⁻¹ a⁻¹ Cd

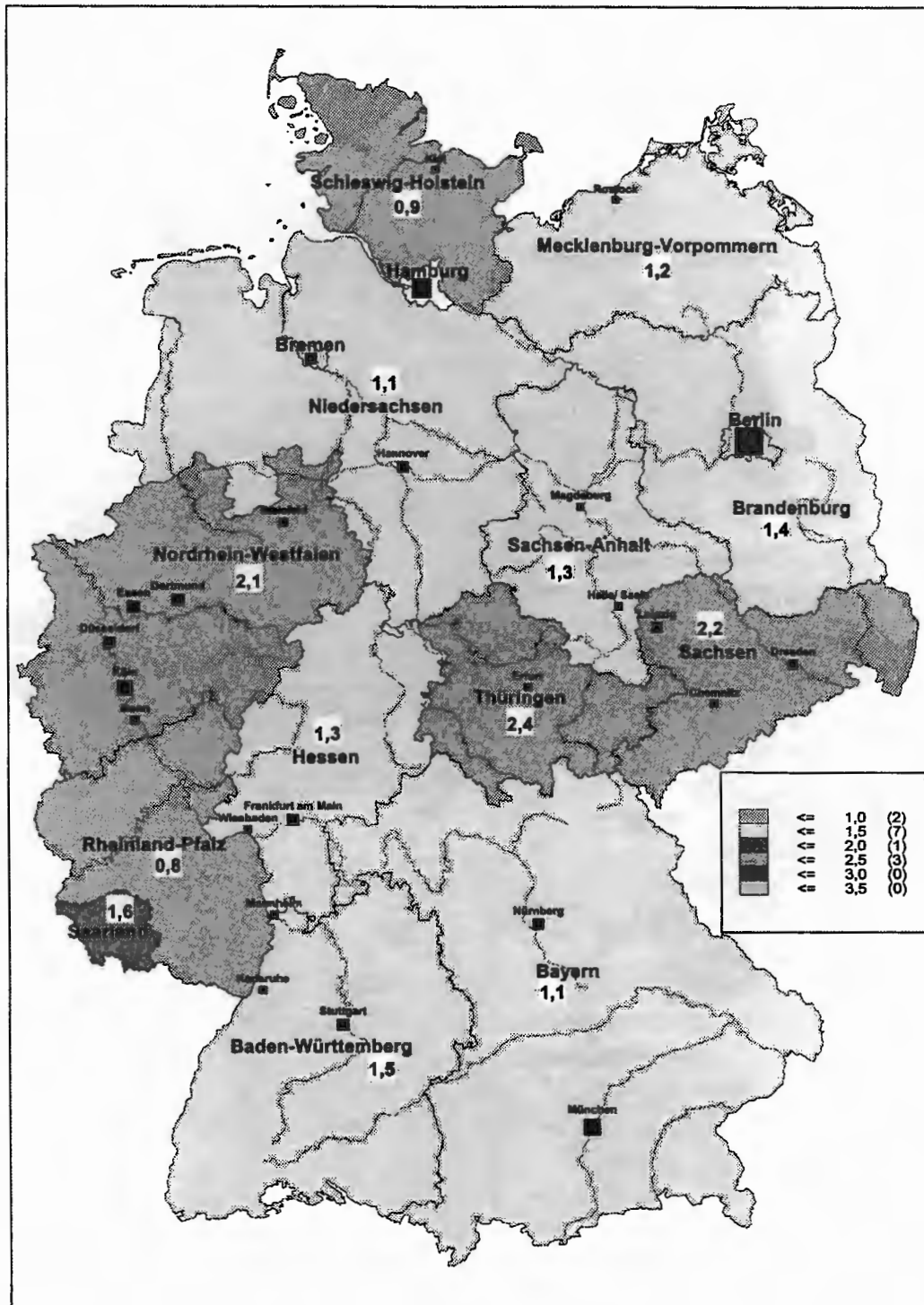


Abb. 10: Abschätzung der mittleren atmosphärischen Gesamt-Depositionen von Cd in landwirtschaftliche Nutzflächen 1996 bis 1998. Angaben für die Bundesländer in g ha⁻¹ a⁻¹ Cd

Fig. 10: Estimate of the mean total atmospheric deposition of Cd into agricultural areas of the German federal states (Bundesländer) for 1996 to 1998, in g ha⁻¹ a⁻¹ Cd

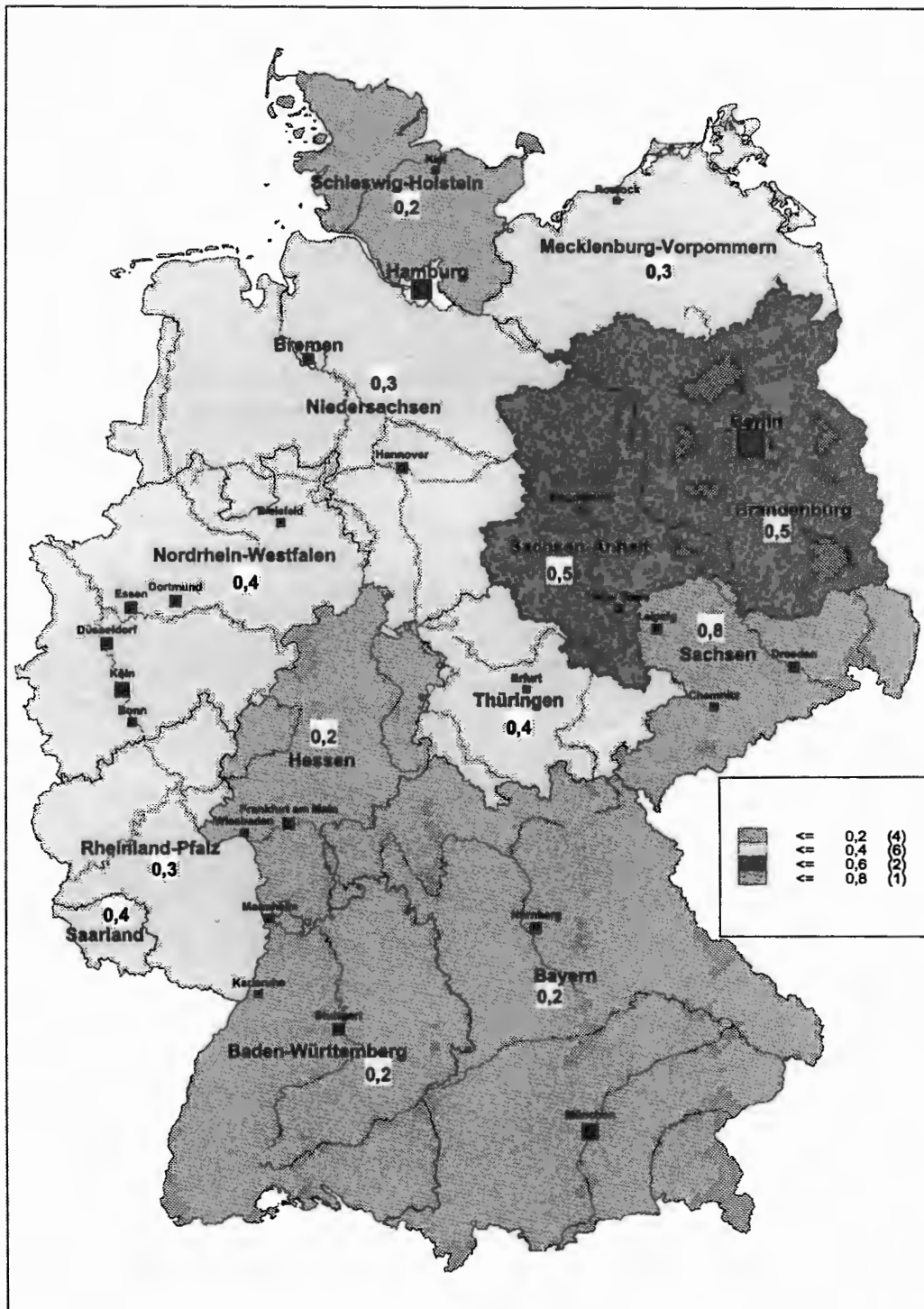


Abb. 11: Modellierte mittlere atmosphärische Gesamtd deposition von Cd in landwirtschaftliche Nutzflächen 1996 (Daten nach Ilyin et al., 2000). Angaben für die Bundesländer in g ha⁻¹ a⁻¹ Cd

Fig. 11: Modelled mean atmospheric total deposition of Cd into agricultural areas of the German federal states (Bundesländer) for 1996 (data according to Ilyin et al., 2000), in g ha⁻¹ a⁻¹ Cd