

Endbericht zum Forschungsvorhaben

Kartierung von Materialschäden in Deutschland

BMU/UBA FE Nr.: 201 43 205

Dipl.-Geogr. Frank Anshelm

Dipl.-Geogr. Thomas Gauger

Dipl.-Geogr. Hartmut Schuster

Institut für Navigation der Universität Stuttgart (INS)

Dipl.-Phys. Bert Droste-Franke

Prof. Dr.-Ing. Rainer Friedrich

Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung
der Universität Stuttgart (IER)

Dr.-Ing. Thomas Reichert

Fraunhofer-Institut Chemische Technologie ICT



Berichts-Kennblatt

1. Berichtsnummer UBA-FB 201 43 205	2.	3.
4. Titel des Berichts Endbericht 201 43 205 – Kartierung von Materialschäden in Deutschland		
5. Autor(en), Name(n), Vorname(n) Anshelm, Frank; Droste-Franke, Bert; Friedrich, Prof. Dr. Rainer; Gauger, Th.; Reichert, Dr. Th.	8. Abschlußdatum 31. Mai 2003	
	9. Veröffentlichungsdatum 31. Mai 2003	
6. Durchführende Institution (Name, Anschrift) Institut für Navigation der Universität Stuttgart, Breitscheidstraße 2A, 70147 Stuttgart Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung der Universität Stuttgart (IER), Hessbrühlstraße 49a, 70565 Stuttgart Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie ICT, Joseph-von-Fraunhofer-Straße 7, 76327 Pfinztal (Berghausen)	10. UFOPLAN - Nr. 201 43 205	
	11. Seitenzahl 177	
	12. Literaturangaben 54	
	13. Tabellen und Diagramme 20	
7. Fördernde Institution (Name, Anschrift) Umweltbundesamt Bismarckplatz 1 14193 Berlin	14. Abbildungen + Karten 84	
	15. Zusätzliche Angaben	
16. Kurzfassung Das Forschungsvorhaben „Kartierung von Materialschäden in Deutschland“ (BMU/UBA FE-Nr. 201 43 205) ist eingebunden in die vom Umweltbundesamt koordinierten deutschen Aktivitäten unter dem Dach des UN/ECE-Übereinkommens über weitreichende, grenzüberschreitende Luftschadstoffe. In diesem Rahmen ist das Forschungsvorhaben auf der Schnittstelle zwischen dem Kooperativprogramm zur Kartierung von Critical Loads und Critical Levels (ICP Modelling & Mapping) und dem Kooperativprogramm zur Erforschung der Wirkung von Luftschadstoffen auf Materialien, einschließlich historischer und kultureller Denkmäler (ICP Materials) angesiedelt. Die Ergebnisse des Projekts wurden in Zusammenarbeit des Instituts für Navigation der Universität Stuttgart (INS), des Fraunhofer-Instituts für Chemische Technologie ICT und des Instituts für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER) der Universität Stuttgart erarbeitet. Es werden fünf neu entwickelte Dosis-Wirkungsbeziehungen zur Ermittlung der durch die Wirkung von Klima und Luftschadstoffe hervorgerufenen Schäden an Polymeren (PVC, PUR-Lack, Alkydharzlack) vorgestellt. Ergebnisse einer deutschlandweit im 1 km · 1 km – Raster durchgeführten Kartierung von Materialschäden werden präsentiert. Kartiert wurden die Schäden an den bereits erwähnten polymeren Werkstoffen und an elf weiteren Materialien (verwitterungsbeständiger Stahl, Zink, Aluminium, Kupfer, Bronze, Portland Kalkstein, Mansfield Sandstein, Glas M1, Glas M3, Alkyd-Melamin-Anstrich auf verzinktem Stahlblech und Alkyd-Anstrich auf Stahlplatten). Es liegen Kartierungsergebnisse für die Jahre 1990, 1995 und 1999 vor. Vorgestellt werden darüber hinaus Kartierungsergebnisse für die Überschreitung akzeptabler Korrosionsraten in Deutschland. Aufbauend auf den Ergebnissen der Schadenskartierung wird eine ökonomische Bewertung der durch die Wirkung von Luftschadstoffen verursachten Materialschäden an Gebäuden in Deutschland durchgeführt.		
17. Schlagwörter Materialschäden, Kartierung, Immission, SO ₂ , Ozon, Deposition, Chloridfracht, Protonenfracht, Bestrahlungsstärke, Korrosion, Verwitterung, Kupfer, Bronze, Zink, Verwitterungsbeständiger Stahl, Portland Kalkstein, Mansfield Sandstein, Aluminium, Glas, Siliziumalkyd, Alkydmelamin, PVC, PUR, Polyester, Alkydharzlack, Polymere, Dosis-Wirkungsbeziehungen, ökonomische Abschätzung von Korrosionsschäden		
18. Preis	19.	20.

1. Report No. UBA-FB 201 43 205	2.	3.
4. Report Title 3. Final Report 201 43 205: Mapping material damages in Germany		
5. Author(s), Family Name(s), First Name(s) Anshelm, Frank; Droste-Franke, Bert; Friederich, Prof. Dr. Rainer; Gauger, Th.; Reichert, Dr. Thomas		8. Report Date May, 31 th 2003
6. Performing Organisation (Name, Address) Institute of Navigation, Stuttgart University, Breitscheidstraße 2A, 70147 Stuttgart Institute of Energy Economics and the Rational Use of Energy (IER), Hessbrühlstraße 49A, 70565 Stuttgart Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie ICT, Joseph-von-Fraunhofer-Straße 7, 76327 Pfinztal (Berghausen)		9. Publication Date May, 31 th 2003
7. Sponsoring Agency (Name, Address) Federal Environmental Agency Bismarckplatz 1 14193 Berlin		10. UFOPLAN – Ref. Nr. 201 43 205
15. Supplementary Notes		11. No. of Pages 177
		12. No. of References
		13. No. of Tables and Diagrams 54
		14. No. of Figures + Maps 20
		14. No. of Figures + Maps 84
16. Abstract The research project „Mapping material damages due to air pollutants“ (BMU/UBA FE-NO. 201 43 205) is integrated into the work under the UN/ECE ‚Convention on Long-range Transboundary Air Pollution‘. German activities under the convention is coordinated by Federal Environmental Agency (UBA). The research project is part of the research activities within the „International Co-operative Programme on Effects on Materials, including Historic and Cultural Monuments“ (ICP Materials) and the „International Co-operative Programme on Modelling & Mapping“ (ICP Modelling & Mapping). The results of this project have been gained in close cooperation of Institute of Navigation Stuttgart University (INS), Institute of Energy Economics and the Rational Use of Energy (IER) Stuttgart University and Fraunhofer-Institute for Chemical Technology (ICT). Five new developed dose-response-functions for air pollution effects on polymers (PVC, PUR, alkyd resin) are presented. Furthermore, results of German wide damage mapping for polymers named above and eleven more materials are achieved (weathering steel, zinc, aluminium, copper, bronze, Portland limestone, Mansfield sandstone, glass M1, glass M3, coil coated steel with alkyd melamine, steel panels with silicon alkyd). Mapping results in a 1 by 1 kilometer grid are available for the years 1990, 1995 and 1999. In addition, mapping results for exceedance of acceptable corrosion rates are available. Finally, an assessment of the economic costs of the deterioration of building materials due to effects of air pollutants has been carried out.		
17. Keywords material damages, mapping, air pollutants, SO ₂ , ozone, deposition, chloride, protons, global radiation, irradiance, corrosion, weathering, copper, bronze, zink, weathering steel, Portland limestone, Mansfield sandstone, aluminium, glass, silicon alkyd, alkyd melamine, PVC, PUR, polyester, polymers, dose-response-functions, economic assessment of corrosion damages		
18. Price	19.	20.

Vorwort

Das Forschungsvorhaben „Kartierung von Materialschäden in Deutschland“ (UBA/BMU FE-Nr. 201 43 205) ist eingebettet in die vom Umweltbundesamt koordinierten deutschen Aktivitäten unter dem Dach des UN/ECE-Übereinkommens über weitreichende, grenzüberschreitende Luftschadstoffe (CLRTAP 1979).

In diesem Rahmen ist das Forschungsvorhaben an der Schnittstelle zwischen ICP Modelling & Mapping und ICP Materials angesiedelt. Bereits 1989 war auf Vorschlag der Bundesrepublik Deutschland vom Exekutivorgan (Executive Body) des UN/ECE-Übereinkommens über weitreichende, grenzüberschreitende Luftschadstoffe das Programm zur Kartierung von Critical Loads und Critical Levels installiert worden (ICP Modelling & Mapping). Aufgabe dieses Programms ist die praktische Anwendung des Critical Loads & Levels-Konzepts für die Arbeit unter der Luftreinhaltekonvention, indem die kritischen Belastungswerte europaweit kartiert und durch Abgleich mit den tatsächlichen Depositionen oder Immissionskonzentrationen die Überschreitung der Wirkungsschwellen dokumentiert und die gefährdeten empfindlichen Regionen dargestellt werden. 24 Länder sind derzeit an dem Kartierungsprogramm beteiligt. Das Forschungsvorhaben „Kartierung von Materialschäden in Deutschland“ ist ein Beitrag zu diesem Kartierungsprogramm.

Die „Kartierung von Materialschäden in Deutschland“ erfolgt in enger Kooperation mit Vertretern des ebenfalls unter dem Dach der europäischen Luftreinhaltekonvention angesiedelten Internationalen Kooperativprogramm zur Erforschung der Wirkung von Luftschadstoffen auf Materialien, einschließlich historischer und kultureller Denkmäler (ICP Materials). ICP Materials wurde bereits 1985 gegründet. Es hat die Erforschung der naturwissenschaftlichen Zusammenhänge der Wirkung von Luftschadstoffen auf Materialien zum Ziel. Unter dem Dach von ICP Materials werden standardisierte Expositionsversuche mit unterschiedlichen Materialien durchgeführt. Aufbauend auf Ergebnissen dieser Expositionsversuche werden Dosis-Wirkungsfunktionen entwickelt, die den Wirkungszusammenhang zwischen Klima und Luftschadstoffen sowie den resultierenden Materialschäden quantitativ beschreiben. Derartige Dosis-Wirkungsbeziehungen wiederum sind die Basis der in diesem Forschungsvorhaben durchzuführenden Kartierungsarbeiten.

Ziel des Forschungsvorhabens ist die Abschätzung der unter den in Deutschland herrschenden Klima- und Luftschadstoffbedingungen zu erwartenden Materialschäden. Das Gefährdungspo-

tential verschiedener an Kunst- und Bauwerken verwendeter Materialien soll in seiner absoluten Höhe und seinen regionalen Differenzierungen erfasst, kartographisch dargestellt und in seiner ökonomischen Dimension abgeschätzt werden. Ein weiteres wichtiges Ziel des Forschungsvorhabens ist die Entwicklung von Dosis-Wirkungsbeziehungen für Polymere.

Die Ergebnisse des Forschungsvorhabens „Kartierung von Materialschäden in Deutschland“ wurden im Auftrag des Umweltbundesamtes und in enger Kooperation der Projektpartner

- Institut für Navigation der Universität Stuttgart (INS)
- Fraunhofer-Institut Chemische Technologie ICT
- Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung der Universität Stuttgart (IER)

erarbeitet.

Eine Vielzahl von Personen und Institutionen hat durch die Bereitstellung von Daten und Informationen zu einem erfolgreichen Abschluss des Forschungsvorhabens beigetragen. Allen beteiligten Personen und Institutionen sei an dieser Stelle herzlich gedankt.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort

Inhaltsverzeichnis	I
Abbildungsverzeichnis	III
Tabellenverzeichnis	IV
Kartenverzeichnis	V
Einführung	1
1 Entwicklung von Dosis-Wirkungsbeziehungen für Polymere	3
1.1 Dosis-Wirkungsbeziehungen	3
1.2 Dosis-Wirkungsbeziehungen für Polymere	5
1.3 Ergebnisse für freibewitterte Polymermaterialien	8
1.3.1 Tiefenschädigung von Polyurethanlack (PUR) mit physikalischem Modell	8
1.3.2 Tiefenschädigung von Polyvinylchlorid-Fensterprofilen (PVC) mit physikalischem Modell.....	10
1.3.3 Farbveränderung beim glasfaserverstärkten Polyester (PES) mit physikalischem Modell.....	11
1.3.4 Schichtdickenabtrag von Alkydharzlack-Anstrichfarbe mit Eisenglimmer (Alkyd) auf exponierten Stahlblechen.....	13
1.3.5 Farbveränderungen von Polyurethanlacken PUR	14
1.4 Befragungsergebnisse	16
2 Kartierung von Materialschäden in Deutschland	20
2.1 Datenbeschaffung und Aufbereitung der Grundlagenkarten	20
2.1.1 Niederschlag	22
2.1.2 Temperatur	25
2.1.3 Relative Feuchte	27
2.1.4 Globalstrahlung und Bestrahlungsstärke	29
2.1.5 Schwefeldioxid	31
2.1.6 Ozon.....	38
2.1.7 Stickstoffdioxid.....	42
2.1.8 Protonenfracht.....	46
2.1.9 Chloridfracht.....	48
2.2 Kartierung der Materialschäden 1990, 1995 und 1999.....	50
2.2.1 Dosis-Wirkungsfunktionen	51

2.2.2 Kartierung der aktuellen Korrosion	54
2.2.2.1 Verwitterungsbeständiger Stahl	57
2.2.2.2 Zink	57
2.2.2.3 Aluminium	58
2.2.2.4 Kupfer	58
2.2.2.5 Bronze	59
2.2.2.6 Portland Kalkstein	59
2.2.2.7 Mansfield Sandstein	60
2.2.2.8 Alkyd-Melamin-Anstrich auf verzinktem Stahlblech	60
2.2.2.9 Alkyd-Anstrich auf Stahlplatten	61
2.2.2.10 Glas M1	62
2.2.2.11 Glas M3	62
2.2.2.12 Tiefenschädigung von Polyurethan (PUR)	63
2.2.2.13 Tiefenschädigung von Polyvinylchlorid (PVC)	63
2.2.2.14 Farbveränderung von Polyester (PES)	65
2.2.2.15 Schichtdickenabtrag von Alkydharzlack (Alkyd)	66
2.2.2.16 Farbveränderung von Polyurethanlack (PUR)	67
2.3 Überschreitung akzeptabler Korrosionsraten	84
2.3.1 Verwitterungsbeständiger Stahl	89
2.3.2 Zink	90
2.3.3 Aluminium	91
2.3.4 Kupfer	91
2.3.5 Bronze	92
2.3.6 Portland Kalkstein	93
2.3.7 Mansfield Sandstein	93
2.4 Fallstudie Ballungsraum	102
3 Ökonomische Berechnung von Materialschäden in Deutschland	104
3.1 Methode zur ökonomischen Bewertung von Materialschäden	104
3.1.1 Aspekte der Bewertung von Materialschäden	104
3.1.2 Methodik zur Abschätzung der Instandsetzungskosten	105
3.2 Überarbeitung der Daten zur ökonomischen Berechnung	108
3.2.1 Zuordnung der Zahlen des Gebäude und Wohnungsbestandes zu Gebäudetypen	110
3.2.2 Ermittlung des Materialkatasters	111
3.2.3 Gebäude- und Materialbestand in 1990, 1995 und 1999	115
3.2.4 Dosis-Wirkungsbeziehungen	129
3.2.5 Instandsetzungskriterien und Instandsetzungskosten	130
3.2.6 Ableitung von Korrosionsraten ohne anthropogenen Einfluss im achten Jahr der Exposition	131
3.3 Ergebnisse der ökonomischen Abschätzung von Materialschäden in Deutschland	133

3.3.1 Quantifizierte Instandsetzungsflächen und Schadenskosten in 1990, 1995 und 1999	133
3.3.2 Sensitivitätsanalyse der quantifizierten Schadenskosten	151
3.4 Zusammenfassung und Ausblick	155
Zusammenfassung	157
Summary	166
Literaturverzeichnis	173
Liste der Autoren	177

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Vergleich der Modellierung der errechneten Werte und der gemessenen Werte für die Eindringtiefe der Anfärbereaktion mit Lugolscher Lösung als Maß für die Tiefenschädigung von PUR durch Umwelteinflüsse	9
Abb. 2: Vergleich der Modellierung der errechneten Werte und der gemessenen Werte für die Eindringtiefe einer Anfärbereaktion als Maß für die Tiefenschädigung von PVC durch Umwelteinflüsse	10
Abb. 3: Vergleich der Modellierung der errechneten Werte und der gemessenen Werte für die Farbveränderung von PES durch Umwelteinflüsse	12
Abb. 4: Vergleich der Modellierung der errechneten Werte und der gemessenen Werte für den Schichtdickenabtrag des Alkydharzlackes auf Stahlblechen	13
Abb. 5: Vergleich der Modellierung der errechneten Werte und der gemessenen Werte für die Farbänderung Delta E des PUR-Lackes auf dem PUR-Autospoiler.....	15
Abb. 6: Niederschlag: Jahressummen 1990-1999	23
Abb. 7: Temperatur: Jahresmittel 1990-1999	25
Abb. 8: Relative Feuchte: Jahresmittel 1990-1999.....	27
Abb. 9: SO ₂ -Immission 1985-1999.....	32
Abb. 10: SO ₂ -Emission in Deutschland (ost/west) 1985-1998 (Quelle: EMEP/MSCW 2000).....	33
Abb. 11: SO ₂ -Immission in Deutschland 1985-1999 (alte/neue Bundesländer).....	35
Abb. 12: Abweichung vom langjährigen Gebietsmittel (1991-1990) der Jahresmitteltemperatur in Deutschland 1985-1999 (Quelle: ULLRICH, RAPP & FUCHS 2000).....	35
Abb. 13: O ₃ -Immission: Jahresmittel 1990-1999.....	39
Abb. 14: NO ₂ -Immission: Jahresmittel 1985-1999	43
Abb. 15: Protonenfracht 1990-1999.....	46
Abb. 16: Chloridfracht 1990-1999	48

Abb. 17: Korrosion im 8.Jahr der Exposition und die Jahre 1990, 1995 und 1999 (ICP Materials Dosis-Wirkungsfunktionen).....	56
Abb. 18: Schäden an Polymeren 1990, 1995 und 1999 (Dosis-Wirkungsfunktionen des Fraunhofer-Instituts für Chemische Technologie ICT)	64
Abb. 19: Flussbild für das verwendete Verfahren zur Berechnung von zusätzlichen Instandsetzungskosten durch Klima- und Luftschadstoffeinflüsse.....	106
Abb. 20: Histogramm der Gesamtschadenskosten in 1990.....	138
Abb. 21 Histogramm der Gesamtschadenskosten in 1995	138
Abb. 22 Histogramm der Gesamtschadenskosten in 1999	139
Abb. 23: Einfluss der Annahme verschiedener Zinssätze auf das Ergebnis	151
Abb. 24: Variation der Schadenskosten von galvanisiertem Stahl mit der Annahme verschiedener Werte für Kosten und kritische Dicke	153
Abb. 25: Variation der Schadenskosten von Zink mit der Annahme verschiedener Werte für Kosten und kritische Dicke.....	153
Abb. 26: Variation der Schadenskosten von Aluminium mit der Annahme verschiedener Werte für Kosten und kritische Dicke	154
Abb. 27: Variation der Schadenskosten von Natursteinen mit der Annahme verschiedener Werte für Kosten und kritische Dicke	154
Abb. 28: Variation der Schadenskosten von Putz mit der Annahme verschiedener Werte für Kosten und kritische Dicke.....	155

Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Liste der befragten Hersteller von Anstrichfarben.....	19
Tab. 2: Kartierung der SO ₂ -Immission – Anzahl der Messstationen	31
Tab. 3: Kartierung der Ozon-Immission – Anzahl der Stationen.....	38
Tab. 4: Kartierung der NO ₂ -Immission – Anzahl der Stationen	42
Tab. 5: ICP Materials Hintergrundkorrosionsraten für einjährige Exposition	85
Tab. 6: Prozentuale Überschreitung der ICP Materials Hintergrundkorrosionsraten und der daraus abgeleiteten akzeptablen Korrosionsraten 1990 und 1999	87
Tab. 7: Prozentuale Flächenanteile einzelner Klassen der Überschreitung an der Gesamtfläche der Bundesrepublik Deutschland 1990 und 1999	88
Tab. 8: Gebäudetypenmatrix für die alten Bundesländer (GÜLEC ET AL. 1994).....	109
Tab. 9: Gebäudetypen für die neuen Bundesländer (GÜLEC ET AL. 1994)	110
Tab. 10: Materialoberfläche in Quadratmetern pro Gebäude, dargestellt nach den verschiedenen Siedlungstypen, abgeleitet aus Ergebnissen von HOOS <i>ET AL.</i> , 1987 für Gebäude in Dortmund und Köln.....	112
Tab. 11: Spezifikation der Gebäudetypen je Siedlungstyp in der Studie von ROTH ET AL. 1980 (ST = Siedlungstyp).....	113
Tab. 12: Verteilung der Gebäudetypen auf Siedlungstypen.....	114
Tab. 13: Materialoberflächen an Wohngebäudefassaden in Deutschland in 1990, 1995 und 1999	118
Tab. 14: Verwendete Instandsetzungskriterien. Minimal und Maximalwerte werden für die Sen- sitivitätsanalyse genutzt	131
Tab. 15: Verwendete flächenspezifische Instandsetzungskosten.....	131
Tab. 16: Korrosionsraten veröffentlicht von der UN ECE und hochgerechnet für die Exposition im achten Jahr	132

Tab. 17: Berechnete Instandsetzungsfläche für die Jahre 1990, 1995 und 1999	134
Tab. 18: Instandsetzungskosten und der aufgrund der Hintergrundkorrosionsraten abgeschätzte anthropogene Anteil der geschädigten Materialien in 1990, 1995 und 1999	135
Tab. 19: Abgeschätzte jährliche Instandsetzungsfläche und jährlicher Instandsetzungsanteil für die grob quantifizierbaren Materialoberflächen in den Jahren 1990, 1995 und 1999	136
Tab. 20: Abgeschätzte jährliche Instandsetzungskosten im Bezug auf die grob quantifizierbaren zusätzlichen Materialoberflächen	136

Kartenverzeichnis

Karte 1: Niederschlag: Jahressummen 1990-1999	24
Karte 2: Temperatur: Jahresmittel 1990-1999.....	26
Karte 3: Relative Luftfeuchte: Jahresmittel 1990-1999	28
Karte 4: Mittlere Bestrahlungsstärke in Deutschland 1990, 1995 und 1999.....	30
Karte 5: Verteilung der SO ₂ -Immissionsmessstationen 1985-1999.....	36
Karte 6: SO ₂ -Immission 1985-1999	37
Karte 7: Verteilung der O ₃ -Immissionsmessstationen 1990-1999	40
Karte 8: Ozon-Immission 1990-1999.....	41
Karte 9: Verteilung der NO ₂ -Immissionsmessstationen 1985-1999	44
Karte 10: NO ₂ -Immission 1985-1999	45
Karte 11: Protonenfracht 1990-1999.....	47
Karte 12: Chloridfracht 1990-1999	49
Karte 13: Verwitterungsbeständiger Stahl – Korrosion im 8.Jahr der Exposition 1990, 1995 und 1999	68
Karte 14: Zink – Korrosion im 8.Jahr der Exposition 1990, 1995 und 1999	69
Karte 15: Aluminium – Korrosion im 8.Jahr der Exposition 1990, 1995 und 1999	70
Karte 16: Kupfer – Korrosion im 8.Jahr der Exposition 1990, 1995 und 1999	71
Karte 17: Bronze – Korrosion im 8.Jahr der Exposition 1990, 1995 und 1999	72
Karte 18: Portland Kalkstein – Korrosion im 8.Jahr der Exposition 1990, 1995 und 1999.....	73
Karte 19: Mansfield Sandstein – Korrosion im 8.Jahr der Exposition 1990, 1995 und 1999.....	74

Karte 20: Alkyd-Melamin-Anstrich auf verzinktem Stahlblech – Korrosion im 8.Jahr der Exposition 1990, 1995 und 1999	75
Karte 21: Alkyd-Anstrich auf Stahlplatten – Korrosion im 8.Jahr der Exposition 1990, 1995 und 1999	76
Karte 22: Glas M1 – Korrosion im 8.Jahr der Exposition 1990, 1995 und 1999.....	77
Karte 23: Glas M3 – Korrosion im 8.Jahr der Exposition 1990, 1995 und 1999.....	78
Karte 24: Polyurethanlack (PUR) – Tiefenschädigung nach 8 Jahren Exposition 1990, 1995 und 1999	79
Karte 25: Polyvinylchlorid (PVC) – Tiefenschädigung nach 8 Jahren Exposition 1990, 1995 und 1999	80
Karte 26: Polyester (PES) – Farbveränderung nach 8 Jahren Exposition 1990, 1995 und 1999	81
Karte 27: Alkydharzlack – Schichtdickenabtrag nach 8 Jahren Exposition 1990, 1995 und 1999	82
Karte 28: Polyurethanlack (PUR) – Farbveränderung nach 8 Jahren Exposition 1990, 1995 und 1999	83
Karte 29: Verwitterungsbeständiger Stahl – Überschreitung akzeptabler Korrosionsraten 1990 und 1999	95
Karte 30: Zink – Überschreitung akzeptabler Korrosionsraten 1990 und 1999.....	96
Karte 31: Aluminium – Überschreitung akzeptabler Korrosionsraten 1990 und 1999.....	97
Karte 32: Kupfer – Überschreitung akzeptabler Korrosionsraten 1990 und 1999.....	98
Karte 33: Bronze – Überschreitung akzeptabler Korrosionsraten 1990 und 1999.....	99
Karte 34: Portland Kalkstein – Überschreitung akzeptabler Korrosionsraten 1990 und 1999 .	100
Karte 35: Mansfield Sandstein – Überschreitung akzeptabler Korrosionsraten 1990 und 1999	101
Karte 36: Abgeschätzter Bestand an Gebäuden mit 1 und 2 Wohnungen in 1999	116
Karte 37: Abgeschätzter Bestand an Gebäuden mit 3 und mehr Wohnungen in 1999	117

Karte 38: Galvanisierter Stahl an Wohngebäudeaußenflächen in 1990, 1995 und 1999	120
Karte 39: Zink an Wohngebäudeaußenflächen in 1990, 1995 und 1999	121
Karte 40: Aluminium an Wohngebäudeaußenflächen in 1990, 1995 und 1999	122
Karte 41: Sandstein an Wohngebäudeaußenflächen in 1990, 1995 und 1999	123
Karte 42: Kalkstein an Wohngebäudeaußenflächen in 1990, 1995 und 1999	124
Karte 43: Anderer Naturstein an Wohngebäudeaußenflächen in 1990, 1995 und 1999	125
Karte 44: Putz an Wohngebäudeaußenflächen in 1990, 1995 und 1999	126
Karte 45: Anstriche an Wohngebäudeaußenflächen in 1990, 1995 und 1999	127
Karte 46: Fensterfläche an Wohngebäudeaußenflächen in 1990, 1995 und 1999	128
Karte 47: Quantifizierte Schadenskosten ohne Anstriche, PVC-Fenster und Kupfer	141
Karte 48: Galvanisierter Stahl - Quantifizierte Schadenskosten in 1990, 1995 und 1999	142
Karte 49: Zink - Quantifizierte Schadenskosten in 1990, 1995 und 1999	143
Karte 50: Aluminium - Quantifizierte Schadenskosten in 1990, 1995 und 1999	144
Karte 51: Sandstein - Quantifizierte Schadenskosten in 1990, 1995 und 1999	145
Karte 52: Kalkstein - Quantifizierte Schadenskosten in 1990, 1995 und 1999	146
Karte 53: Andere Natursteine - Quantifizierte Schadenskosten in 1990, 1995 und 1999	147
Karte 54: Putz - Quantifizierte Schadenskosten in 1990, 1995 und 1999	148
Karte 55: Alkyd-Melamin-Anstriche - Quantifizierte Schadenskosten in 1990, 1995 und 1999	149
Karte 56: Silizium-Alkyd-Anstriche - Quantifizierte Schadenskosten in 1990, 1995 und 1999	150

Einführung

Das Forschungsvorhaben „Kartierung von Materialschäden in Deutschland“ (BMU/UBA FE-Nr. 201 43 205) steht in Fortführung und Erweiterung des 1998 abgeschlossenen Projekts „Kartierung von Toleranzgrenzwerten der Wirkung von Luftschadstoffen auf Materialien“ (ANSHELM ET AL. 1998). Die im Vorgängerprojekt erzielten Kartierungsergebnisse sollen aktualisiert und durch die Einbeziehung neuer Erkenntnisse und Daten sowie methodische Weiterentwicklungen verbessert werden. Ein weiteres wichtiges Ziel des Forschungsvorhabens ist die Entwicklung von Dosis-Wirkungsbeziehungen für Materialien, die bisher nicht in die Kartierung miteinbezogen werden konnten. Im Zentrum des Interesses steht hierbei die Entwicklung von Dosis-Wirkungsbeziehungen für Polymere. Des Weiteren soll aufbauend auf den aktuellen Kartierungsergebnissen eine Abschätzung der durch die Wirkung von Luftschadstoffen auf Materialien verursachten ökonomischen Schäden vorgenommen werden.

Die Aufgabe der Entwicklung von Dosis-Wirkungsbeziehungen für bisher nicht in die Kartierung miteinbezogene Materialien oblag dem Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie ICT. Aufbauend auf Resultaten eigener Expositionsversuche konnten Dosis-Wirkungsbeziehungen für die Tiefenschädigung von Polyurethanlack (PUR), die Tiefenschädigung von Polyvinylchlorid (PVC), die Farbveränderung von Polyester, die Farbveränderung von Polyurethanlack (PUR) und den Schichtdickenabtrag von Alkydharzlack entwickelt werden. Die Dosis-Wirkungsbeziehungen sind so weit entwickelt, dass sie in die Kartierungsarbeiten miteinbezogen werden konnten. Erstmals konnte dadurch eine Abschätzung der durch das Zusammenspiel der Wirkung von Klima und Luftschadstoffen verursachten Schäden an Polymermaterialien vorgenommen werden. Dies ist vor dem Hintergrund der angestrebten ökonomischen Bewertung der Materialschäden ein wichtiger Schritt.

Die Projektkoordination sowie die Aufgabe der Durchführung der eigentlichen Kartierungsarbeiten oblag dem Institut für Navigation der Universität Stuttgart (INS). Dies umfasst die Akquisition von Daten zu verschiedenen Luftschadstoff- und Klimaparametern, die Erstellung von Grundlagenkarten zu Klima (Temperatur, Niederschlag, Luftfeuchtigkeit, Bestrahlungsstärke), Immission (SO_2 , O_3 , NO_2) und Deposition (H^+ , Cl^-) sowie die Durchführung der Kartierungsarbeiten durch Umsetzung der Dosis-Wirkungsfunktionen im GIS (Geographisches Informationssystem). Insgesamt konnten zwölf verschiedene Materialien in die Kartierung einbezogen werden. Das Spektrum der Materialien reicht hierbei von Metallen und Legierungen (verwitterungsbeständiger Stahl, Aluminium, Zink, Kupfer, Bronze), über Natursteine (Portland Kalk-

stein, Mansfield Sandstein), Anstrichsysteme auf Stahl (Alkyd-Melamin-Anstrich auf verzinktem Stahlblech, Alkyd-Anstrich auf Stahlplatten) und eine für mittelalterliche Glasfenster typische Glasart, bis zu Polymeren (PVC, PUR, Polyester, Alkydharzlack). Verwendet wurden Dosis-Wirkungsbeziehungen, die für ungeschützt exponierte Materialien entwickelt wurden. Für mittelalterliches Glas kam darüber hinaus eine Dosis-Wirkungsfunktion für regengeschützt exponiertes Material zum Einsatz. Ermittelt wurden jeweils die Schäden im achten Jahr der Exposition, beziehungsweise für einige Materialien die Schäden nach achtjähriger Expositionsdauer. Es liegen Kartierungsergebnisse für die Jahre 1990, 1995 und 1999 vor. Anhand der Kartierungsergebnisse kann aufgezeigt werden, dass die im Laufe der 90er Jahre aufgetretenen Veränderungen bezüglich der Konzentration und Deposition von Luftschadstoffen wirkungsseitig nicht ohne Folgen geblieben sind. Die Materialschäden sind im betrachteten Zeitraum merklich zurückgegangen.

Die Aufgabe der Entwicklung einer ökonomischen Abschätzung der zu erwartenden Materialschäden an Gebäuden und Bauwerken oblag dem Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung der Universität Stuttgart (IER). Die anthropogen mit Schadstoffen befrachtete Umgebungsluft führt zu einer beschleunigten Schädigung der verwendeten Baumaterialien. Metalle und Legierungen korrodieren rascher, die Verwitterung von Natursteinen wird intensiviert, die Schutzfunktion von Anstrichsystemen wird beeinträchtigt, Kunststoffe altern schneller. Damit einher geht eine ästhetische Beeinträchtigung von Materialoberflächen. Diese Effekte führen zu einer Verkürzung der Instandsetzungsintervalle und somit zu erhöhten Kosten. Die Abschätzung der Höhe dieser Kosten ist ein wesentliches Ziel dieses Forschungsvorhabens. Bei der Entwicklung der ökonomischen Abschätzung der Materialschäden konnte auf Erfahrungen und Resultate des bereits erwähnten Vorgängerprojekts zurückgegriffen werden. Der damals entwickelte Schadensfunktionsansatz wurde weiter verfolgt. Die der Abschätzung zugrunde liegenden Daten wurden kritisch überprüft und, soweit möglich, aktualisiert. Aufbauend auf entsprechend abgeleiteten Materialkatastern konnte eine Abschätzung der ökonomischen Schäden für die Jahre 1990, 1995 und 1999 vorgenommen werden.

1 Entwicklung von Dosis-Wirkungsbeziehungen für Polymere

1.1 Dosis-Wirkungsbeziehungen

Eine Dosis-Wirkungsbeziehung beschreibt den mathematischen Zusammenhang zwischen den Luftverunreinigungen, gemessen als Konzentration der betrachteten Schadgase und den weiteren, wirkenden Umwelteinflüssen wie Temperatur, Strahlung und Feuchte. Für ungeschützte, der freien Witterung ausgesetzten Materialien wird üblicherweise die Dosis-Wirkungsbeziehung in einen Teil der trockenen Deposition und einen Teil der nassen Deposition eingeteilt (UN/ECE 2003). Die nasse Deposition beinhaltet hierbei den Transport von Wasser und Inhaltsstoffen durch Niederschläge und die trockene Deposition alle anderen Prozesse. Für die mathematische Modellierung der Korrosionsrate von Metallen hat sich deshalb eine Aufteilung der Dosis-Wirkungsbeziehungen folgender Art etabliert:

$$K = \text{dry}(T, Rh, [SO_2], [NO_2], [O_3], t) + \text{wet}(Rain[H^+], t)$$

wobei K die Korrosionsrate ist, T ist die Temperatur in Grad C, Rh ist die relative Feuchte in %, [] ist die Konzentration in $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (SO_2 , NO_2 und O_3), t ist die Zeit in Jahren, Rain ist die Menge and Niederschlägen in mm und $[H^+]$ ist der Saure Regen in mg/l. Abhängig vom Material wird dabei die Korrosionsrate durch den Massenverlust (ML, g/m^2), den Oberflächenwiderstand (R, μm), ASTM D 1150-55 1987 (ASTM, 1-10), den Schichtdickenabtrag (LL, nm) oder der Massenzunahme (WI, $\mu\text{g}/\text{cm}^2$) beschrieben.

Beispiele für Dosis-Wirkungsbeziehungen sind (UN/ECE 2003):

Ungeschützte Exposition (Unsheltered Exposure):

Weathering steel (N=148, $R^2=0.68$)

$$ML = 34[SO_2]^{0.33} \exp\{0.020Rh + f(T)\}t^{0.33}$$

$$f(T) = 0.059(T-10) \text{ when } T < 10^\circ\text{C}, \text{ otherwise } -0.036(T-10)$$

Zinc (N=98, $R^2=0.84$)

$$ML = 1.4[SO_2]^{0.22} \exp\{0.018Rh + f(T)\}t^{0.85} + 0.029\text{Rain}[H^+]t$$

$$f(T) = 0.062(T-10) \text{ when } T < 10^\circ\text{C}, \text{ otherwise } -0.021(T-10)$$

Aluminium (N=106, $R^2=0.74$)

$$ML = 0.0021[SO_2]^{0.23}Rh \cdot \exp\{f(T)\}t^{1.2} + 0.000023\text{Rain}[Cl^-]t$$

$$f(T) = 0.031(T-10) \text{ when } T < 10^\circ\text{C}, \text{ otherwise } -0.061(T-10)$$

Copper (N=95, R²=0.73)

$$ML = 0.0027[\text{SO}_2]^{0.32}[\text{O}_3]^{0.79}\text{Rh}\cdot\exp\{f(T)\}t^{0.78} + 0.050\text{Rain}[\text{H}^+]t^{0.89}$$

$$f(T) = 0.083(T-10) \text{ when } T < 10^\circ\text{C}, \text{ otherwise } -0.032(T-10)$$

Cast Bronze (N=144, R²=0.81)

$$ML = 0.026[\text{SO}_2]^{0.44}\text{Rh}\cdot\exp\{f(T)\}t^{0.86} + 0.029\text{Rain}[\text{H}^+]t^{0.76} + 0.00043\text{Rain}[\text{Cl}^-]t^{0.76}$$

$$f(T) = 0.060(T-11) \text{ when } T < 11^\circ\text{C}, \text{ otherwise } -0.067(T-11)$$

Portland limestone (N=100, R²=0.88)

$$R = 2.7[\text{SO}_2]^{0.48}\exp\{f(T)\}t^{0.96} + 0.019\text{Rain}[\text{H}^+]t^{0.96}$$

$$f(T) = -0.018T$$

White Mansfield sandstone (N=101, R²=0.86)

$$R = 2.0[\text{SO}_2]^{0.52}\exp\{f(T)\}t^{0.91} + 0.028\text{Rain}[\text{H}^+]t^{0.91}$$

$$f(T) = 0 \text{ when } T < 10^\circ\text{C}, \text{ otherwise } -0.013(T-10)$$

Coil coated galvanised steel with alkyd melamine (N=138, R²=0.73)

$$(10\text{-ASTM}) = (0.0084[\text{SO}_2] + 0.015\text{Rh} + f(T))t^{0.43} + 0.00082\text{Rain}\cdot t^{0.43}$$

$$f(T) = 0.040(T-10) \text{ when } T < 10^\circ\text{C}, \text{ otherwise } -0.064(T-10)$$

Steel panels with alkyd (N=139, R²=0.68)

$$(10\text{-ASTM}) = (0.033[\text{SO}_2] + 0.013\text{Rh} + f(T))t^{0.41} + 0.0013\text{Rain}\cdot t^{0.41}$$

$$f(T) = 0.015(T-11) \text{ when } T < 11^\circ\text{C}, \text{ otherwise } -0.15(T-11)$$

Glass M1 representative of medieval stained glass windows (N=46, R²=0.56)

$$LL = 0.013[\text{SO}_2]^{0.49}\text{Rh}^{2.8}t$$

Geschützte Exposition (Exposure under a sheltering roof)**Weathering steel** (N=148, R²=0.76)

$$ML = 8.2[\text{SO}_2]^{0.24}\exp\{0.025\text{Rh} + f(T)\}t^{0.66}$$

$$f(T) = 0.048(T-10) \text{ when } T < 10^\circ\text{C}, \text{ otherwise } -0.047(T-10)$$

Zinc (N=91, R²=0.80)

$$ML = 0.058[\text{SO}_2]^{0.16}\text{Rh}\cdot\exp\{f(T)\}t^{0.49}$$

$$f(T) = 0.039(T-10) \text{ when } T < 10^\circ\text{C}, \text{ otherwise } -0.034(T-10)$$

Copper (N=98, R²=0.53)

$$ML = 0.00045[\text{SO}_2]^{0.28}[\text{O}_3]^{1.2}\text{Rh}\cdot\exp\{f(T)\}t^{0.78}$$

$$f(T) = 0.033(T-10) \text{ when } T < 10^\circ\text{C}, \text{ otherwise } -0.019(T-10)$$

Cast Bronze (N=148, R²=0.71)

$$ML = 0.014[\text{SO}_2]^{0.41}\text{Rh}\cdot\exp\{f(T)\}t$$

$$f(T) = 0.063(T-11) \text{ when } T < 11^\circ\text{C}, \text{ otherwise } -0.053(T-11)$$

Glass M3 representative of medieval stained glass windows (N=38, R²=0.53)

$$LL = 0.4[\text{NO}_2]^{0.37}\text{Rh}^{1.4}\exp\{f(T)\}t^{0.45}$$

$$f(T) = 0.041(T-10) \text{ when } T < 10^\circ\text{C}, \text{ otherwise } -0.10(T-10)$$

Geschützte Exposition in einer belüfteten Box

Nickel, (N=150, $R^2=0.87$)

$$WI = 2.1[SO_2]^{1.2} \exp\{f(T)\}t$$

$$f(T) = 0.17(T-9) \text{ when } T < 9^\circ\text{C}, \text{ otherwise } -0.047(T-9)$$

Tin, (N=150, $R^2=0.68$)

$$WI = 0.50[O_3]^{0.47} \exp\{f(T)\}t$$

$$f(T) = 0.11T$$

In allen Dosis-Wirkungsbeziehungen ist zu erkennen, dass die einfallende Globalstrahlung von der Sonne nicht berücksichtigt wurde. Diese ist jedoch für die Alterung von Polymeren von entscheidender Bedeutung, da sie zur Kettenspaltung, Nachhärtung und Versprödung der Materialien führt. In den Arbeiten des ICT wurde deshalb die Globalstrahlung als dominierender Umwelteinfluss für die Polymeralterung in die Dosis-Wirkungsbeziehungen integriert.

1.2 Dosis-Wirkungsbeziehungen für Polymere

Für die Alterung der Polymermaterialien ist die einfallende Globalstrahlung von besonderer Bedeutung. Nicht nur der für die Kettenspaltungen hauptsächlich verantwortliche, zerstörende UV-Anteil sondern auch der erwärmende langwellige Anteil beschleunigt die Alterung der Polymermaterialien im Freien. Da Polymere auch noch ein für viele Gase und Wasserdampf permeables Material sind, wirken die Schadgase und die Feuchtigkeit nicht nur an der Oberfläche, sondern dringen in das Material ein und führen zu einer Tiefenschädigung. Anders als bei Metallen wächst keine Korrosionsschicht auf sondern es erfolgt eine Zerstörung der Polymermatrix und ein Abbau und Abtrag des Materials, ein Materialverlust. Zum Beispiel werden dadurch bei glasfaserverstärkten Materialien die Fasern freigelegt. Die häufigen Wechsel der Oberflächenspannungen durch Trocknungs- und Befeuchtungsvorgänge führen häufig auch zur Rissbildung und zur weiteren Zerstörung des Polymerbauteils.

Nach GUILLET ET. AL. (RABEK 1995) kann für die Veränderung der oberflächennahen Materialeigenschaften eines Polymers eine Proportionalität zur einfallenden Strahlungsleistung angenommen werden, da die Anzahl der möglichen Kettenspaltung der Anzahl der einfallenden Photonen proportional ist. Die möglichen Kettenspaltungen führen dann zu einer Veränderung der betrachteten Materialeigenschaft. Die Materialeigenschaft ME hat folglich eine Abhängig-

keit von der auf das Material auftreffenden Bestrahlungsstärke der Globalstrahlung G und der dazu nötigen Expositionszeit t die Form:

$$ME \sim P_1 G \cdot t^{P_2}$$

mit P_1 und P_2 als Parametrisierungsfaktoren für die entsprechende, betrachtete Materialeigenschaft. Hat diese eine gleichzeitige Abhängigkeit vom Sauerstoffgehalt der Atmosphäre so schwankt P_2 zwischen 0,5 und 1 mit der Tendenz zu 0,5 wenn die photo-oxidative Schädigung überwiegt und der Tendenz zu $P_2=1$ wenn photo-oxidative Prozesse keine Rolle spielen. Die Bestrahlungsstärke der Globalstrahlung hängt dabei auch vom Expositionsort ab. Sie wurde im Rahmen der Untersuchung gemessen, kann aber auch aus Rechenmodellen ermittelt werden (VDI 2001).

Neben der photoinduzierten Alterung führt auch der Einfluss der Luftfeuchte, des Regens und der Schadgase zu einer Alterung der Polymeren. Während dem Lebenszyklus eines Kunststoffbauteils wird dieses zunächst nach der Produktion Wasserdampf und umgebende Gase aufnehmen bis zum Sättigungswert. Wegen der im Bereich von etwa $10^{-8} \text{cm}^2/\text{s}$ liegenden Diffusionskoeffizienten D der meisten Kunststoffe dauert dies bei Raumtemperatur mehrere Tage bei 1 mm Wandstärke des Bauteils. Aufgrund der quadratischen Abhängigkeit der Diffusionsprozesse können für dickere Teile jedoch Wochen und Monate vergehen. Nach dem Sättigungszustand verändert sich die Konzentration der eingedrungenen Gase und Feuchtigkeit mit der teilweise periodisch schwankenden Konzentration in der Umgebungsluft.

Die Eindringtiefe dieser periodischen Schwankungen bis zum Abfall der Konzentration auf $1/e$ der Schwankungsamplitude an der Materialoberfläche und Grenzfläche zur Umgebungsluft hängt von der Periodendauer T_p und dem Diffusionskoeffizienten D für das betrachtete Gas ab.

Dabei ist der Diffusionskoeffizient stark abhängig von der Temperatur und nimmt bei einer Erhöhung um 40°C ungefähr mit dem Faktor 10 zu. Für die Eindringtiefe ET eines Gases und des Wasserdampfes ergibt sich damit folgende Abhängigkeit:

$$ET \sim P_i (D_i(T) T_p / \Phi)^{1/2}$$

mit P_i als Parametrisierungsfaktor und $D(T)$ als temperaturabhängiger Diffusionskoeffizient (SAECHTLING & SEBROWSKI 1998).

Die Gesamtmenge an Schadgas und Wasserdampf, die in diese Schichtdicke eingedrungen ist, lässt sich dabei abschätzen als Produkt der jeweiligen Schadgaskonzentration und der Eindringtiefe und der Annahme einer Periodendauer von einem Jahr bei Gasen die zu Sommersmog- und Wintersmog-Bedingungen gehören. Damit ergeben sich Eindringtiefen von einigen hundert μm bis zu 2 mm.

Treten die periodischen Schwankungen der Gase jedoch kürzer auf, zum Beispiel durch ausgeprägte Tagesgänge, so ist die Eindringtiefe der Gase auf etwa 200 μm begrenzt. Die Eindringtiefe der Gase reduziert sich zusätzlich durch die möglicherweise stattfindende photoinduzierte chemische Reaktion im Polymer. Es kann deshalb für die photochemische Veränderung der Materialeigenschaft in der oberflächennahen Schicht des Polymers folgender Ansatz gemacht werden:

$$\text{ME} \sim P_1[\text{Gas1}](D_1(T)T_1/\text{Phi})^{1/2} + P_2[\text{Gas2}](D_2(T)T_2/\text{Phi})^{1/2} + \dots + P_N[\text{GasN}](D_N(T)T_N/\text{Phi})^{1/2}$$

mit:

[Gas#] entspricht der jeweiligen Konzentration des Gases oder Wasserdampfes,

$D_i(T)$ entspricht dem temperaturabhängigen Diffusionskoeffizienten des betrachteten Gases,

T der Temperatur der Probenoberfläche am Expositionsort,

P_i entspricht Parametrisierungsfaktoren für die Abbaureaktionen im Material,

P_4 entspricht einem Parametrisierungsfaktor für die Gewichtung des Anteils der photochemisch bedingten Materialveränderung gegenüber der Photoinduzierten Materialveränderung.

Damit ergibt sich im Allgemeinen eine Modellierung der Materialeigenschaftsveränderung einer oberflächennahen Schicht eines freibewitterten Polymers zu:

$$\text{ME} = \text{Const.} + P_1 G \cdot t^{P_2} + P_1[\text{Gas1}](D_1(T)T_1/\text{Phi})^{1/2} + P_2[\text{Gas2}](D_2(T)T_2/\text{Phi})^{1/2} + \dots + P_N[\text{GasN}](D_N(T)T_N/\text{Phi})^{1/2}$$

Im Folgenden wurde diese Dosis-Wirkungsbeziehung für die im Rahmen eines Vorläufer-Projektes (REICHERT & POHSNER 2002) ermittelten Materialeigenschaftsveränderungen eingesetzt. Es wurden zwei Dosis-Wirkungsbeziehungen für Polyurethanlack (PUR) sowie jeweils eine für Polyvinylchlorid (PVC), Polyester (PES) und Alkydharzlack entwickelt. Als Maß für

den Grad der Schädigung wurden die Tiefenschädigung (PUR, PVC), die Farbveränderung (PES, PUR) oder der Schichtdickenabtrag (Alkydharzlack) des jeweiligen Materials verwendet.

Bei längeren Expositionszeiten wird zusätzlich eine Zeitabhängigkeit für das Einwirken der Gase und der Feuchtigkeit in das Polymer benötigt, da die Eindringtiefe durch die periodische Anregung zwar nicht weiter erhöht wird, die Wahrscheinlichkeit einer Schädigung innerhalb dieser Eindringtiefe aber mit fortschreitender Expositionszeit zunimmt. Diese Zeitabhängigkeiten sind im folgenden Kapitel errechnet worden.

Je nach betrachteter Materialeigenschaft, spielt auch die Zeitabhängigkeit der Globalstrahlungseinflüsse eine Rolle. Der Exponent P_2 in dem Produkt $G \cdot t^{P_2}$ beschreibt die photo-oxidative Schädigung mit, der Abbau durch Strahlung alleine durch die Globalstrahlung zeigt dagegen eine Abhängigkeit von der Globalstrahlungsdosis mit der Quadratwurzel.

1.3 Ergebnisse für freibewitterte Polymermaterialien

1.3.1 Tiefenschädigung von Polyurethanlack (PUR) mit physikalischem Modell

In diesem Kapitel sind die Ergebnisse der Eindringtiefen der Anfärbemittel Acridinorange und Lugolscher Lösung (Jod-Jod-Kaliumreaktion) dargestellt. Diese Anfärbungen liefern als Ergebnis einen relativen Wert zur Tiefenschädigung eines Polymers. In diesem Kapitel werden nun die ermittelten Korrelationen mit einem Modell für die Dosiswirkungsbeziehung berechnet und die berechneten Werte mit den modellierten verglichen.

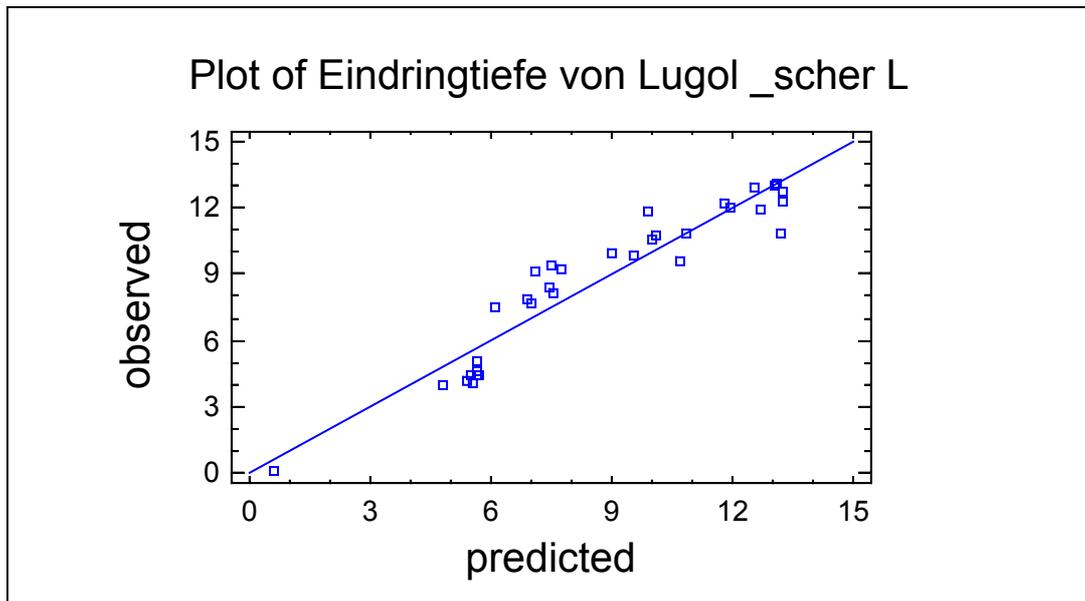


Abb. 1: Vergleich der Modellierung der errechneten Werte und der gemessenen Werte für die Eindringtiefe der Anfärbereaktion mit Lugolscher Lösung als Maß für die Tiefenschädigung von PUR durch Umwelteinflüsse

Die Dosis-Wirkungsbeziehung für die Tiefenschädigung von PUR lässt sich damit in folgender Form schreiben:

$$\begin{aligned} \text{Eindringtiefe in PUR} = & 0,5777 + 0,4900 \cdot (G \cdot t)^{1/2} \\ & + 0,0253 \cdot (10^{-9} \cdot T \cdot 10^8 / 3,141)^{1/2} \cdot rH \cdot t \\ & + 0,0184 \cdot (10^{-9} \cdot T \cdot 10^8 / 3,141)^{1/2} \cdot \text{NO}_2 \cdot t \\ & + 0,0122 \cdot (10^{-9} \cdot T \cdot 10^8 / 3,141)^{1/2} \cdot \text{O}_3 \cdot t \end{aligned}$$

Mit:

Eindringtiefe in PUR in μm

G = Bestrahlungsstärke (Jahresmittel in W/m^2)

t = Expositionszeit in Jahren

T = Mittlere Lufttemperatur am Standort (Jahresmittelwert in $^{\circ}\text{C}$)

rH = Mittlere relative Feuchte am Standort (Jahresmittelwert in %)

NO_2 = Mittlere Konzentration für NO_2 in $\mu\text{g}/\text{m}^3$

O_3 = Mittlere Konzentration für Ozon in $\mu\text{g}/\text{m}^3$

Für die Modellierung ergeben sich folgende Regressionswerte:

$$R^2 = 89,60 \%$$

$$R^2 \text{ (adjusted, gewichtet mit der Anzahl der Variablen)} = 88,12 \%$$

$$\text{Standard Abweichung} = 1,17$$

Durch diesen physikalisch begründbaren Ansatz ergeben sich sehr gute Werte für die Modellierung der Eindringtiefe des Anfärbemittels in die Polyurethanlackschicht. Auf die Einbeziehung von SO_2 wurde hier verzichtet, da eine leicht negative Korrelation für SO_2 entstehen würde, die möglicherweise auf die abnehmenden SO_2 Konzentrationen in der Atmosphäre zurückzuführen ist.

1.3.2 Tiefenschädigung von Polyvinylchlorid-Fensterprofilen (PVC) mit physikalischem Modell

In diesem Kapitel wird die Eindringtiefe von Acridinorange als Maß für die Tiefenschädigung von PVC mit dem überprüften Modell für die Dosis-Wirkungsfunktion berechnet und mit den gemessenen Werten verglichen.

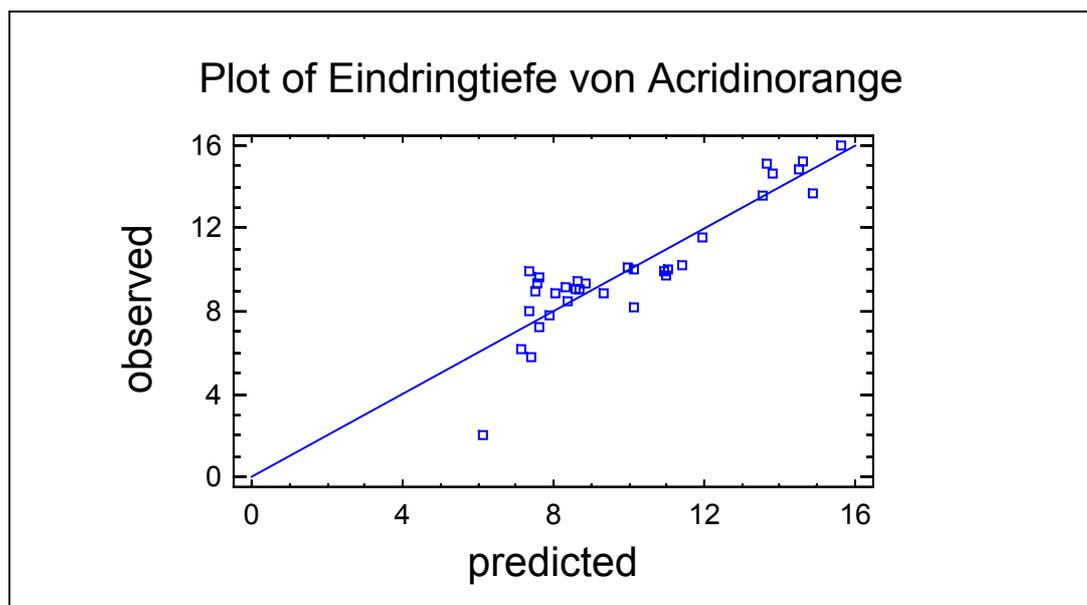


Abb. 2: Vergleich der Modellierung der errechneten Werte und der gemessenen Werte für die Eindringtiefe einer Anfärbereaktion als Maß für die Tiefenschädigung von PVC durch Umwelteinflüsse

Die Dosis-Wirkungsbeziehung für die Tiefenschädigung von PVC lässt sich damit in folgender Form schreiben:

$$\begin{aligned} \text{Eindringtiefe in PVC} = & 6,1332 + 0,0438 \cdot (G \cdot t)^{1/2} \\ & + 0,0153 \cdot (10^{-9} \cdot T \cdot 10^8 / 3,141)^{1/2} \cdot rH \cdot t \\ & + 0,0052 \cdot (10^{-9} \cdot T \cdot 10^8 / 3,141)^{1/2} \cdot \text{SO}_2 \cdot t \\ & + 0,0098 \cdot (10^{-9} \cdot T \cdot 10^8 / 3,141)^{1/2} \cdot \text{NO}_2 \cdot t \\ & + 0,0002 \cdot (10^{-9} \cdot T \cdot 10^8 / 3,141)^{1/2} \cdot \text{O}_3 \cdot t \end{aligned}$$

Mit:

Eindringtiefe in PVC in μm

G = Bestrahlungsstärke (Jahresmittel in W/m^2)

t = Expositionszeit in Jahren

T = Mittlere Lufttemperatur am Standort (Jahresmittelwert in $^{\circ}\text{C}$)

rH = Mittlere relative Feuchte am Standort (Jahresmittelwert in %)

SO_2 = Mittlere Konzentration für SO_2 in $\mu\text{g}/\text{m}^3$

NO_2 = Mittlere Konzentration für NO_2 in $\mu\text{g}/\text{m}^3$

O_3 = Mittlere Konzentration für Ozon in $\mu\text{g}/\text{m}^3$

Damit ergeben sich folgende Regressionswerte:

$$R^2 = 81,4285 \%$$

$$R^2 \text{ (adjusted, bewertet hinsichtlich der Anzahl der verwendeten Parameter)} = 77,98 \%$$

$$\text{Standard Abweichung} = 1,40$$

Der Vorteil in dieser Gleichung liegt darin, dass alle Umwelteinflüsse einen Beitrag zur Tiefenschädigung des Polymers liefern. Durch Einbeziehung der Expositionszeit in die einzelnen, additiven Terme ergibt sich eine auch für Extrapolationen geeignete Dosis-Wirkungsbeziehung. Der Korrelation der Einzelparameter Eindringtiefe als Funktion der Strahlungsdosis wird über den Wurzelausdruck Rechnung getragen, der etwas bessere Ergebnisse hinsichtlich der Korrelation zu einer linearen Abhängigkeit liefert.

Nachteilig ist möglicherweise noch der relativ hohe Wert für die Konstante, der sich daraus ergibt, dass bereits nach einem Jahr Freibewitterung die Eindringtiefen von $2 \mu\text{m}$ (Nullprobe) auf Werte über $7 \mu\text{m}$ ansteigen und der weitere Verlauf der Zunahme der Eindringtiefe dann langsamer ansteigt.

Die Gleichung ist deshalb eher für längere Expositionszeiten genau. Dies zeigt sich besonders bei den hohen Werten für die Eindringtiefe, die durch das Modell gut beschrieben werden.

1.3.3 Farbveränderung beim glasfaserverstärkten Polyester (PES) mit physikalischem Modell

In diesem Abschnitt sind die Ergebnisse der Farbmessungen (Remission) an den bewitterten Polyester-Proben dargestellt. Die ermittelten Farbveränderungen von PES und die durch das Modell berechneten (Dosiswirkungsbeziehung) werden miteinander verglichen.

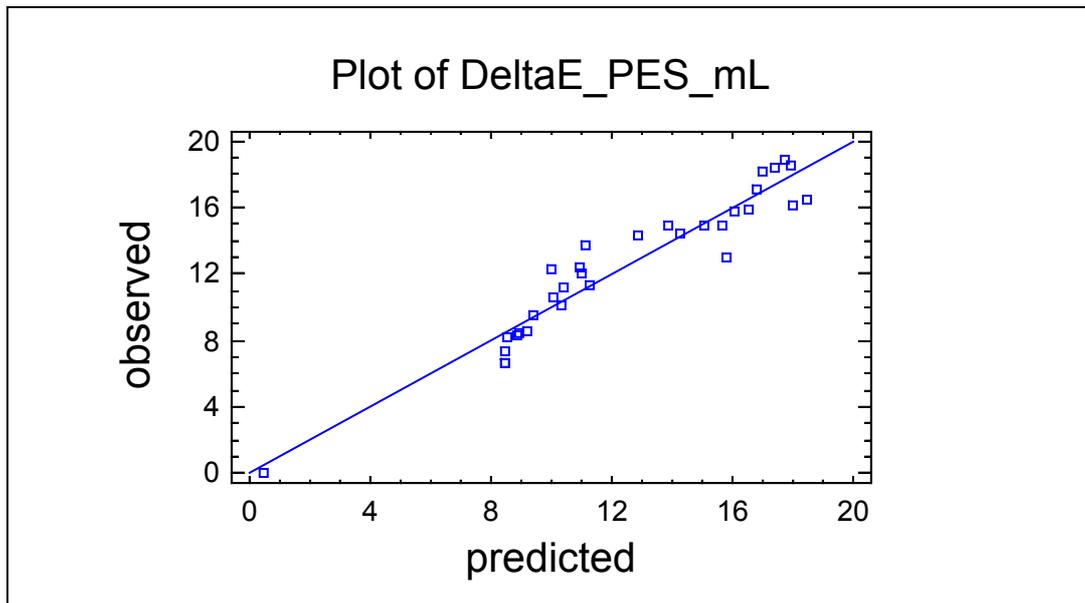


Abb. 3: Vergleich der Modellierung der errechneten Werte und der gemessenen Werte für die Farbveränderung von PES durch Umwelteinflüsse

Die Dosis-Wirkungsbeziehung für die Farbveränderung von PES lässt sich damit in folgender Form schreiben:

$$\begin{aligned} \text{Delta E} &= 0,4383 + 0,5979 \cdot (G \cdot t^{0,4})^{1/2} \\ &+ 0,0354 \cdot (10^{-9} \cdot T \cdot 10^{8/3,141})^{1/2} \cdot rH \cdot t^{0,65} \\ &+ 0,0064 \cdot (10^{-9} \cdot T \cdot 10^{8/3,141})^{1/2} \cdot SO_2 \cdot t^{0,65} \\ &+ 0,0195 \cdot (10^{-9} \cdot T \cdot 10^{8/3,141})^{1/2} \cdot O_3 \cdot t^{0,65} \end{aligned}$$

Mit:

Delta E = Farbänderung von PES (dimensionsloser Wert gemessen im Lab*System)

G = Bestrahlungsstärke (Jahresmittel in W/m²)

t = Expositionszeit in Jahren

T = Mittlere Lufttemperatur am Standort (Jahresmittelwert in °C)

rH = Mittlere relative Feuchte am Standort (Jahresmittelwert in %)

SO₂ = Mittlere Konzentration für SO₂ in µg/m³

O₃ = Mittlere Konzentration für Ozon in µg/m³

Damit ergeben sich folgende Regressionswerte:

$$R^2 = 91,68 \%$$

$$R^2(\text{adjusted}) = 90,45 \%$$

$$\text{Standard Abweichung} = 1,33$$

In der Gleichung für die Farbänderung wurde auf die Zunahme von NO_2 verzichtet, da sich eine leicht negative Korrelation zeigen würde zu Ozon und Schwefeldioxid.

1.3.4 Schichtdickenabtrag von Alkydharzlack-Anstrichfarbe mit Eisenglimmer (Alkyd) auf exponierten Stahlblechen

In diesem Abschnitt sind die Ergebnisse der am Querschliff des Stahlblechs ermittelten Werte für die Schichtdicke des Alkydharzlackes an den bewitterten Proben dargestellt. Die ermittelten Schichtdickenabträge in μm und die durch das Modell berechneten (Dosiswirkungsbeziehung) werden miteinander verglichen.

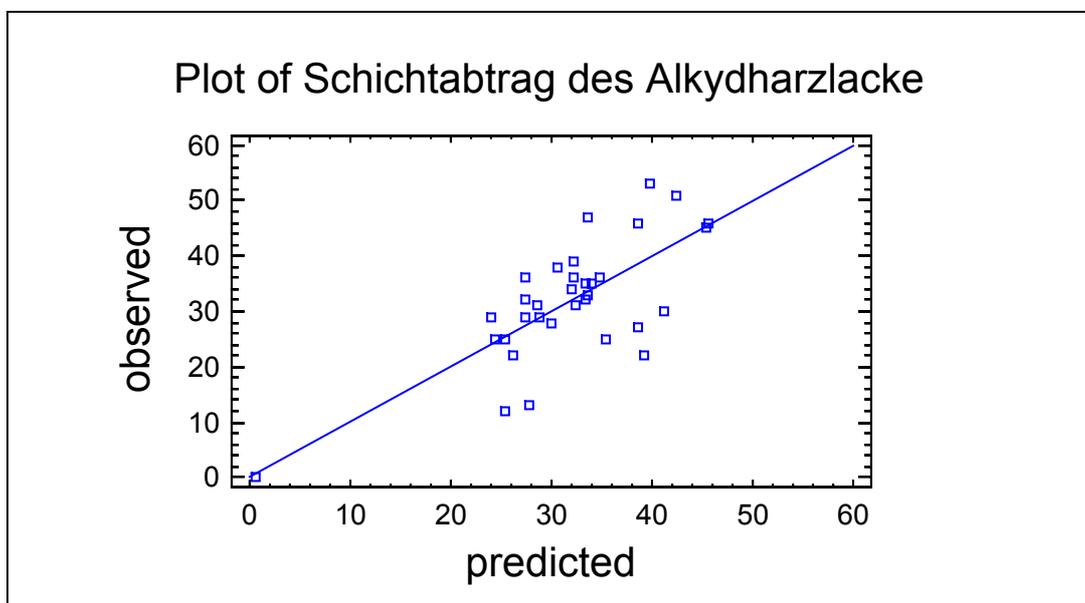


Abb. 4: Vergleich der Modellierung der errechneten Werte und der gemessenen Werte für den Schichtdickenabtrag des Alkydharzlackes auf Stahlblechen

Die Dosis-Wirkungsbeziehung für den Schichtdickenabtrag von Alkydharzlacken lässt sich damit in folgender Form schreiben:

$$\begin{aligned}
 \text{Schichtabtrag} &= 0,5111 + 1,1800 \cdot (G \cdot t^{0,9})^{1/2} \\
 &+ 2,6033 \cdot (rH \cdot t^{0,7})^{1/2} \\
 &- 0,1081 \cdot (10^{-9} \cdot T \cdot 10^8 / 3,141)^{1/2} \cdot \text{NO}_2 \cdot t^{0,5} \\
 &- 0,0257 \cdot (10^{-9} \cdot T \cdot 10^8 / 3,141)^{1/2} \cdot \text{SO}_2 \cdot t^{0,5} \\
 &- 0,2376 \cdot (10^{-9} \cdot T \cdot 10^8 / 3,141)^{1/2} \cdot \text{O}_3 \cdot t^{0,95} \\
 &+ 0,0005 \cdot N
 \end{aligned}$$

Mit:

Schichtabtrag = Dickenabnahme des Lacksystems in μm

G = Bestrahlungsstärke (Jahresmittel in W/m^2)

t = Expositionszeit in Jahren

T = Mittlere Lufttemperatur am Standort (Jahresmittelwert in $^{\circ}\text{C}$)

rH = Mittlere relative Feuchte am Standort (Jahresmittelwert in %)

SO₂ = Mittlere Konzentration für SO₂ in $\mu\text{g}/\text{m}^3$

NO₂ = Mittlere Konzentration für NO₂ in $\mu\text{g}/\text{m}^3$

O₃ = Mittlere Konzentration für Ozon in $\mu\text{g}/\text{m}^3$

N = Niederschlagsmenge in mm

Damit ergeben sich folgende Regressionswerte:

$$R^2 = 53,91 \%$$

$$R^2 (\text{adjusted}) = 43,28 \%$$

$$\text{Standard Abweichung} = 8,36$$

Aufgrund der großen Schwankungen bei den Lackschichtdicken zu Beginn der Exposition ist beim Schichtdickenabtrag auch eine große Schwankung bei den Schichtdickenabnahmen zu erkennen. Trotzdem lässt sich ein deutlicher Zusammenhang der Schichtdickenabnahme mit dem Strahlungseinfluss (Photoinduzierte Schädigung) und der Luftfeuchte und dem Regen (Hydrolyse) erkennen. Die Schadgase dagegen haben aufgrund der Korrosionsprodukte eher einen Effekt der Schichtdickenabnahmeverzögerung.

1.3.5 Farbveränderungen von Polyurethanlacken PUR

In diesem Abschnitt sind die Ergebnisse der Farbmessungen der PUR-Lackproben auf dem PUR-Autospoiler vor und nach den Bewitterungszeiten an den verschiedenen Standorten als Delta-E-Werte (Lab*-System) dargestellt (observed-Achse). Die ermittelten, dimensionslosen Delta E Werte und die durch das Modell berechneten (Dosiswirkungsbeziehung) werden miteinander verglichen.

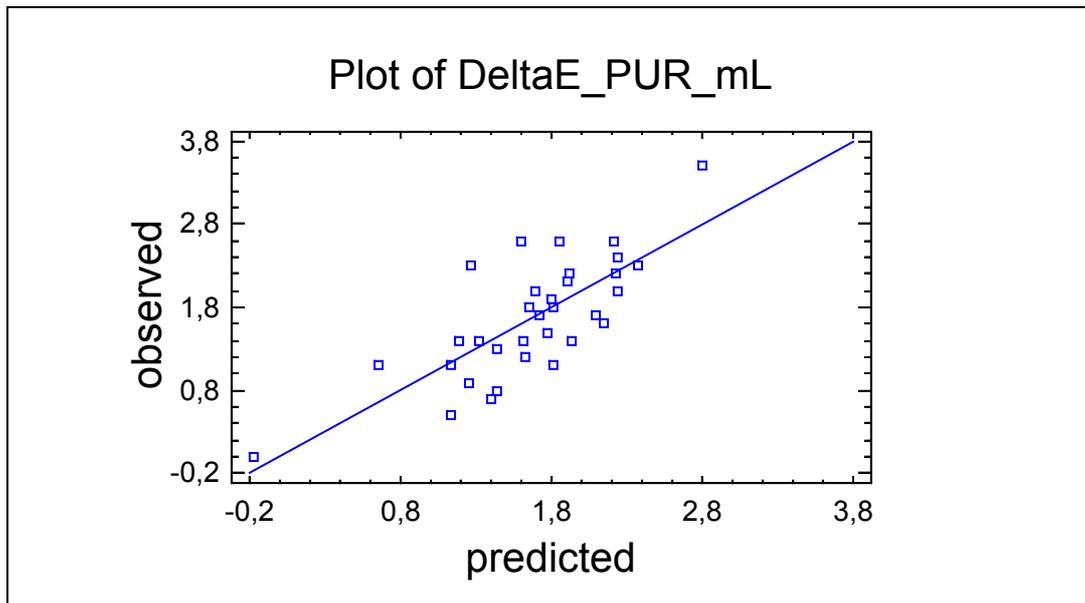


Abb. 5: Vergleich der Modellierung der errechneten Werte und der gemessenen Werte für die Farbänderung Delta E des PUR-Lackes auf dem PUR-Autospoiler

Die Dosis-Wirkungsbeziehung für die Farbänderung des PUR-Lackes lässt sich damit in folgender Form schreiben:

$$\begin{aligned}
 \text{Delta E} &= -0,1712 + 0,1272 \cdot (G \cdot t^{0,3})^{1/2} \\
 &+ 0,1341 \cdot (rH \cdot t^{0,95})^{1/2} \\
 &+ 0,0031 \cdot (10^{-9} \cdot T \cdot 10^8 / 3,141)^{1/2} \cdot \text{NO}_2 \cdot t^{0,5} \\
 &- 0,0310 \cdot (10^{-9} \cdot T \cdot 10^8 / 3,141)^{1/2} \cdot \text{SO}_2 \cdot t^{0,5} \\
 &- 0,0149 \cdot (10^{-9} \cdot T \cdot 10^8 / 3,141)^{1/2} \cdot \text{O}_3 \cdot t^{0,9} \\
 &- 0,00005 \cdot N
 \end{aligned}$$

Mit:

Delta E = Farbänderung im Lab*-System (dimensionslos)

G = Bestrahlungsstärke (Jahresmittel in W/m²)

t = Expositionszeit in Jahren

T = Mittlere Lufttemperatur am Standort (Jahresmittelwert in °C)

rH = Mittlere relative Feuchte am Standort (Jahresmittelwert in %)

SO₂ = Mittlere Konzentration für SO₂ in µg/m³

NO₂ = Mittlere Konzentration für NO₂ in µg/m³

O₃ = Mittlere Konzentration für Ozon in µg/m³

N = Niederschlagsmenge in mm

Damit ergeben sich folgende Regressionswerte:

$$R^2 = 58,34 \%$$

$$R^2 (\text{adjusted}) = 48,73 \%$$

$$\text{Standard Abweichung} = 0,513$$

Da der PUR-Lack fast weiß ausgelegt war, ergaben sich fast nur Änderungen in der Hell-Dunkel-Achse (L-Achse) des Farbsystems. Dadurch ist auch der Einfluss der Probenverschmutzung nicht zu vernachlässigen und das „Auskreiden“ der Proben bei pigmentierten Lacken.

Dies führt zur Kompensation der Vergrauung bei langen Bewitterungszeiten, die sich sogar fast noch umkehrt.

1.4 Befragungsergebnisse

Eine weitere Aufgabe des Fraunhofer-Instituts für Chemische Technologie ICT war eine bundesweite Abfrage von Daten zu Expositionsversuchen, um einen Überblick über die bisher in Deutschland durchgeführten Bewitterungsprogramme zu erhalten und um zu prüfen, ob die dabei gewonnenen Daten zur Ableitung von Dosis-Wirkungsfunktionen für weitere Materialien geeignet und verfügbar sind. Vor dem Hintergrund der angestrebten ökonomischen Bewertung der Materialschäden waren hierbei folgende Materialien von besonderem Interesse: Hausfassadenfarben und Lacke, Beton, Dachziegel sowie Putze und Mörtel.

Die meisten geförderten, öffentlichen Expositionsprogramme betrachten jedoch oft nur kurze Expositionszeiten, machen häufig nur visuelle, nicht numerisch quantifizierbare Bewertungen und die Anzahl der ermittelten Datenpunkte sind für eine Modellierung nicht ausreichend. Von den Herstellerfirmen sind praktisch keine relevanten Daten zu bekommen. Im folgenden sind die befragten Institute, die sich aktiv an der Umfrage beteiligt haben, aufgeführt, die beantworteten Fragebögen sind in den Zwischenberichten veröffentlicht worden (ANSHELM ET AL. 2002a, ANSHELM ET AL. 2002b, ANSHELM ET AL. 2003).

Firma/Institut:	Holzforschung München
Name, Vorname:	Dipl.-Ing. Manfred Sailer
Adresse:	Winzererstr. 45, 80797 München
Tel./Fax:	Tel: 089/2180-6479 Fax: -6487
E-Mail:	sailer@holz.forst.tu-muenchen.de
Webseite Firma/Institut:	www.holz.forst.tu-muenchen.de

Firma/Institut: BAM Berlin
Name, Vorname: Dr. Schulz, Ulrich
Adresse: Unter den Eichen 87, 12205 Berlin
Tel./Fax: 030/81043313/1617
E-Mail: ulrich.schulz@bam.de
Webseite Firma/Institut: www.bam.de

Firma/Institut: Wilhelm-Klauditz-Institut
Name, Vorname: Dr. Hora, Guido
Adresse: Bienroder Weg 54 e; 38108 Braunschweig
Tel./Fax: Tel: 0531/2155-373 Fax: 0531-2155-902
E-Mail: guido.hora@wki.fhg
Webseite Firma/Institut: www.wki.fhg.de

Firma/Institut: Institut für Bauforschung ibac
Name, Vorname: Wolff, Lars
Adresse: Schinkelstr. 3; 52062 Aachen
Tel./Fax: Tel: 0241/80-96781; Fax: 0241/80-92139
E-Mail: wolff@ibac.rwth-aachen.de
Webseite Firma/Institut: www.ibac.rwth-aachen.de

Firma/Institut: Fraunhofer-Institut für Silicatforschung ISC
Name, Vorname: Dr. Römich, Hannelore
Adresse: Außenstelle Bronnbach, 97877 Wertheim-Bronnbach
Tel./Fax: 0931/4100-703, Fax -799
E-Mail: roemich@isc.fhg.de
Webseite Firma/Institut: www.isc.fhg.de

Firma/Institut: Fraunhofer-Institut für Bauphysik
Name, Vorname: Hr. Krus, Dr., Martin
Adresse: Postfach 1152
Tel./Fax: 08024/643-0 Fax. 08024/643-66
E-Mail: krus@hoki.ibp.fhg.de
Webseite Firma/Institut: www.bauphysik.de

Firma/Institut: Rathgen-Forschungslabor
Name, Vorname:
Adresse: Schloß-Str. 1a, 14059 Berlin
Tel./Fax: Tel: 030/32674910 Fax: 303/32674912
E-Mail: rf@smb.spk-berlin.de
Webseite Firma/Institut: www.smb.spk-berlin.de

Firma/Institut: Landesumweltamt NRW
Name, Vorname: Garus, Gisela
Adresse: Wallneyer Str. 6, 45133 Essen
Tel./Fax: 0201/7995-1404 Fax: -1574
E-Mail: gisela.garus@lua.nrw.de
Webseite Firma/Institut: www.lua.nrw.de

Firma/Institut	Landesumweltamt NRW (LUA NRW)
Name, Vorname	Dr. Köllner, Barbara
Adresse	Wallneyer Str. 6, 45133 Essen
Tel./Fax	0201/7995-1218, Fax: -1574
E-Mail	barbara.koellner@lua.nrw.de
Webseite Firma/Institut	www.lua.nrw.de
Firma/Institut	Eternit AG, Abt. CCL
Name, Vorname	Schneider, Michaela
Adresse	An der B3, 69181 Leimen
Tel./Fax	06224/701-562, Fax: -559
E-Mail	michaela.schneider@eternit.de
Webseite Firma/Institut	www.eternit.de
Firma/Institut	Institut für Massivbau und Baustofftechnologie Abt. Baustofftechnologie, Amtliche Materialprüfanstalt
Name, Vorname	Dr.-Ing. Ulf Guse
Adresse	Gotthard-Franz-Str. 3, 76131 Karlsruhe
Tel./Fax	0721/608-3894, Fax: -7796
E-Mail	ulf.guse@ifmb.uka.de
Webseite Firma/Institut	www.ifmb.uka.de
Firma/Institut	Institut für Mineralogie und Petrographie Leopold-Franzen-Universität Innsbruck
Name, Vorname	Dipl.-Geol. Cristiph-Franzen
Adresse	Innrain 52, A-6020 Innsbruck
Tel./Fax	++43 (0) 512 / 507-5511 , Fax: -2926
E-Mail	christoph.franzen@uibk.ac.at
Webseite Firma/Institut	www.uibk.ac.at/c/c7/c714/

Viele der befragten Firmen konnten aus Vertraulichkeitsgründen keine Daten weitergeben oder konnten die Daten aus früheren, längeren Versuchen nicht mehr zur Verfügung stellen. Anbei als Beispiel eine kleine Tabelle der befragten Hersteller von Anstrichfarben.

Tab. 1: Liste der befragten Hersteller von Anstrichfarben

Alpina Farben Vertriebs GmbH & Co. KG Rossdörfer Str. 50 64372 Ober-Ramstadt www.alpina-farben.de 06154/71-0	Wissenschaftlich-Technische Beratung Dr. Dieter Kockott Vogelsbergerstr. 27 63456 Hanau 06181/659162 kockott@t-online.de
Daxorol Putz und Farben GmbH Zum Trauberg 9 57334 Bad Laasphe-Feudinggen www.daxorol.com 02754/37480	Dr. Jörg Boxhammer ATLAS Material Testing Technology GmbH Vogelsbergerstr. 22 63589 Linsengericht-Altenhasslau 06051/707276 jboxhammer@atlasmtt.de
Teutoburg GmbH Systeme für den Bautenschutz Postfach 2842 32760 Detmold bzw. Wiebuschstr. 2-8 32760 Detmold www.teutoburg.de 05231/953-789	Griwecolor Wieselbrunnen 2 78199 Bräunlingen-Döggingen 07707-9904-0 www.griwicolor.de
DuPont Performance Coatings und Co. KG Im Christbusch 25 42285 Wuppertal www.perfomance-coatings.de 0202/5292753 Hr. Weiß	Brillux Weseler Straße 401 48163 Münster Tel. 02 51 / 71 88 - 0 muenster@brillux.de www.brillux.de
Caparol Farben Lacke Bautenschutz GmbH Dr. Engin Bagda Rossdörferstrasse 50 64372 Ober-Ramstadt 06154/71-280 engin.bagda@daw.de	Dinova Bachstraße 38 53639 Königswinter Telefon: (022 23) 72-0 www.dinova.de

Neben der Befragung nach den Expositionsversuchen und Bewitterungsexperimenten wurden auch noch Kostenbefragungen hinsichtlich der Reparatur von Schäden and Gebäuden und den Renovierungs- und Austauschkosten für Materialien erfragt. Die Ergebnisse wurden ausführlich im 3. Zwischenbericht dargestellt (ANSHELM ET AL. 2003).

2 Kartierung von Materialschäden in Deutschland

Dem Institut für Navigation der Universität Stuttgart (NS) oblag die Durchführung der eigentlichen Kartierungsarbeiten. Wesentliche inhaltliche Aufgaben der Kartierung von Materialschäden in Deutschland waren:

- Datenbeschaffung und Aufbereitung der Grundlagenkarten für die Kartierung der aktuellen Korrosion für die Materialien verwitterungsbeständiger Stahl, Zink, Aluminium, Bronze, Kupfer, Mansfield Sandstein, Portland Kalkstein, Alkyd-Anstrich auf Stahlplatten, Alkyd-Melamin-Anstrich auf verzinktem Stahlblech, Glas, Polyurethanlack, Polyvinylchlorid, Polyester und Alkydharzlack (Kapitel 2.1).
- Berechnung und Kartierung der aktuellen Korrosion der oben aufgeführten Materialien für die Jahre 1990, 1995 und 1999 und Weiterleitung der Kartierungsergebnisse an das Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung der Universität Stuttgart (IER) (Kapitel 2.2).
- Berechnung und Kartierung der Überschreitung akzeptabler Korrosionsraten für die Jahre 1990, 1995 und 1999 für die Materialien verwitterungsbeständiger Stahl, Zink, Aluminium, Kupfer, Bronze, Portland Kalkstein und Mansfield Sandstein (Kapitel 2.3).
- Durchführung der „Fallstudie Ballungsraum“, bei der geklärt werden sollte, ob die Einbindung räumlich hochaufgelöster Daten aus Ballungsräumen zu einer Verbesserung der Kartierungsarbeiten führen kann (Kapitel 2.4).

Alle wesentlichen im Berichtszeitraum erzielten Ergebnisse zu den genannten Fragestellungen werden in den Kapiteln 2.1 bis 2.4 ausführlich erläutert.

2.1 Datenbeschaffung und Aufbereitung der Grundlagenkarten

Der Datenbedarf für die Kartierungsarbeiten ergab sich aus den Vorgaben der Dosis-Wirkungsfunktionen. Für die Kartierung der aktuellen Korrosion der oben aufgeführten Materialien wurden Daten zu folgenden Klima- und Schadstoffparametern benötigt:

- Niederschlag (Jahressumme in mm)

- Temperatur (Jahresmittel in °C)
- Relative Luftfeuchte (Jahresmittel in %)
- Bestrahlungsstärke (Jahresmittel in W/m²)
- Protonenfracht (Jahressumme in mg/m²)
- Chloridfracht (Jahressumme in mg/m²)
- Schwefeldioxid-Konzentration (Jahresmittel in µg/m³)
- Ozon-Konzentration (Jahresmittel in µg/m³)
- Stickstoffdioxid-Konzentration (Jahresmittel in µg/m³)

Bei der Datenbeschaffung und Datenaufbereitung konnte auf eine umfangreiche Datensammlung zurückgegriffen werden, die am Institut für Navigation der Universität Stuttgart (INS) im Zusammenhang mit weiteren vom Umweltbundesamt geförderten Projekten ähnlicher Fragestellung aufgebaut worden ist. Diese Datensammlung wurde im Berichtszeitraum fortlaufend aktualisiert und erweitert.

Die Daten zu den Klimaparametern wurden beim Deutschen Wetterdienst (DWD) akquiriert. Immissionsdaten wurden vom Umweltbundesamt zur Verfügung gestellt. Sie stammen aus den Messnetzen der Bundesländer und dem Messnetz des Umweltbundesamtes. Die Daten zur Chlorid- und Protonenfracht wurden von den Umweltbehörden der Länder, den Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalten, vom Umweltbundesamt und anderen Forschungseinrichtungen zur Verfügung gestellt (GAUGER ET AL. 2002).

Der zum Zeitpunkt des Projektabschlusses verfügbare Datensatz erlaubt die Kartierung der aktuellen Korrosion der in Kapitel 2.2 aufgeführten Materialien für die Jahre 1990-1999¹. In den Jahren vor 1990 stehen nicht für alle Eingangsparameter Messdaten in ausreichender Menge zur Verfügung. Insbesondere in den neuen Bundesländern klaffen hier große Lücken. So gibt es für diese Gebiete beispielsweise bis einschließlich 1989 nur für wenige Orte gesicherte Informationen zu den Jahresmittelwerten Konzentration gasförmiger Luftschadstoffe (SO₂, O₃, NO₂).

¹ mit Ausnahme der Polymere. Hier ist die Kartierung nur für die Jahre 1990, 1995 und 1999 möglich, weil nur für diese Jahre Daten zur mittleren Bestrahlungsstärke verfügbar sind.

Im Folgenden werden die für die Kartierung der aktuellen Korrosion verwendeten Grundlagenkarten zu den Klima- und Schadstoffparametern näher erläutert. Dies ist für die Interpretation der Kartierungsergebnisse hilfreich, denn die räumlichen Muster einzelner Grundlagenkarten tauchen, je nach Bedeutung des Parameters für die Schädigung des Materials, in den Kartierungsergebnissen wieder auf. Ist zum Beispiel die SO_2 -Konzentration der Luft für die Schädigung eines Materials von besonderer Bedeutung, so werden die räumlichen Muster der Karte der SO_2 -Konzentration im Kartierungsergebnis deutlich sichtbar. In diesem Fall ist das Risiko einer starken Schädigung des betreffenden Materials dort hoch, wo hohe SO_2 -Konzentrationen auftreten. Auf die Instandhaltungskosten muss dies nicht unbedingt durchschlagen, denn hierfür spielt neben der Höhe der zu erwartenden Materialschäden auch die Menge des am jeweiligen Ort tatsächlich exponierten Materials eine Rolle.

2.1.1 Niederschlag

Abbildung 6 und Karte 1 zeigen die Jahressummen des Niederschlags für die Jahre 1990 bis 1999. Es ist keine gerichtete Entwicklung erkennbar. Hohe Niederschlagsmengen sind für den Alpennordrand und die Mittelgebirgsregionen typisch. Im Alpenraum kann die jährliche Niederschlagssumme Werte von mehr als 4000 mm erreichen. In den meisten Jahren liegt das absolute Maximum in Deutschland um die 3300 mm Niederschlag. Niederschlagssummen von mehr als 1000 mm sind für viele Mittelgebirgsregionen typisch, können aber auch in Schleswig-Holstein und im nördlichen Niedersachsen auftreten. Hier spielt die Nähe zur Nordsee eine Rolle. Jährliche Niederschlagssummen von weniger als 500 mm treten gehäuft in Sachsen-Anhalt und Brandenburg, aber auch in der Wetterau auf. Hierfür ist die Lage im Windschatten der Mittelgebirge, und im Falle der Wetterau auch die Beckenlage verantwortlich.

Die räumlichen Muster der Verteilung der jährlichen Niederschlagssummen werden in einigen Fällen in den Karten der jährlichen Materialschädigung sichtbar. Insbesondere für die Schädigung der Anstrichsysteme auf Stahl scheint die Höhe der jährlichen Niederschlagssummen von besonderer Bedeutung zu sein (Karte 20 und 21).

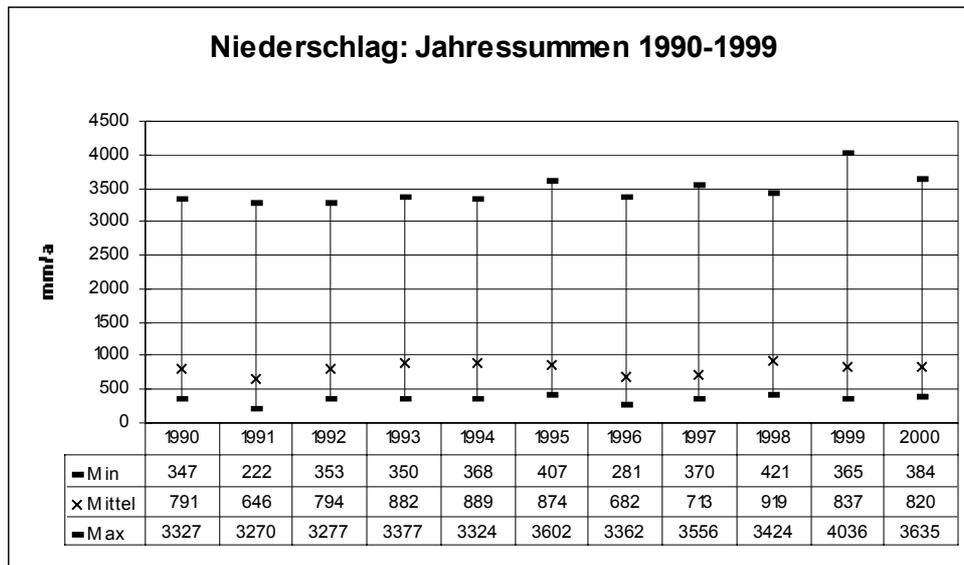
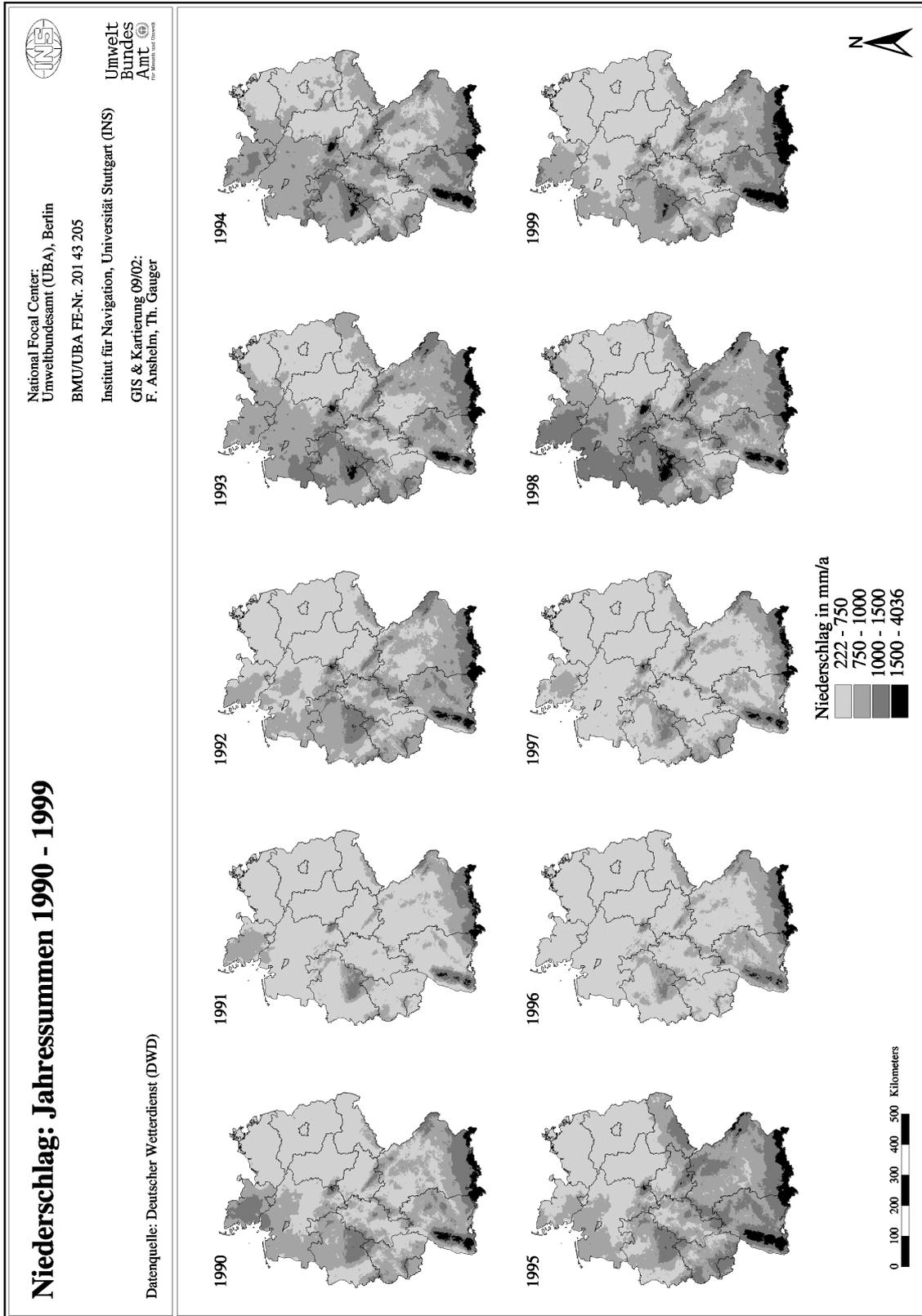


Abb. 6: Niederschlag: Jahressummen 1990-1999



Karte 1: Niederschlag: Jahressummen 1990-1999

2.1.2 Temperatur

Abbildung 7 und Karte 2 zeigen die Jahresmittel der Temperatur in Deutschland für die Jahre 1990-1999. Die Jahresmittel der Temperatur bewegen sich zwischen $-4,4$ und $12,9$ °C. Jahresmittelwerte kleiner 0 °C treten nur im Alpenraum auf. In den deutschen Mittelgebirgen liegen die Jahresmittelwerte in der Regel zwischen 6 und 8 °C. Für das norddeutsche Flachland sind Jahresmittelwerte von 8 - 10 °C typisch. Werte über 10 °C treten vornehmlich in Becken und Tälern auf (Oberrheinische Tiefebene, Neckarland, Rhein-Main-Gebiet, Niederrheinische Bucht und Münsterland). Auch in den regenarmen Gebieten Sachsen-Anhalts und Brandenburgs (Magdeburger Börde, u.a.) wurden in den 90er Jahren hin und wieder Jahresmittelwerte von mehr als 10 °C erreicht.

Bei der Mehrzahl der Materialien geht der Einflussfaktor Temperatur oberhalb beziehungsweise unterhalb einer bestimmten Grenztemperatur unterschiedlich stark in die Berechnung der aktuellen Korrosion ein. Bei Jahresmittelwerten oberhalb der materialspezifischen Grenztemperatur, die in der Regel zwischen 9 und 11 °C angesetzt ist, sind größere Schäden zu erwarten als in den Gebieten mit niedrigerer Jahresmitteltemperatur. Lediglich bei den Materialien Glas, Portland Limestone und den Polymeren wird diese Unterscheidung nicht vorgenommen. Die räumlichen Muster der Karten der Jahresmitteltemperatur in Deutschland sind beispielsweise in den Kartierungsergebnissen zur Tiefenschädigung von PVC und zur Tiefenschädigung von PUR wiederzufinden.

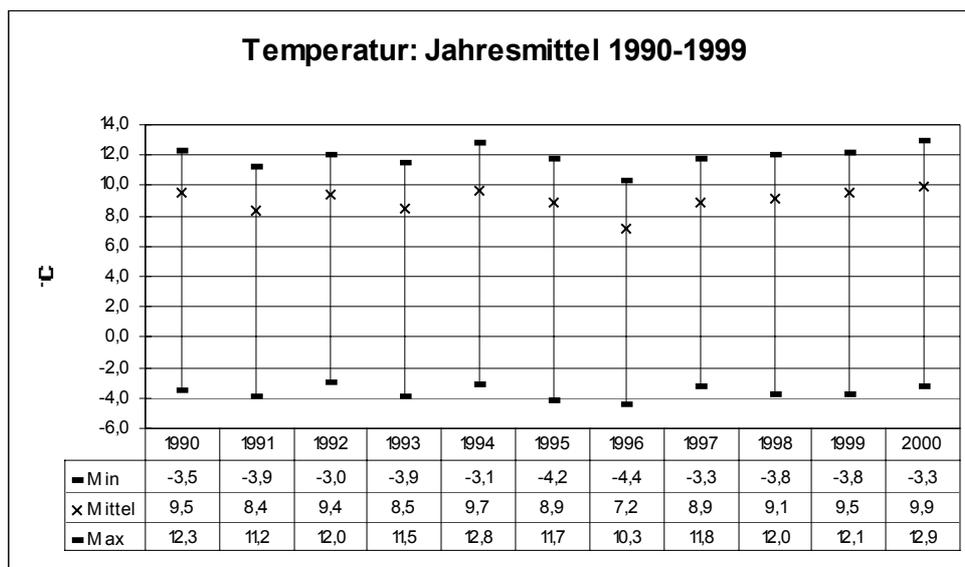
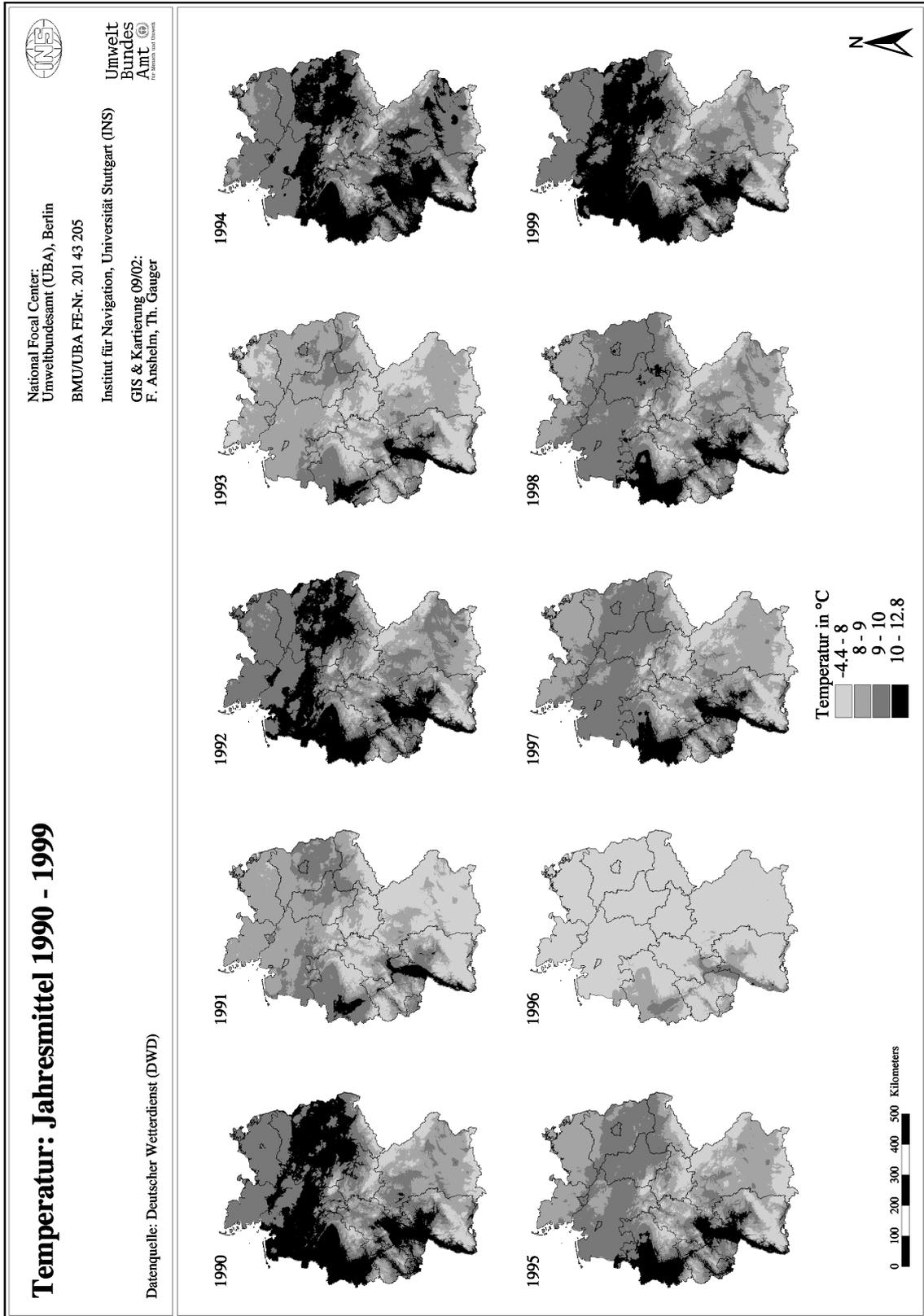


Abb. 7: Temperatur: Jahresmittel 1990-1999



Karte 2: Temperatur: Jahresmittel 1990-1999

2.1.3 Relative Feuchte

Abbildung 8 und Karte 3 zeigen die Jahresmittel der relativen Luftfeuchtigkeit in Deutschland für die Jahre 1990 bis 1999. Die Werte liegen zwischen 64 und 92 %. Hohe Werte der relativen Luftfeuchtigkeit treten vermehrt in den Küstengebieten und in regenreichen Jahren in den Mittelgebirgen und im Alpenraum auf. Niedrige Werte der relativen Luftfeuchtigkeit sind für die trocken-warmen Gebiete Sachsen-Anhalts und Brandenburgs und einige Beckenlandschaften der Mittelgebirge typisch.

Die relative Luftfeuchtigkeit findet in den Dosis-Wirkungsbeziehungen der Materialien verwitterungsbeständiger Stahl, Zink, Aluminium, Kupfer, Bronze, Glas, bei den beiden Anstrichsystemen auf Stahl und bei den Polymeren Berücksichtigung. Räumliche Muster der Karten der relativen Luftfeuchtigkeit sind in den Kartierungsergebnissen der aktuellen Korrosion nicht ohne weiteres wiederzufinden. Sie werden von den räumlichen Mustern anderer Einflussfaktoren überlagert.

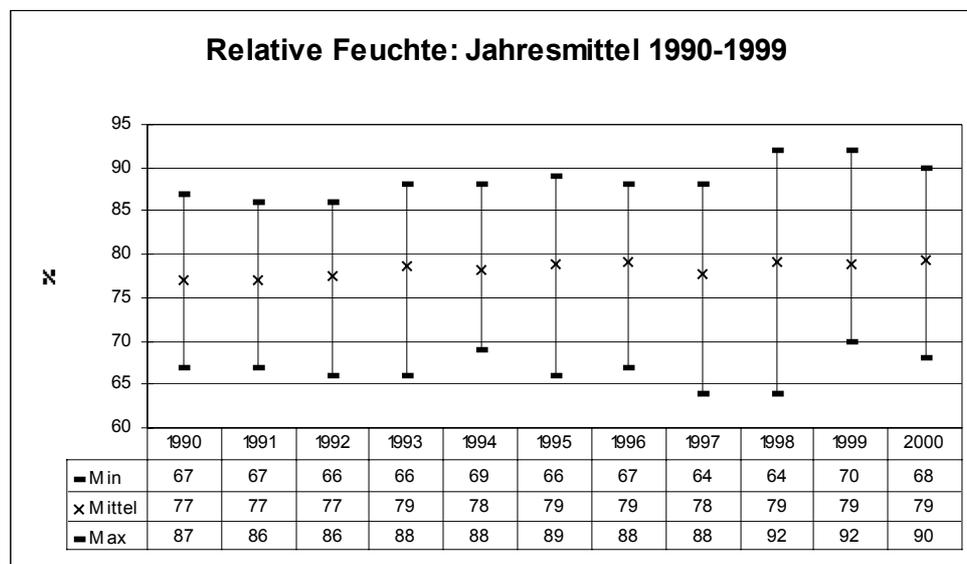
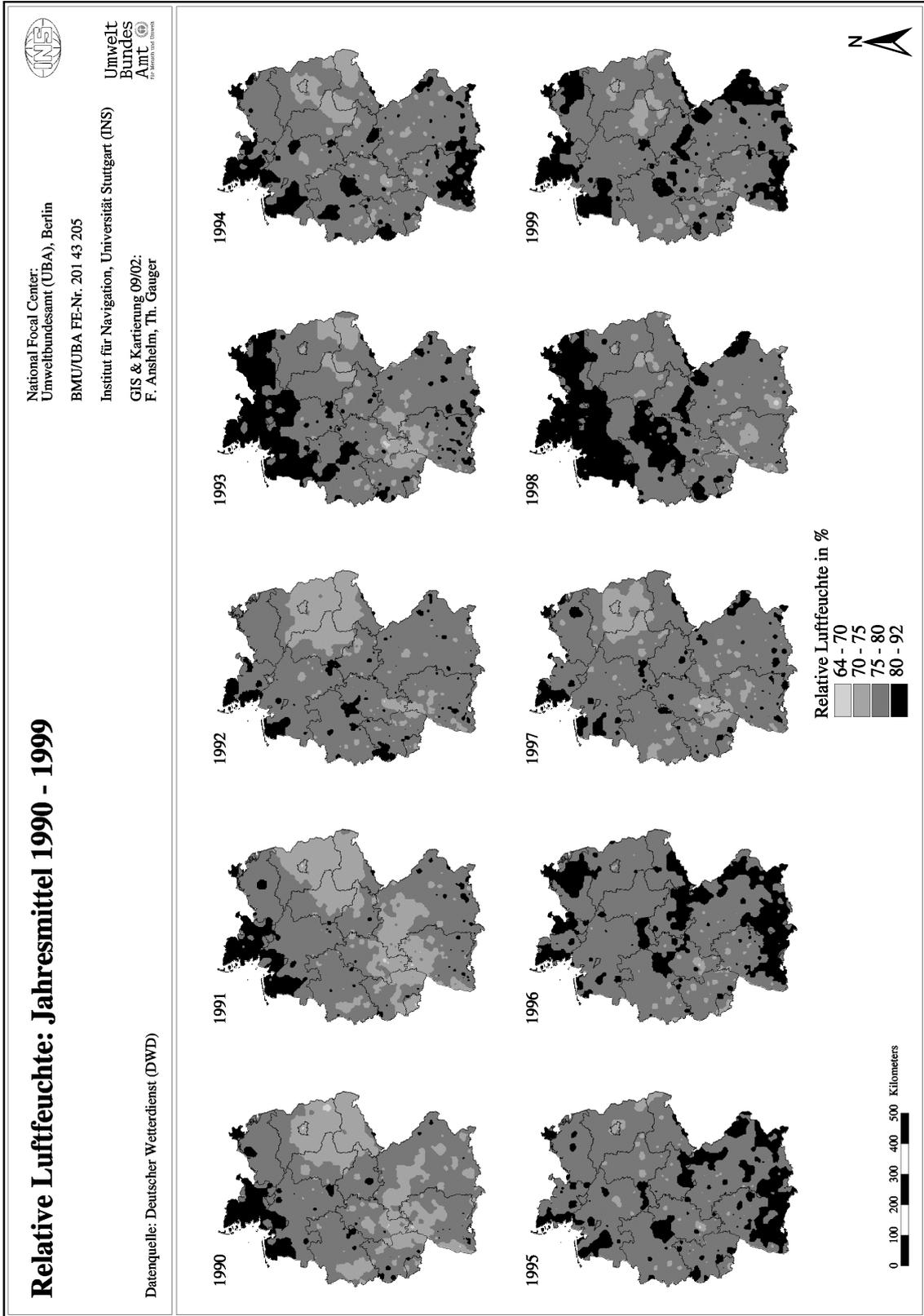


Abb. 8: Relative Feuchte: Jahresmittel 1990-1999

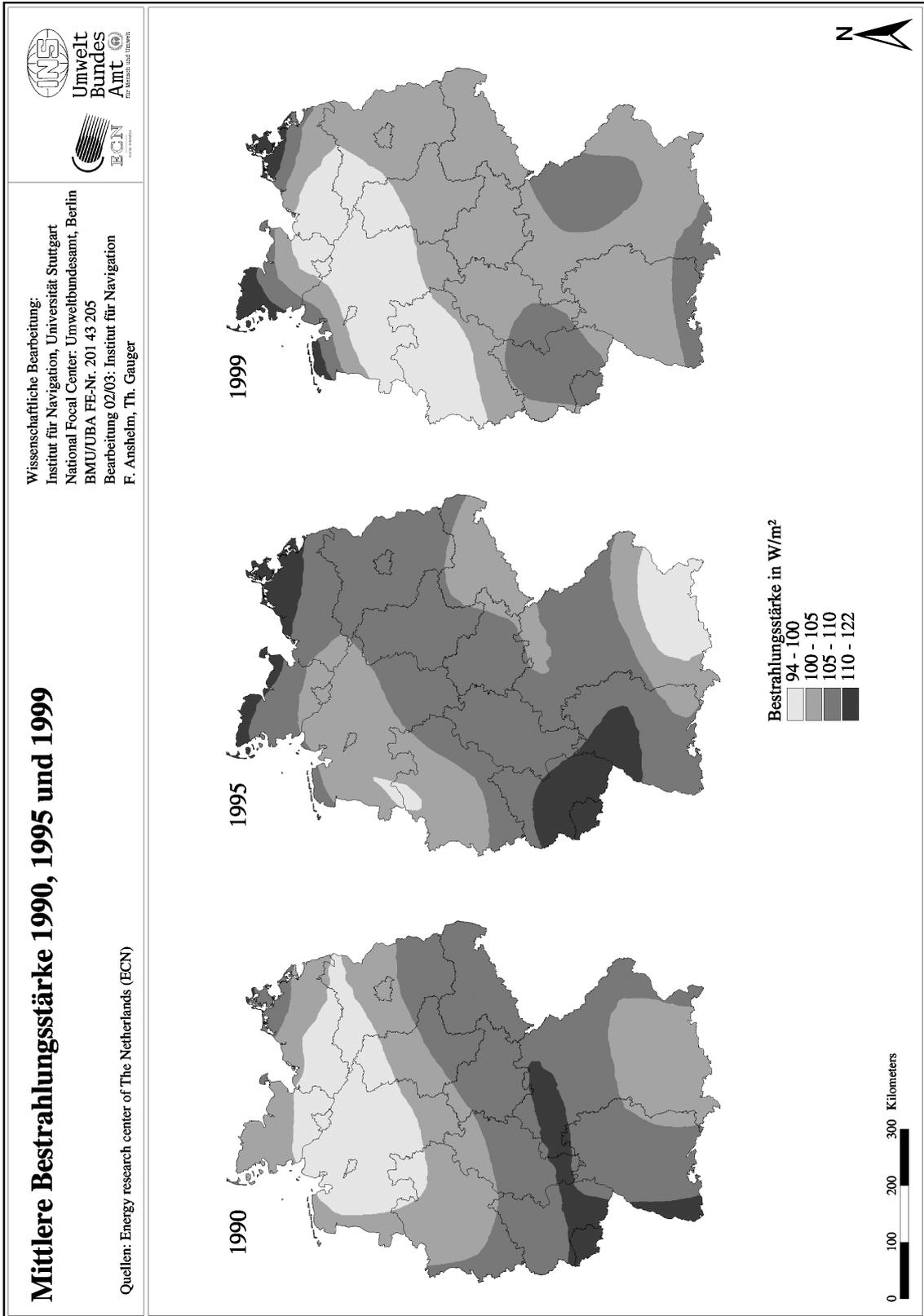


Karte 3: Relative Luftfeuchte: Jahresmittel 1990-1999

2.1.4 Globalstrahlung und Bestrahlungsstärke

Für die Berechnung und Kartierung der Schäden an Polymeren mittels der am Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie ICT entwickelten Dosis-Wirkungsfunktionen werden Daten zur Bestrahlungsstärke benötigt. Ziel der Kartierungsarbeiten ist die Erstellung flächendeckender Karten für das Gebiet der Bundesrepublik Deutschland (Rasterauflösung $1 \text{ km} \cdot 1 \text{ km}$) für die Jahre 1990 und 1999. Die Beschaffung geeigneter Daten zur mittleren jährlichen Bestrahlungsstärke (W/m^2) in Deutschland erwies sich als schwierig. Zunächst wurde mit den Messdaten von nur 15 Orten in Deutschland sowie einer Rasterkarte des langjährigen Mittels (1981-2000) der Bestrahlungsstärke in Deutschland gearbeitet. Das Ziel einer flächendeckenden Kartierung in jährlicher Auflösung konnte erst durch die Einbeziehung modellierter Daten erreicht werden. Karte 4 zeigt die aus Daten eines ECMWF-Modells² abgeleiteten Daten der mittleren Bestrahlungsstärke in Deutschland für die Jahre 1990, 1995 und 1999. Es handelt sich hierbei um Rasterdatensätze mit einer räumlichen Auflösung von $1 \text{ km} \cdot 1 \text{ km}$. Die Werte der mittleren Bestrahlungsstärke lagen in den drei betrachteten Jahre zwischen 94 und $122 \text{ W}/\text{m}^2$. Die Verteilung der Gebiete mit hohen beziehungsweise niedrigen Werten der mittleren Bestrahlungsstärke schwankt zwischen den einzelnen Jahren. Während 1990 die höchsten Werte im Südwesten Deutschlands auftreten, sind die Maximalwerte in 1999 im Norden Deutschlands zu finden. An dieser Stelle muss erwähnt werden, dass zwischen den für die Kartierungsarbeiten verwendeten Modelldaten und der auf Basis von DWD-Daten berechneten Karte für das langjährige Mittel (1981-2000) der Bestrahlungsstärke in Deutschland Unterschiede bestehen, sowohl hinsichtlich des Wertebereichs als auch hinsichtlich der Verteilung der Gebiete mit hohen beziehungsweise niedrigen Werten der mittleren Bestrahlungsstärke. Im langjährigen Mittel 1981-2000 treten Werte auf, die zwischen 106 und $149 \text{ W}/\text{m}^2$ liegen. Höchste Werte werden im langjährigen Mittel im Süden Deutschlands, höchste Werte im Nordwesten Deutschlands erreicht. Ob die festgestellten Unterschiede auf natürliche Schwankungen in der Bestrahlung oder auf die unterschiedliche Herkunft der Daten zurückgeführt werden kann, ist unklar. Das Ziel einer flächendeckenden Kartierung in jährlicher Auflösung konnte nur durch die Verwendung der Modelldaten (Karte 4) erreicht werden.

² ECMWF: European Centre for Medium-Range Weather Forecasts



Karte 4: Mittlere Bestrahlungsstärke in Deutschland 1990, 1995 und 1999

2.1.5 Schwefeldioxid

Die SO₂-Immission ist für die Schädigung der Mehrzahl der betrachteten Materialien von übertragender Bedeutung. Die Entwicklung der Schwefeldioxid-Immission in Deutschland wird deshalb an dieser Stelle ausführlicher behandelt.

Abbildung 9 und Karte 6 zeigen die Jahresmittelwerte der SO₂-Konzentration in Deutschland für die Jahre 1985 bis 1999. In die Kartierung der aktuellen Korrosion finden die Daten der Jahre 1990, 1995 und 1999 Eingang. Da die Dosis-Wirkungsfunktionen auf Basis der Ergebnisse des ICP Materials Expositionsversuchs (1987-1995) entwickelt wurden, werden an dieser Stelle auch die Jahresmittelwerte der SO₂-Konzentration der Jahre 1985-1989 beschrieben.

In Tabelle 2 ist die Anzahl der für das jeweilige Jahr zur Verfügung stehenden Datensätze der SO₂-Immission aufgeführt. Von 1985 bis 1989 ist ein stetiger Anstieg der Anzahl der Messstationen zu konstatieren. Die damit einhergehende Verdichtung des SO₂-Immissionsmessnetzes kann Karte 5 entnommen werden. Im Zuge der deutschen Wiedervereinigung kam es 1990 infolge der Aufgabe von Messstationen zu einer vorübergehenden Auslichtung des Messnetzes. Allerdings war bereits 1991 der Stand von 1989 wieder erreicht. Bis 1994 ist noch ein leichter Anstieg der Zahl der Messstationen zu verzeichnen (Maximum 1994: 516 Stationen). Seit 1995 nimmt die Zahl der Messstationen kontinuierlich ab. 1999 wurde noch an 423 Messstationen die Immission von Schwefeldioxid gemessen. Dies entspricht in etwa dem Stand von 1988. Die Abnahme der Zahl von SO₂-Immissionsmessungen korrespondiert mit der abnehmenden Bedeutung des Luftschadstoffs SO₂. Die Mitte der 80er Jahre einsetzenden Bemühungen um SO₂-Emissionsminderung waren erfolgreich. Heute stehen andere Luftschadstoffe im Zentrum des Interesses. Anhand der Kartierungsergebnisse kann die positive Entwicklung der Immission von SO₂ seit Mitte der 80er Jahre dokumentiert werden (Karte 6 und Abbildung 9).

Tab. 2: Kartierung der SO₂-Immission – Anzahl der Messstationen

Kartierung der Schwefeldioxid-Immission - Anzahl der Stationen														
1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999
289	308	382	415	492	410	491	496	503	516	492	475	457	436	423

Karte 6 zeigt die Kartierungsergebnisse zur interpolierten flächenhaften Immission von SO₂ in den Jahren 1985 bis 1999. In Abbildung 9 sind Minimum, Maximum und Mittelwert der Einzeljahre aufgetragen. Bezogen auf die mittlere SO₂-Immission ist für die Gesamtfläche

Deutschlands ein Rückgang um 90 % festzustellen. Noch im Jahre 1985 lag die mittlere SO₂-Immission in Deutschland bei 52 µg/m³. In 1999 liegt sie bei 5 µg/m³. 1990 lagen die gemessenen Maximalwerte bei mehreren Hundert µg/m³ (1987: 458 µg/m³). In 1999 liegt das Maximum bei 11 µg/m³.

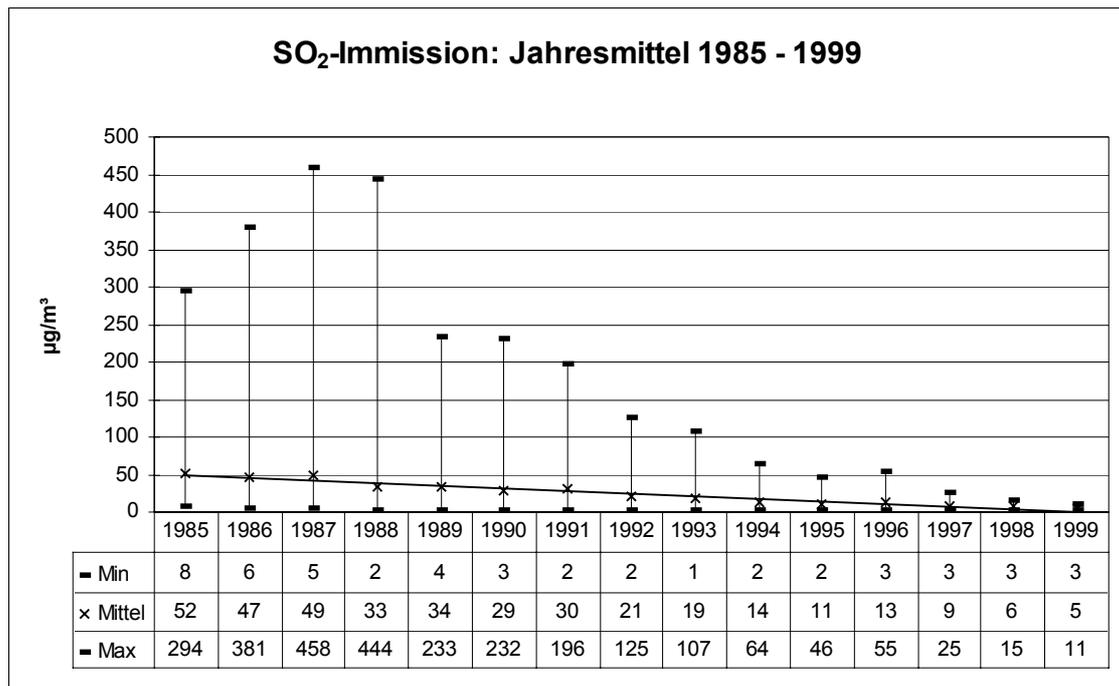


Abb. 9: SO₂-Immission 1985-1999

Die mittlere SO₂-Konzentration eines Jahres wird von der Emissionssituation sowie vom Witterungsverlauf bestimmt. Abbildung 10 zeigt die Entwicklung der SO₂-Gesamtemission in Deutschland für die Jahre 1985 bis 1998. Die SO₂-Gesamtemission ist zwischen 1985 und 1998 um 83,2 % gesunken. Für 1999 liegen noch keine Emissionsdaten vor. In den einzelnen Jahren entfallen jeweils circa 72 % der SO₂-Emissionen auf die neuen Bundesländer, 28 % können den alten Bundesländern zugeordnet werden. Der starke Rückgang der SO₂-Emissionen ist die Hauptursache für den im Zuge der Kartierung festgestellten markanten Rückgang der SO₂-Immission in Deutschland. Der Rückgang der SO₂-Belastung erfolgte nicht kontinuierlich und auch nicht überall in Deutschland zur selben Zeit. Bei näherer Betrachtung werden regionale Unterschiede und in einzelnen Jahren auch Abweichungen vom langjährigen Trend erkennbar.

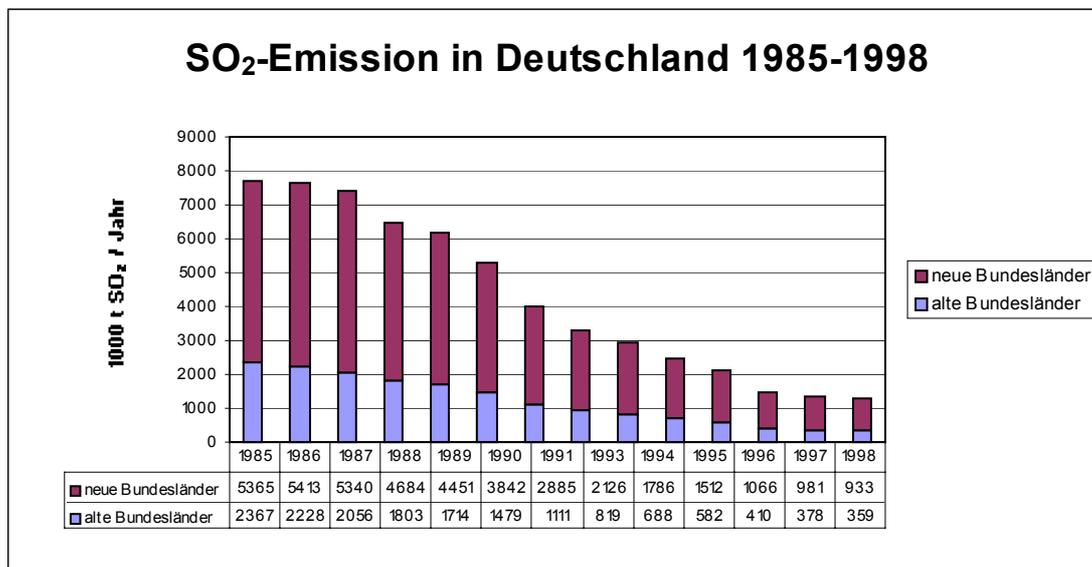


Abb. 10: SO₂-Emission in Deutschland (ost/west) 1985-1998 (Quelle: EMEP/MSCW 2000)

Enormen Einfluss auf die SO₂-Konzentrationswerte im betrachteten Zeitraum hatte die am 22. Juni 1983 in Kraft getretene Verordnung über Großfeuerungsanlagen (13. BImSchV). Durch die Verordnung wurden die zuvor geltenden Emissionsgrenzwerte – auch für Altanlagen – aus Vorsorgegründen so verschärft, dass die SO₂-Emissionen aus Kraft- und Fernheizwerken in Westdeutschland zwischen 1980 und 1989 von 1,9 auf 0,33 Mio. Tonnen zurückgingen. Während einer Übergangsfrist von fünf Jahren mussten die notwendigen Maßnahmen von den Kraftwerksbetreibern umgesetzt werden. Diese Maßnahmen blieben bis zur Deutschen Wiedervereinigung auf die westdeutschen Bundesländer begrenzt. Nach der Wende wurden die Vorgaben der 13. BImSchV auch auf dem Gebiet der ehemaligen DDR umgesetzt.

Erste Erfolge der Emissionsminderungsmaßnahmen konnten immissionsseitig Ende der 80er Jahre festgestellt werden. Zwischen 1985 und 1987 waren die Erfolge der Emissionsminderungsmaßnahmen zunächst noch durch Witterungseinflüsse maskiert worden. Denn die Jahre 1985, 1986 und 1987 waren bezogen auf das langjährige Mittel deutlich zu kalt. Intensive und lang andauernde Heizperioden zogen relativ hohe SO₂-Emissionen und entsprechend hohe SO₂-Immissionen nach sich. Gegen Ende der 80er Jahre, beginnend 1988, folgten einige milde Jahre, was in Verbindung mit der Wirkung emissionsmindernder Maßnahmen zu einem starken Rückgang der SO₂-Immission führte (FRICKE & UHSE 1994). Dies erklärt den markanten Rückgang der SO₂-Immission auf dem Gebiet der alten Bundesländer zwischen 1987 und 1988 (vgl. Abb. 11).

Auf dem Gebiet der ehemaligen DDR wurde die höchste jährliche SO₂-Emission im Jahr 1986 erreicht (Abbildung 10). In den Folgejahren führte die milde Witterung zu einem leichten Rückgang der SO₂-Emission. Ähnliches gilt für die Immission (Abbildung 11). Ab 1990 kommt zusätzlich die Wirkung emissionsmindernder Maßnahmen in den neuen Bundesländern hinzu. Problematisch blieb die Situation zunächst noch im Süden der ehemaligen DDR. Eine Folge der Braunkohleverfeuerung. Seit 1997 liegen die Immissionswerte im Jahresmittel jedoch auch hier unter 30 µg/m³ (Karte 6 und Abbildung 9). Positiv ausgewirkt haben sich zudem die in den Nachbarländern des „Schwarzen Dreiecks“ ergriffenen Maßnahmen zur Emissionsminderung.

In Gesamtdeutschland sank die mittlere SO₂-Belastung der Luft zwischen 1985 und 1999 von 52 µg/m³ auf 5 µg/m³. Die neuen Bundesländern haben einen Rückgang der mittleren SO₂-Immission von 86 µg/m³ auf 5 µg/m³, die alten Bundesländer von 38 µg/m³ auf 6 µg/m³ zu verzeichnen. 1999 war das erste Jahr, in welchem die mittlere SO₂-Immission in den neuen Bundesländern niedriger lag als in den alten Bundesländern (Abbildung 11).

Eine, wenn auch geringfügige Abweichung vom langjährigen Trend abnehmender SO₂-Immissionswerte trat im Jahr 1996 auf (Abbildung 9). Ursache sind die gegenüber dem langjährigen Mittel deutlich zu kalten Monate Januar (-2,5 °C), Februar (-2,5 °C), März (-2,7 °C) und Dezember (-3,2 °C) (Abbildung 12). Im Gebietsmittel der Jahresmitteltemperatur war das Jahr 1996 1,0 °C zu kalt (ULLRICH, R., RAPP, J. & FUCHS, T. 2000). Die im Vergleich zu den Vorjahren intensivere und längere Heizperiode führte zu einer leichten Zunahme der SO₂-Immission gemessen am Vorjahr. In den Folgejahren setzte sich bei „normalen“ Witterungsverhältnissen der langjährige Trend wieder durch. 1999 lag die mittlere SO₂-Immission in Deutschland bei 5 µg/m³. Die Jahresmittelwerte der SO₂-Immission erreichten Ende der 90er Jahre maximal 15-20 µg/m³.

Die räumlichen Muster der Karten der Jahresmittelwerte der SO₂-Konzentration werden in den Kartierungsergebnissen der aktuellen Korrosion immer wieder sichtbar. Die SO₂-Konzentration ist der bedeutendste Einflussparameter für die Schädigung der untersuchten Materialien. Entsprechend dem Rückgang der SO₂-Konzentrationen im Verlauf der 90er Jahre ist daher auch mit einem Rückgang der zu erwartenden Materialschäden zu rechnen.

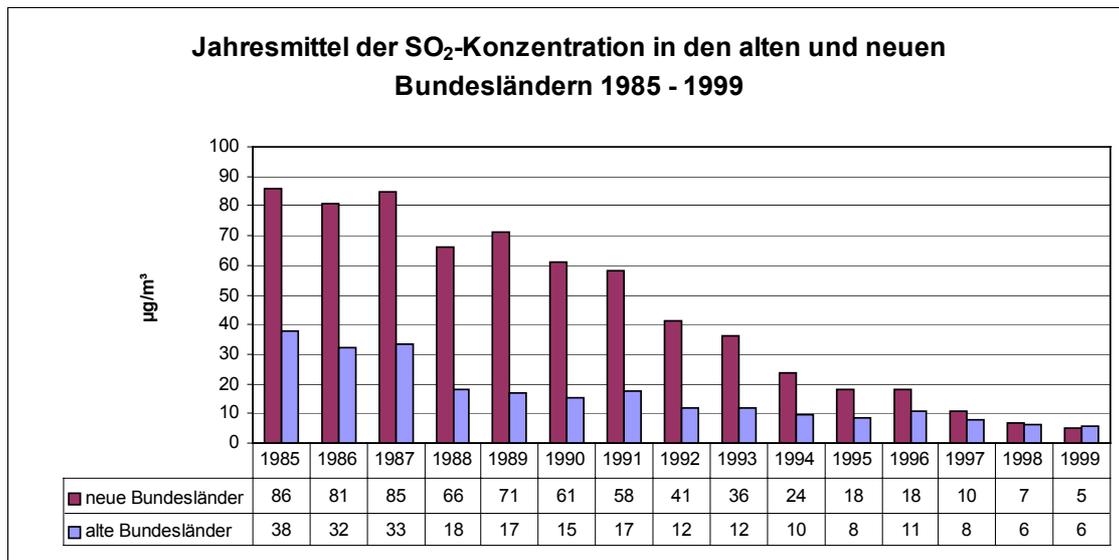


Abb. 11: SO₂-Immission in Deutschland 1985-1999 (alte/neue Bundesländer)

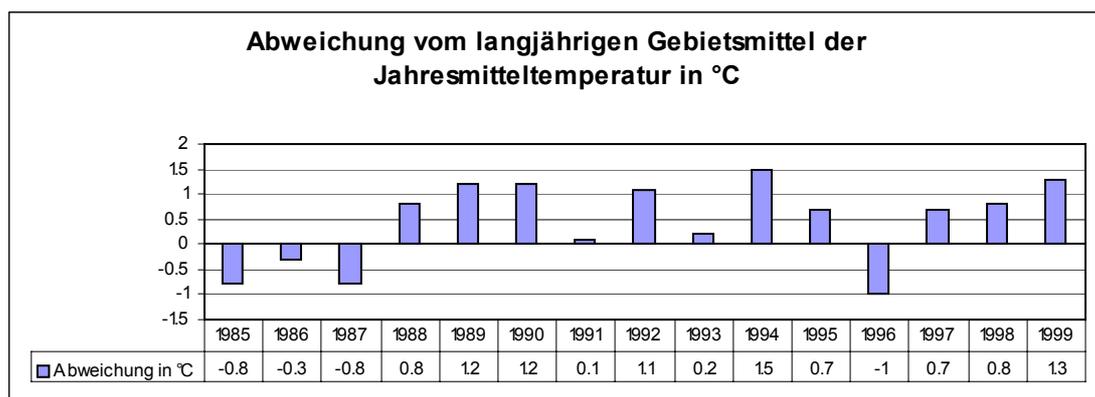
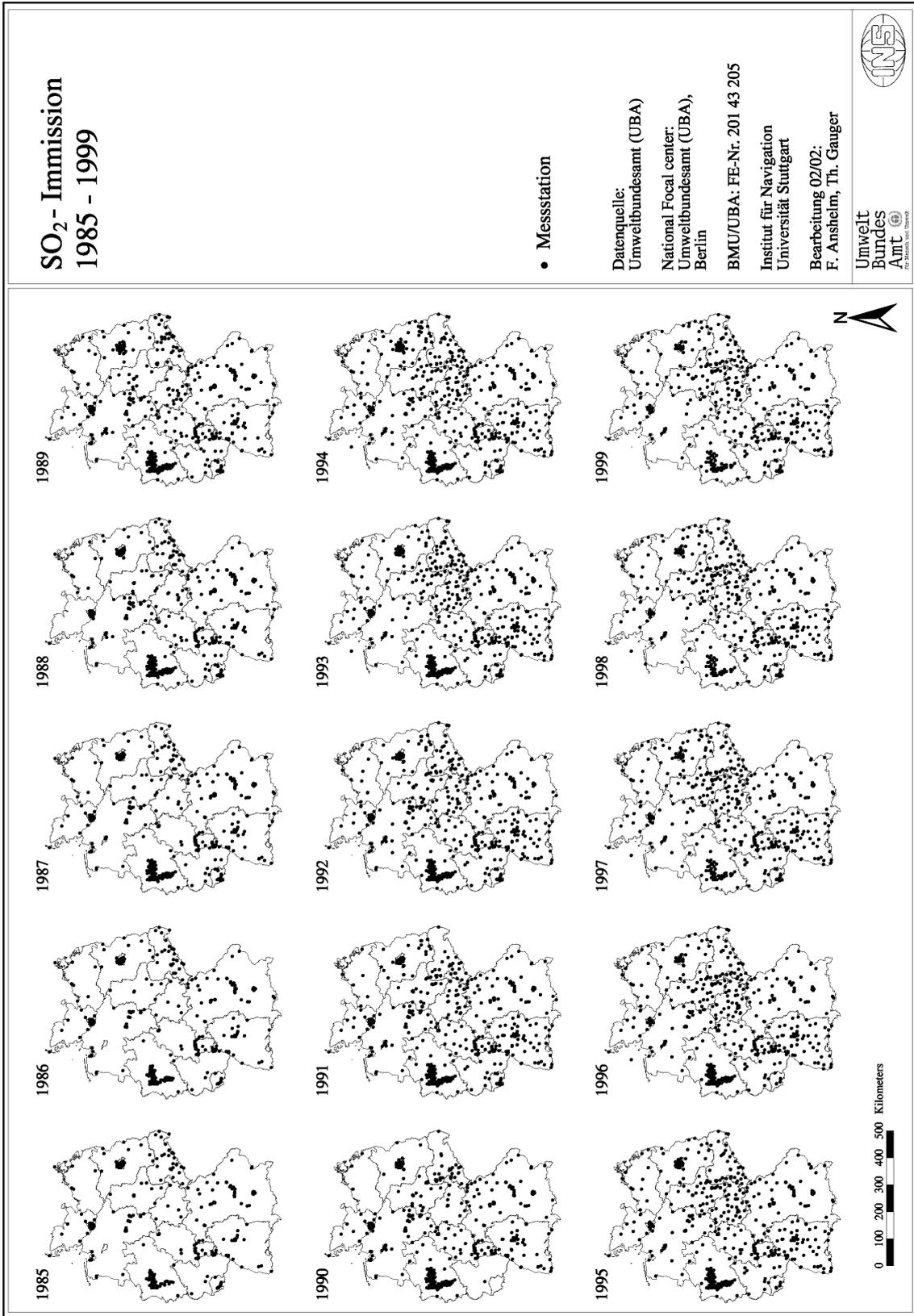
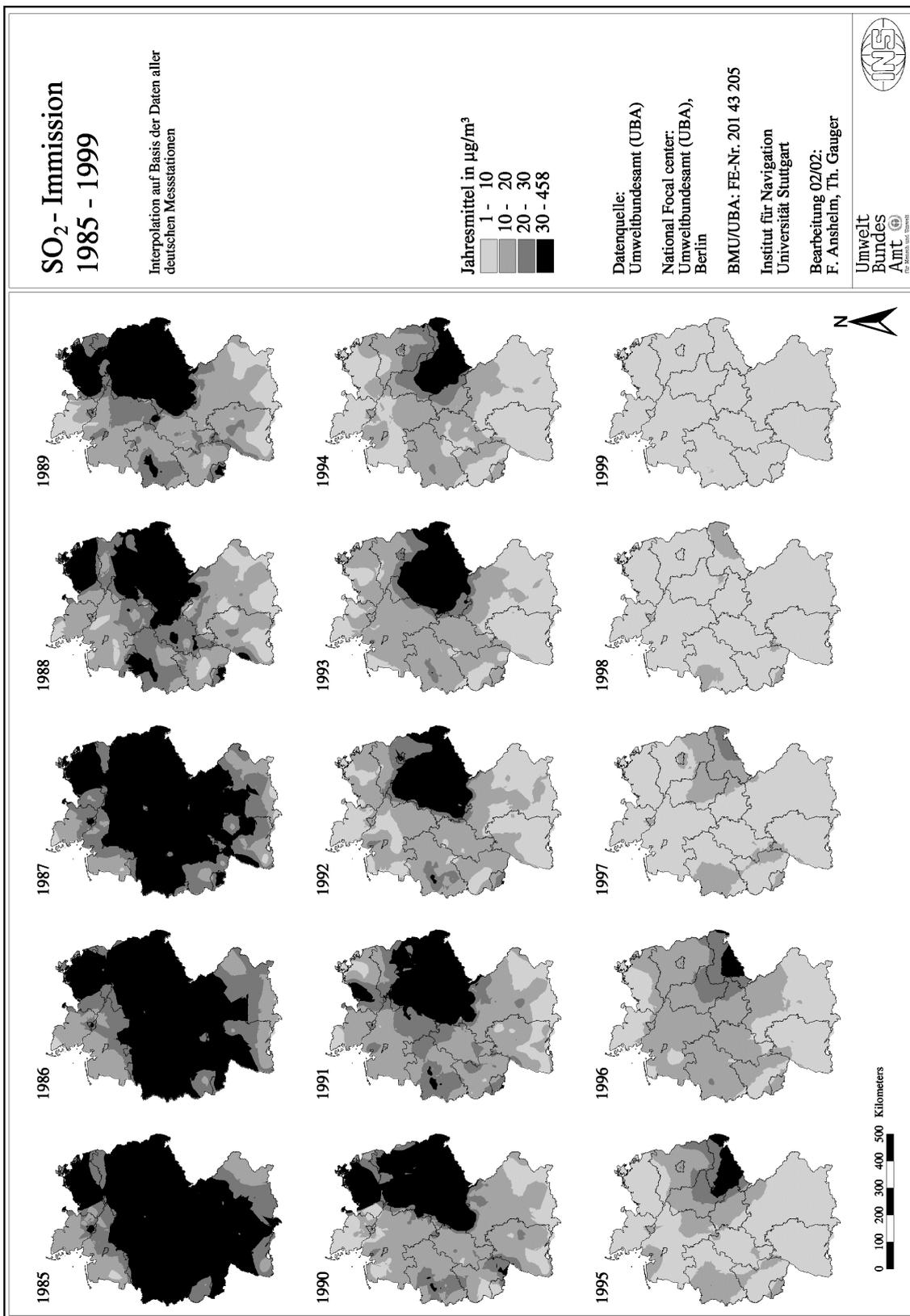


Abb. 12: Abweichung vom langjährigen Gebietsmittel (1991-1990) der Jahresmitteltemperatur in Deutschland 1985-1999 (Quelle: ULLRICH, RAPP & FUCHS 2000)



Karte 5: Verteilung der SO₂-Immissionsmessstationen 1985-1999



Karte 6: SO₂-Immission 1985-1999

2.1.6 Ozon

Daten zur Immission von Ozon gehen ein in die Berechnung der aktuellen Korrosion von Kupfer sowie die Berechnung der Schäden an Polymeren ein. Informationen zu den Jahresmittelwerten der Ozon-Konzentration in Deutschland liegen für die Jahre 1990 bis 1999 vor. Für die Erstellung der Karten der Ozon-Immission wurden die Daten aller Ozon-Messstationen verwendet. Im betrachteten Zeitraum schwankt die Anzahl der zur Verfügung stehenden Datensätze zwischen 168 (1990) und 375 (1997) (Tabelle 3). Aus den Punktdaten wurden durch Interpolation der Daten flächendeckende Karten der Ozon-Immission gewonnen. Die Auflösung der Karten ist 1 km · 1 km.

Tab. 3: Kartierung der Ozon-Immission – Anzahl der Stationen³

Kartierung der Ozon-Immission - Anzahl der Stationen									
1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999
168	214	258	299	311	352	367	375	361	356

Die Verteilung der Ozon-Messstationen innerhalb Deutschlands ist zumindest seit 1993 recht gut. In den Jahren 1990-92 sind noch einzelne größere Lücken im Messnetz erkennbar. Die in diesen Bereichen interpolierten Werte der Ozon-Immission sind entsprechend kritisch zu bewerten. In den neueren Jahren ist die Dichte des Messnetzes gut (Karte 7).

Abbildung 13 und Karte 8 zeigen die Jahresmittel der Ozon-Konzentration in Deutschland für die Jahre 1990 bis 1999. Insbesondere die hoch gelegenen Messstationen zeichnen sich, natürlicherweise, durch im Jahresmittel relativ hohe Ozon-Immissionswerte aus (BAUMBACH ET AL. 1992: 117). Im Maximum lassen sich hier bis zu 92 µg/m³ feststellen. Entlang der Rheinschiene fällt ein Gebiet niedriger Ozon-Immissionswerte auf. Hierin könnte sich ein Einfluss großräumig und dauerhaft starker Verkehrsbelastung widerspiegeln. Ausreichender NO-Überschuss kann im Straßenraum zu vollständigem Ozonabbau führen (LEISEN 1990: 266).

Das Gebietsmittel der Ozon-Immission in Deutschland schwankt in den Jahren 1990 bis 1999 im Bereich zwischen 38 und 46 µg/m³. Ein eindeutiger Trend ist nicht erkennbar (Abbildung 13). Es überwiegen starke Schwankungen zwischen den Jahren. Diese Schwankungen sind in starkem Maße witterungsbedingt. In diesem Zusammenhang ist zu beachten ist, dass in Abbildung 13 und Karte 8 Jahresmittelwerte der Ozon-Konzentration betrachtet werden. Bezüglich

³ es wurden die Daten aller Ozon-Messstationen verwendet

der maximalen 1-Stundenwerte der Ozon-Konzentration kann für die 1990er Jahre eine gerichtete Abnahme der Werte festgestellt werden.

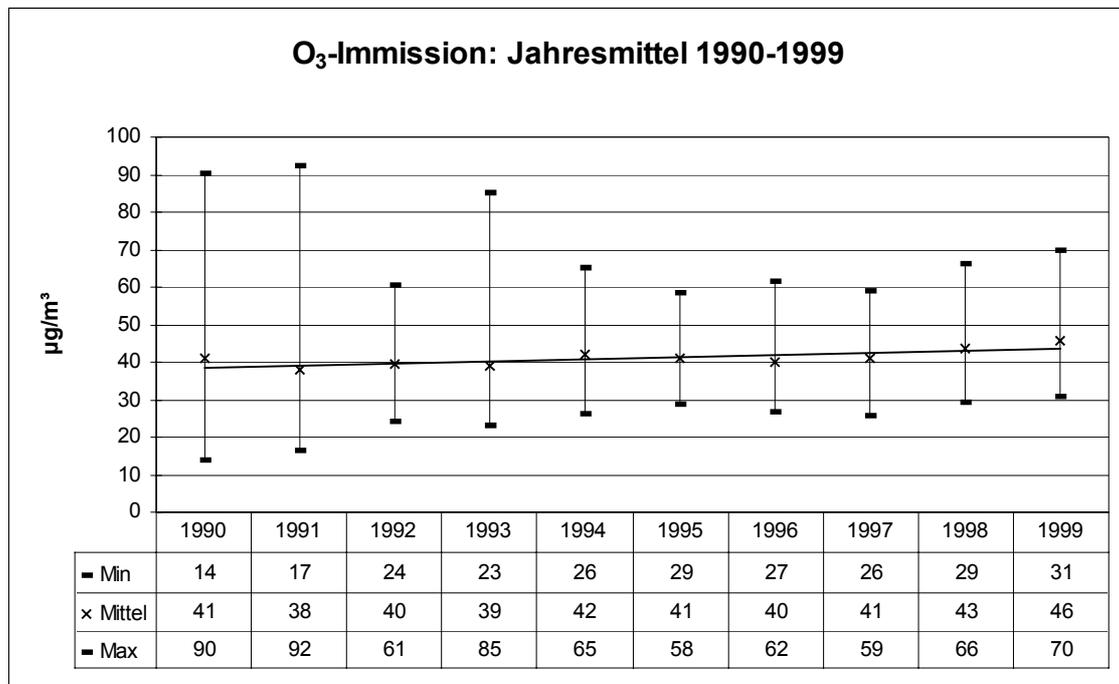
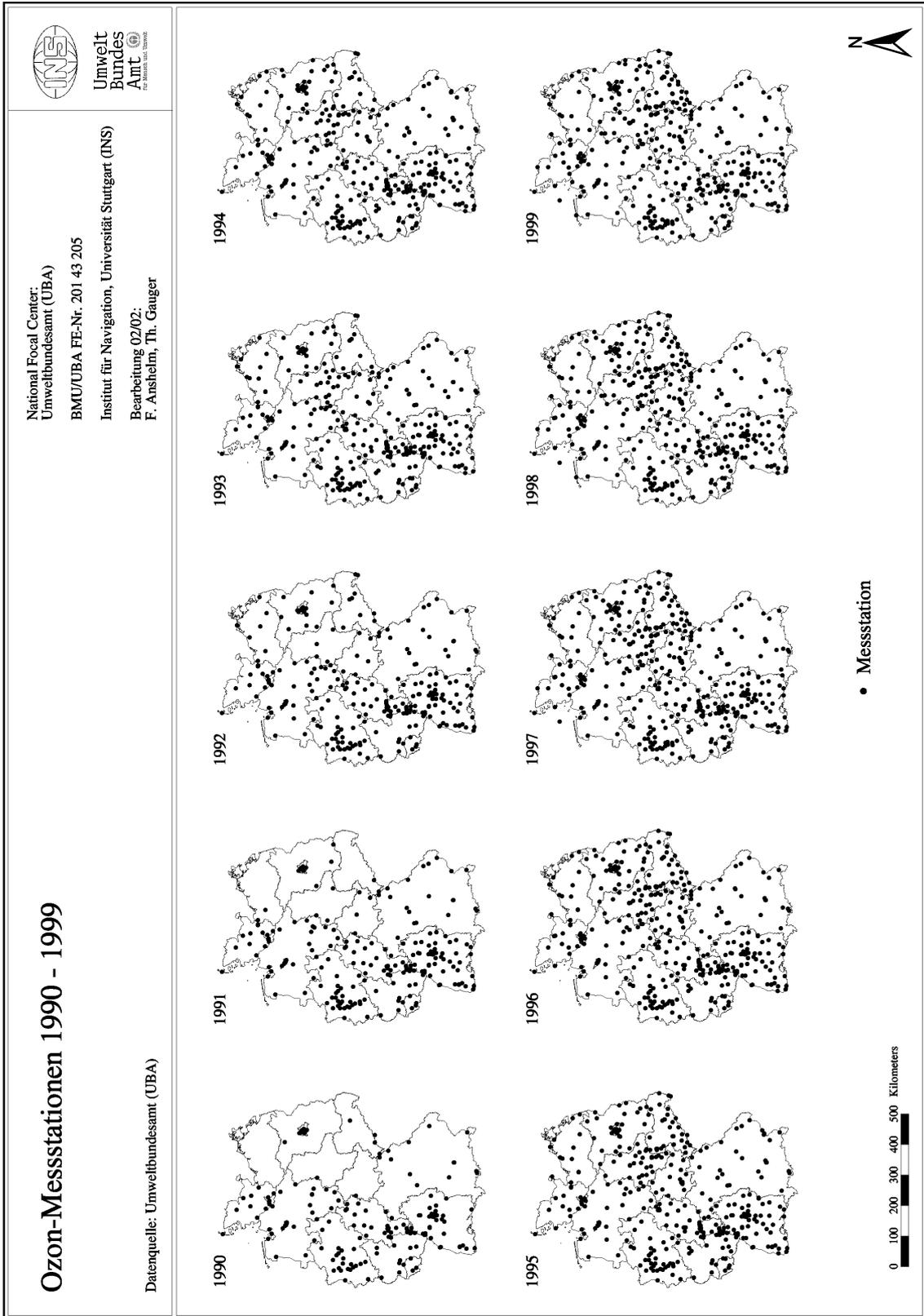
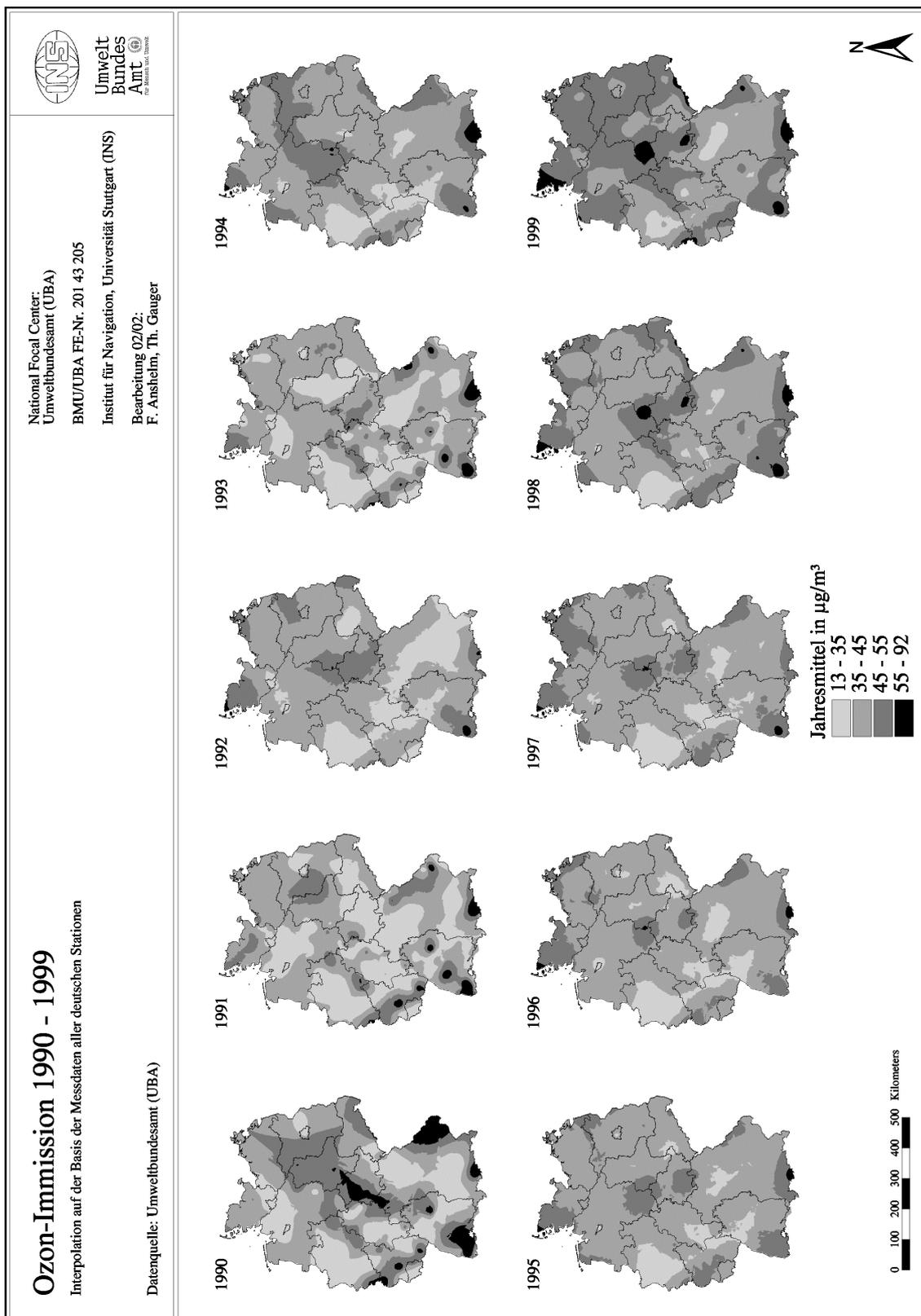


Abb. 13: O₃-Immission: Jahresmittel 1990-1999



Karte 7: Verteilung der O₃-Immissionsmessstationen 1990-1999



Karte 8: Ozon-Immission 1990-1999

2.1.7 Stickstoffdioxid

Die Jahresmittelwerte der Stickstoffdioxid-Konzentration sind für die Berechnung der Schädigung von mittelalterlichem Glas (Glas M3⁴) in regengeschützter Exposition sowie die Berechnung der Schäden an PUR, PVC und Alkydharzlack von Bedeutung. Daten zur Stickstoffdioxid-Immission in Deutschland stehen für die Jahre 1985 bis 1999 zur Verfügung. Tabelle 4 zeigt die Entwicklung der Anzahl der pro Jahr zur Verfügung stehenden Datensätze. Karte 9 stellt die räumliche Verteilung der Datensätze der einzelnen Jahre dar. Für die Jahre vor 1990 gibt es keine Information zu den Jahresmittelwerten der NO₂-Immission für das Gebiet der ehemaligen DDR. Für die alten Bundesländer können in diesen Jahren die Daten von 178 (1985) bis maximal 241 (1988) Messstationen genutzt werden. Ab 1990 stehen auch für die neuen Bundesländer Daten zur Verfügung. Die Flächenabdeckung wird zunehmend besser. Es können die Daten von bis zu 458 Messstationen (1996) für die Kartierung genutzt werden. Eine Kartierung der Materialschäden in Deutschland erfolgt für die Jahre 1990, 1995 und 1999.

Tab. 4: Kartierung der NO₂-Immission – Anzahl der Stationen

Kartierung der NO ₂ -Immission - Anzahl der Stationen														
1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999
178	192	233	241	218	329	349	376	352	409	432	458	450	447	440

Nach der Interpolation der Punktdaten lassen sich bezüglich der räumlichen Verteilung von Gebieten mit hohen/niedrigen NO₂-Immissionswerten einige regelmäßig wiederkehrende Phänomene erkennen (Karte 10). Die Rheinschiene vom Ruhrgebiet bis in das Rhein-Main-Gebiet zeichnet sich durch relativ hohe NO₂-Immissionen aus. Hier liegt das Jahresmittel der NO₂-Immission in der Mehrzahl der Jahre zwischen 40 und 60 µg/m³. In verschiedenen Jahren heben sich einzelne Städte aufgrund ihrer höheren NO₂-Belastung etwas von ihrer Umgebung ab, so zum Beispiel Hamburg im Jahre 1991 oder Berlin im Jahr 1994. Mecklenburg-Vorpommern, Brandenburg, Schleswig-Holstein, der Osten Bayerns sowie der Alpenraum zeichnen sich in vielen Jahren durch relativ niedrige NO₂-Werte aus.

Ein Vergleich zwischen der Stickoxid-Immission in den alten Bundesländern und der in den neuen Bundesländern zeigt markante Unterschiede bei der NO₂-Immission. Die NO₂-Konzentration der Luft ist in den neuen Bundesländern deutlich geringer als in den alten Bundesländern (ca. 20-30%). Dies gilt sowohl für die Gebietsmittel als auch für die in den Einzel-

jahren festgestellten Maxima. In beiden Landesteilen ist im Zeitraum 1985 bis 1999 ein leichter Rückgang der NO₂-Belastung feststellbar.

Die räumlichen Muster der Verteilung der NO₂-Immission tauchen partiell in der Karte der Schädigung von Glas M3 wieder auf, so zum Beispiel der relativ hohe Grad der Schädigung im Bereich der Rheinschiene (Karte 23).

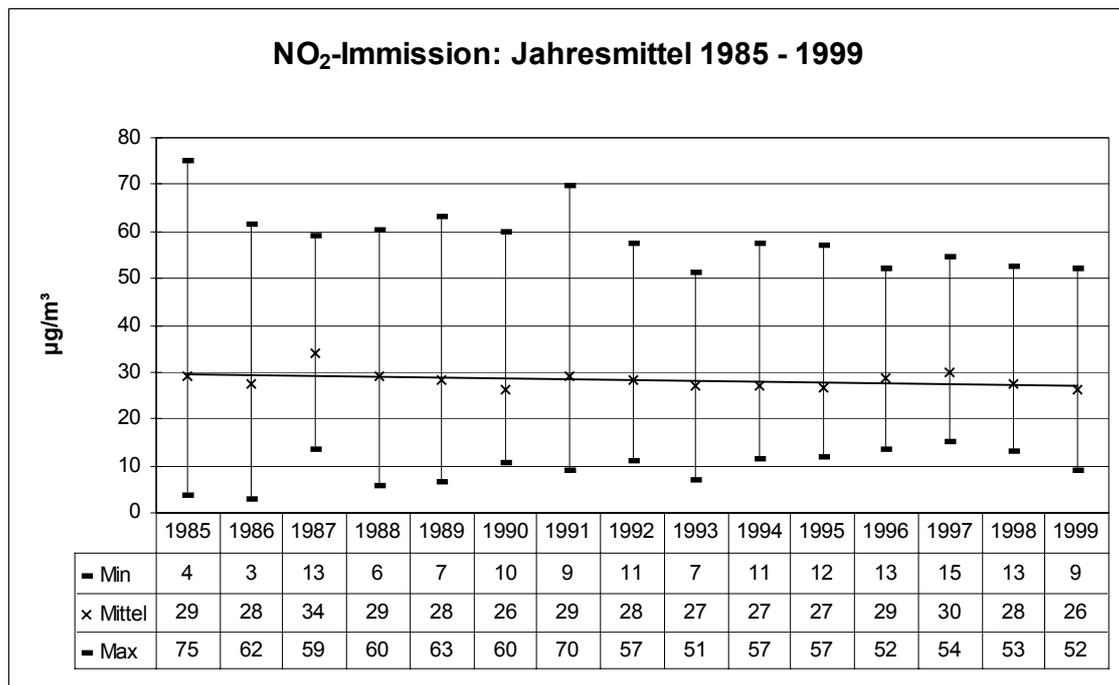
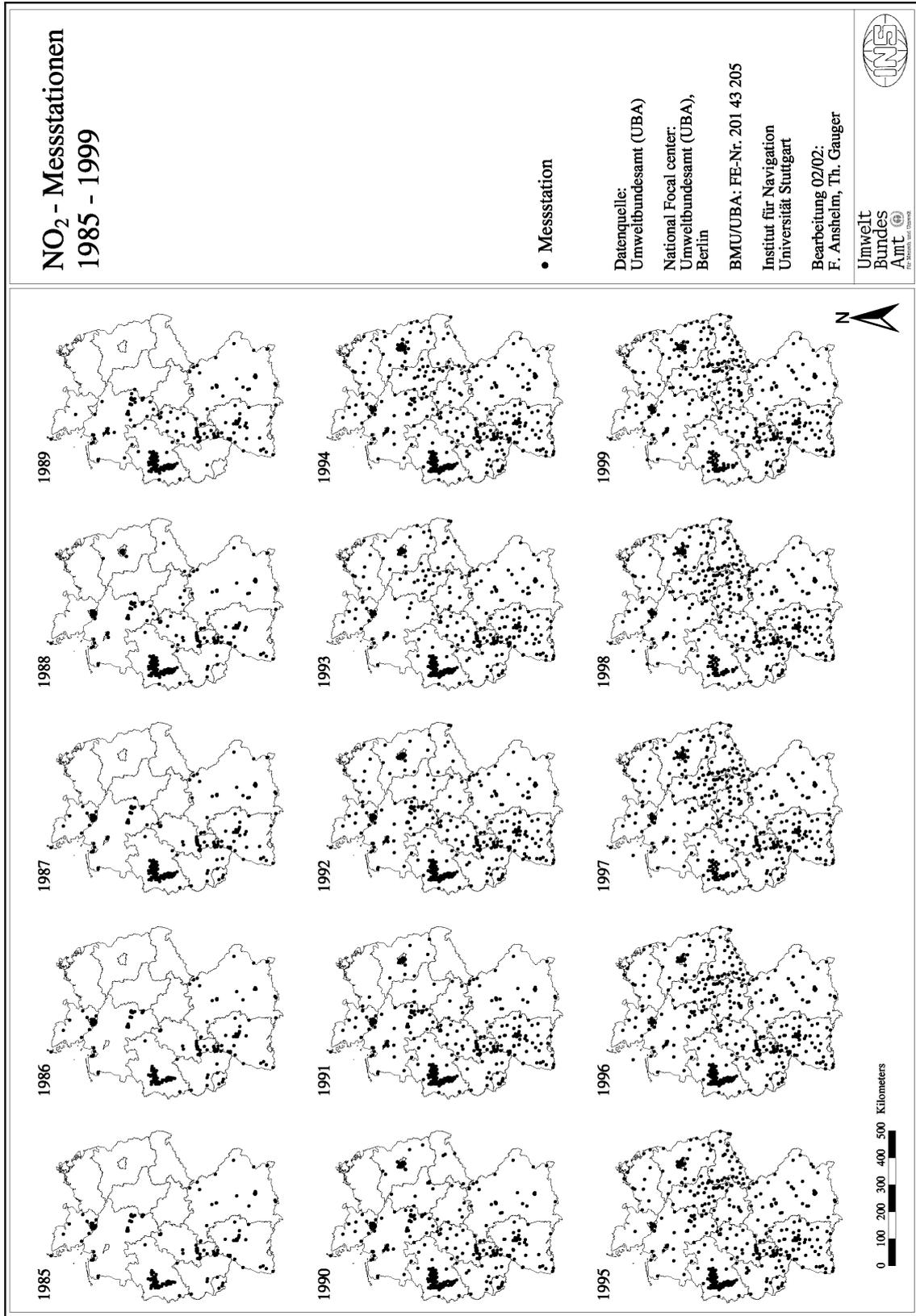
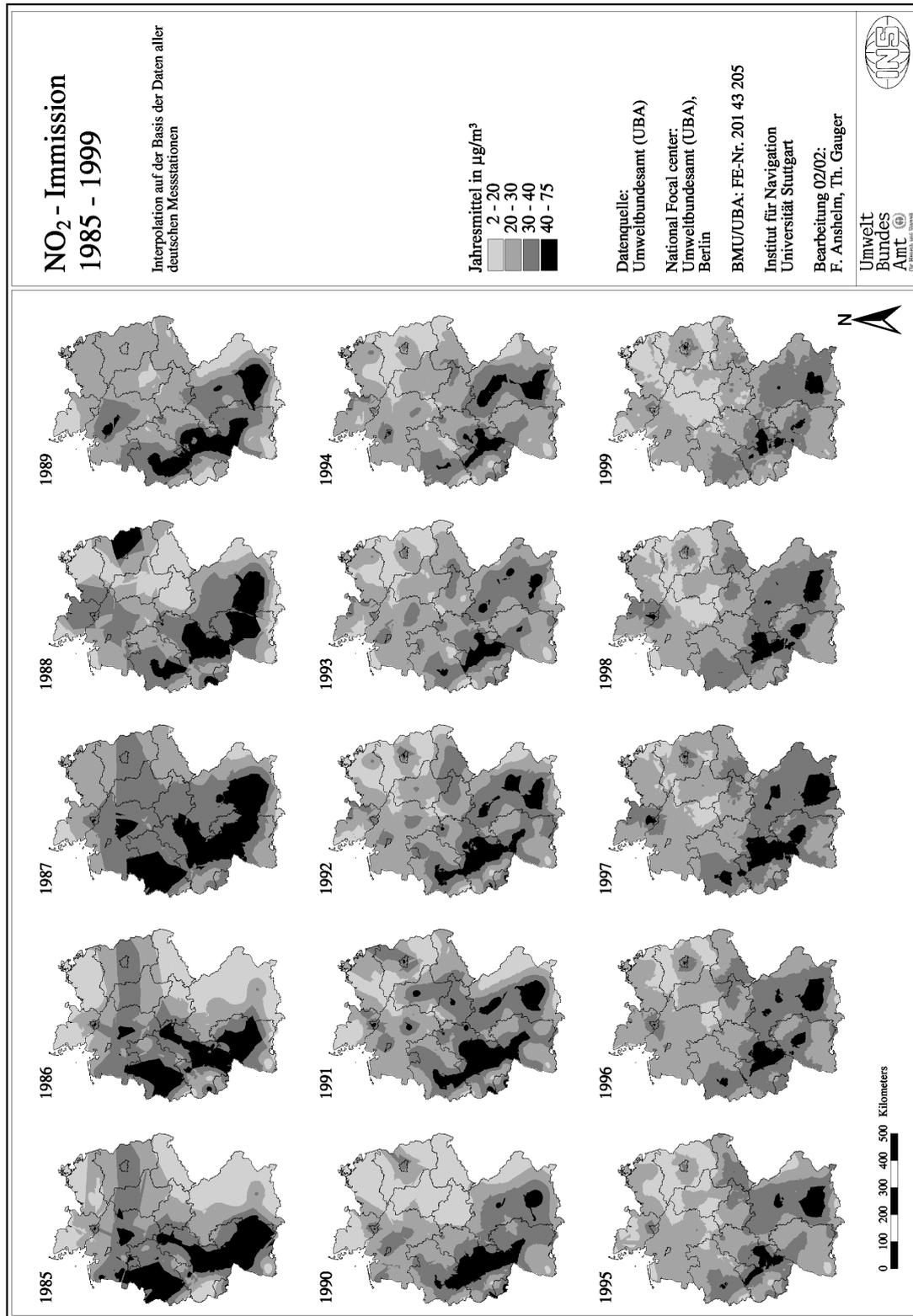


Abb. 14: NO₂-Immission: Jahresmittel 1985-1999

⁴ Glas M3 ist typisch für das an mittelalterlichen Sakralbauten verwendete Fensterglas



Karte 9: Verteilung der NO₂-Immissionsmessstationen 1985-1999



Karte 10: NO₂-Immission 1985-1999

2.1.8 Protonenfracht

Die Protonenfracht (Rain[H⁺]) geht ein in die Berechnung der Schädigung von Zink, Kupfer, Bronze, Portland Kalkstein und Mansfield Sandstein. Informationen über die Protonenfracht in Deutschland stehen für die Jahre 1990 und 1992 bis 1999 zur Verfügung. Der Datensatz des Jahres 1991 reicht nicht aus für die Interpolation einer Rasterkarte mit einer Auflösung von 1 km · 1 km.

Abbildung 15 und Karte 11 zeigen die Jahressummen der Protonenfracht in Deutschland für die Jahre 1990 und 1992 bis 1999. Die Werte liegen im Bereich zwischen 0,01 und 0,77 kg/ha·a. Im Gebietsmittel ist eine leicht rückläufige Tendenz erkennbar. Hohe Werte der Protonenfracht sind für die Gebiete mit relativ hohen Niederschlagssummen feststellbar. Dies sind in erster Linie die Mittelgebirge und der Alpenraum.

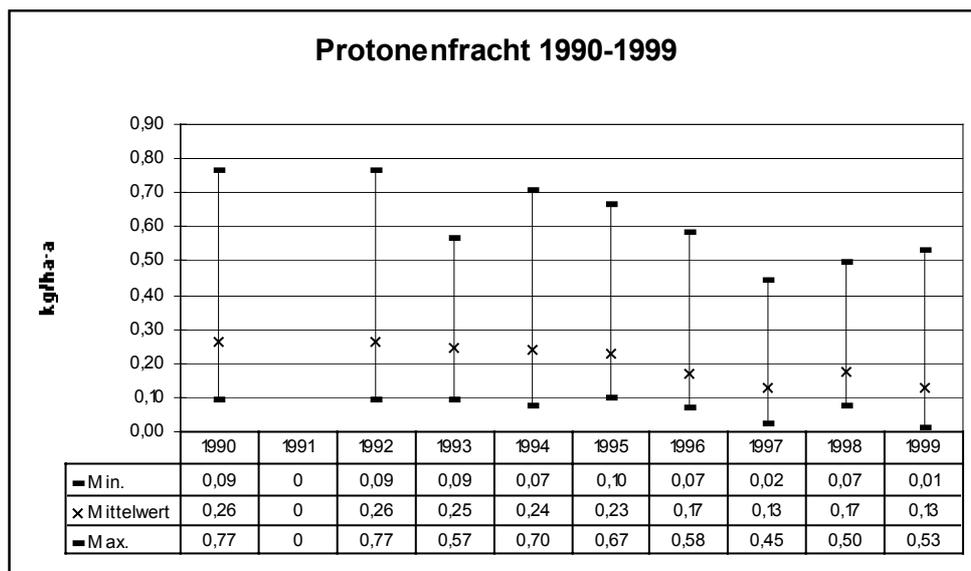
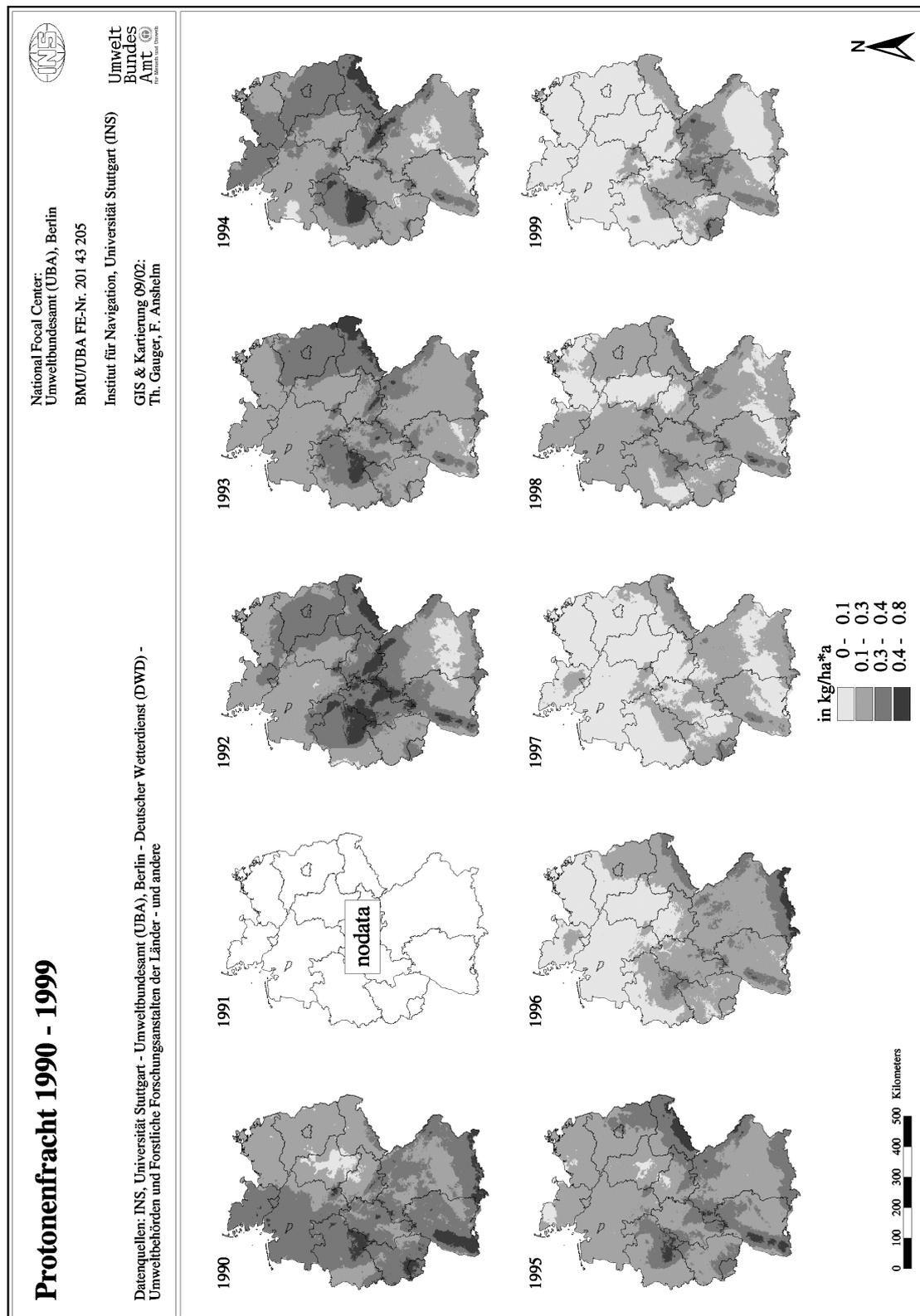


Abb. 15: Protonenfracht 1990-1999⁵

⁵ 1991: keine Daten

Karte 11: Protonenfracht 1990-1999⁶⁶ 1991: keine Daten

2.1.9 Chloridfracht

Die Chloridfracht ($\text{Rain}[\text{Cl}^-]$) geht ein in die Berechnung der Schädigung von Aluminium und Bronze. Informationen über die Chloridfracht in Deutschland stehen für die Jahre 1990 bis 1999 zur Verfügung.

Abbildung 16 und Karte 12 zeigen die Jahressummen der Chloridfracht in Deutschland für die Jahre 1990 bis 1999. Die Werte liegen im Bereich zwischen 0,4 und 139,9 kg/ha·a. Im Gebietsmittel ist keine gerichtete Entwicklung erkennbar. Hohe Werte der Chloridfracht sind naturgemäß in Küstennähe festzustellen. Landeinwärts nimmt die Chloridfracht rasch ab. In Alpennähe sind aufgrund von Ferntransport von meeresbürtigem Chlorid und hohen Niederschlagssummen höhere Chloridfrachten möglich. Unterschiede in der Reichweite von überwiegend meeresbürtigem Chlorid sind in den Einzeljahren zu beobachten. Diese lassen sich in der Regel durch Unterschiede in der atmosphärischen Verfrachtung mit winterlichen Stürmen ins Binnenland erklären. Der anthropogene Anteil an der Chloridfracht, der auf HCl-Emissionen zurückzuführen ist, macht in Deutschland im Jahresmittel nur circa 4% - 12 % aus (GAUGER ET AL 2002).

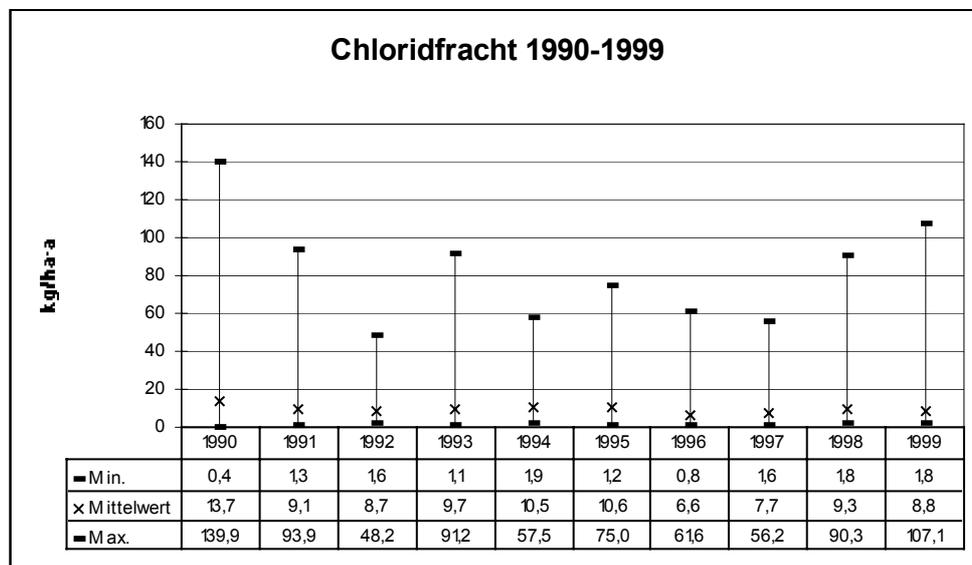
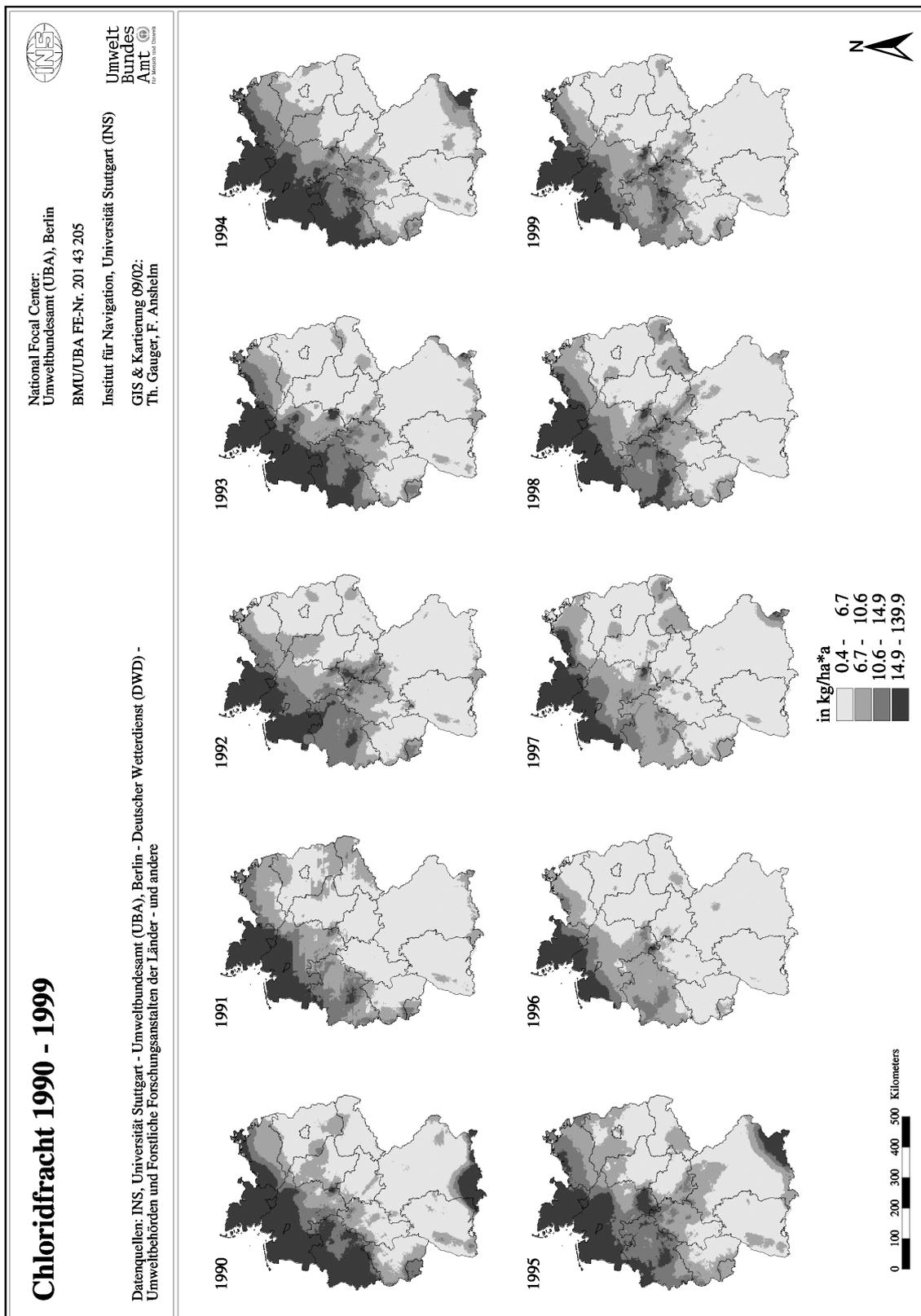


Abb. 16: Chloridfracht 1990-1999



Karte 12: Chloridfracht 1990-1999

2.2 Kartierung der Materialschäden 1990, 1995 und 1999

Die Kartierung der durch die Einwirkung von Klima und Luftschadstoffen entstehenden Materialschäden ist ein vorrangiges Ziel dieses Forschungsvorhabens. Durch die Anwendung der von ICP Materials beziehungsweise Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie ICT entwickelten Dosis-Wirkungsfunktionen lassen sich diese Schäden abschätzen. Für folgende Materialien stehen Dosis-Wirkungsfunktionen zur Verfügung:

- Verwitterungsbeständiger Stahl
- Zink
- Aluminium
- Kupfer
- Bronze
- Portland Kalkstein
- Mansfield Sandstein
- Alkyd-Melamin-Anstrich auf verzinktem Stahlblech
- Alkyd-Anstrich auf Stahlplatten
- Glas (M1, M3)
- Polyurethanlack (PUR)
- Polyvinylchlorid (PVC)
- Polyester (PES)
- Alkydharzlack

In Kapitel 2.1 wurden die Datengrundlagen der Kartierungsarbeiten erläutert. Es handelt sich hierbei um räumlich hochaufgelöste Karten der Immission und Deposition von Luftschadstoffen sowie verschiedener Klimaparameter. An dieser Stelle sollen nun die Dosis-Wirkungsfunktionen und die durch deren Anwendung entstandenen Karten der Materialschäden in Deutschland näher erläutert werden.

2.2.1 Dosis-Wirkungsfunktionen

Für vierzehn verschiedene Materialien stehen Dosis-Wirkungsfunktionen zur Verfügung. Für mittelalterliches Glas⁷ konnte eine Funktion für ungeschützte und eine Formel für geschützte Exposition gegenüber Klima- und Luftschadstoffeinflüssen für die Kartierung verwendet werden. Auch für Polyurethanlack (PUR) stehen zwei Dosis-Wirkungsfunktionen zur Verfügung. Einmal wird die Tiefenschädigung und einmal die Farbveränderung des Polymer-Materials als Schadenskriterium verwendet.

Die Dosis-Wirkungsfunktionen für verwitterungsbeständigen Stahl, Zink, Aluminium, Bronze, Kupfer, Portland Kalkstein, Mansfield Sandstein, Alkyd-Melamin-Anstrich auf verzinktem Stahlblech, Alkyd-Anstrich auf Stahlplatten sowie den mittelalterlichen Glastype wurden unter Federführung des Swedish Corrosion Institutes (SCI) von verschiedenen europäischen Expertengruppen unter dem Dach des UN/ECE ICP Materials entwickelt. Die Dosis-Wirkungsfunktion für die Schäden an Polymeren wurden am Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie ICT in Pfinztal bei Karlsruhe entwickelt. Diese Funktionen werden in Kapitel 1 ausführlich erläutert.

Die unter dem Dach des UN/ECE ICP Materials entwickelten Dosis-Wirkungsfunktionen basieren auf Ergebnissen eines achtjährigen Expositionsversuchs, bei dem an 39 Standorten in Europa und Nordamerika Proben verschiedener an Kunst- und Bauwerken verwendeter Materialien den an den jeweiligen Standorten herrschenden Klima- und Luftschadstoffbedingungen ausgesetzt wurden. Dies geschah sowohl in ungeschützter als auch in geschützter Exposition gegenüber Klimaeinflüssen. Aus den Ergebnissen dieses Expositionsversuchs wurden Funktionen abgeleitet, die die Zusammenhänge zwischen der Immission beziehungsweise Deposition von Luftschadstoffen, klimatischen Faktoren und den an den Materialien aufgetretenen Schäden quantitativ beschreiben (UN ECE 1998). Der Expositionsversuch und die Ableitung der Dosis-Wirkungsfunktionen ist in verschiedenen Veröffentlichungen des ICP Materials (<http://www.corr-institute.se/ICP-Materials/html/publications.html>) ausführlich beschrieben.

⁷ ein für mittelalterliche Glasfenster typischer Glastype (M1 = ungeschützte Exposition; M3 = regengeschützte Exposition)

Durch Anwendung der Dosis-Wirkungsfunktionen kann für die verschiedenen Materialien die sogenannte aktuelle Korrosion⁸ berechnet werden. Sie kennzeichnet die unter aktuellen Klima- und Luftschadstoffbedingungen zu beobachtenden Materialschäden.

Von den Dosis-Wirkungsfunktionen des ICP Materials wurden elf für die Kartierungsarbeiten verwendet - zehn für die ungeschützte und eine für die regengeschützte Exposition von Materialien. Die Berechnung der Materialschäden für die ungeschützte Exposition konnte für fünf Metalle und Legierungen, zwei Natursteine, zwei Anstrichsysteme auf Stahl sowie einen für mittelalterliche Glasfenster typischen Glastyp (M1) erfolgen. Für die geschützte Exposition kam lediglich die Funktion des für mittelalterliche Glasfenster typischen Glastyps (M3) zur Anwendung.

Für die Feststellung eines Schadens werden unterschiedliche Kriterien verwendet. Die Schäden an Metallen und Legierungen werden anhand des jährlichen Massenverlusts in g/m² bewertet. Für die beiden Natursteine dient die Oberflächenrückweichung in µm als Maßstab für den Grad der Schädigung. Bei den Anstrichsystemen auf Stahl kommen Standards der American Society for Testing and Materials (ASTM) für die Schadensbewertung zur Anwendung, wohingegen die Schäden an den mittelalterlichen Glastypen mittels der Tiefe der ausgelaugten oberflächennahen Schicht bemessen werden.

Die Grundlagendaten zu den Klima- und Schadstoffparametern gehen zeitlich in jährlicher Auflösung, räumlich in einer Auflösung von 1 km · 1 km in die Kartierung ein. Während des ICP Materials Expositionsversuchs war aufgefallen, dass die Materialschäden in Gebieten mit niedrigen Jahresmitteltemperaturen in der Regel höher ausfallen als in wärmeren Gefilden. Um dies zu berücksichtigen, geht die Jahresmitteltemperatur ober- beziehungsweise unterhalb einer materialspezifischen Grenztemperatur in unterschiedlicher Stärke in die Berechnung ein.

Dosis-Wirkungsfunktionen für die ungeschützte Exposition:

Verwitterungsbeständiger Stahl

$$ML = 34 \cdot [SO_2]^{0.33} \cdot \exp\{0.02 \cdot Rh + f(T)\} \cdot t^{0.33} \quad (1)$$

$$f(T) = 0.059 \cdot (T-10) \text{ wenn } T < 10^\circ\text{C, sonst } -0.036 \cdot (T-10)$$

Zink

$$ML = 1.4 \cdot [SO_2]^{0.22} \cdot \exp\{0.018 \cdot Rh + f(T)\} \cdot t^{0.85} + 0.029 \cdot Rain \cdot [H^+] \cdot t \quad (2)$$

$$f(T) = 0.062 \cdot (T-10) \text{ wenn } T < 10^\circ\text{C, sonst } -0.021 \cdot (T-10)$$

⁸ im Kontext des ICP Materials Expositionsversuchs schließt der Begriff „Korrosion“ auch die Schädigung an Natursteinen (Verwitterung) mit ein.

Aluminium

$$\text{ML} = 0.0021 \cdot [\text{SO}_2]^{0.23} \cdot \text{Rh} \cdot \exp\{f(T)\} \cdot t^{1.2} + 0.000023 \cdot \text{Rain} \cdot [\text{Cl}^-] \cdot t \quad (3)$$

$$f(T) = 0.031 \cdot (T-10) \text{ wenn } T < 10^\circ\text{C}, \text{ sonst } -0.061 \cdot (T-10)$$

Kupfer

$$\text{ML} = 0.0027 \cdot [\text{SO}_2]^{0.32} \cdot [\text{O}_3]^{0.79} \cdot \text{Rh} \cdot \exp\{f(T)\} \cdot t^{0.78} + 0.05 \cdot \text{Rain} \cdot [\text{H}^+] \cdot t^{0.89} \quad (4)$$

$$f(T) = 0.083 \cdot (T-10) \text{ wenn } T < 10^\circ\text{C}, \text{ sonst } -0.032 \cdot (T-10)$$

Bronze

$$\text{ML} = 0.026 \cdot [\text{SO}_2]^{0.44} \cdot \text{Rh} \cdot \exp\{f(T)\} \cdot t^{0.86} + 0.029 \cdot \text{Rain} \cdot [\text{H}^+] \cdot t^{0.76} + 0.00043 \cdot \text{Rain} \cdot [\text{Cl}^-] \cdot t^{0.76} \quad (5)$$

$$f(T) = 0.060 \cdot (T-11) \text{ wenn } T < 11^\circ\text{C}, \text{ sonst } -0.067 \cdot (T-11)$$

Portland Kalkstein

$$\text{R} = 2.7 \cdot [\text{SO}_2]^{0.48} \cdot \exp\{f(T)\} \cdot t^{0.96} + 0.019 \cdot \text{Rain} \cdot [\text{H}^+] \cdot t^{0.96} \quad (6)$$

$$f(T) = -0.018 \cdot T$$

Mansfield Sandstein

$$\text{R} = 2.0 \cdot [\text{SO}_2]^{0.52} \cdot \exp\{f(T)\} \cdot t^{0.91} + 0.028 \cdot \text{Rain} \cdot [\text{H}^+] \cdot t^{0.91} \quad (7)$$

$$f(T) = 0 \text{ wenn } T < 10^\circ\text{C}, \text{ sonst } -0.013 \cdot (T-10)$$

Alkyd-Melamin-Anstrich auf verzinktem Stahlblech

$$(10\text{-ASTM}) = (0.0084 \cdot [\text{SO}_2] + 0.015 \cdot \text{Rh} + f(T)) \cdot t^{0.43} + 0.00082 \cdot \text{Rain} \cdot t^{0.43} \quad (8)$$

$$f(T) = 0.04 \cdot (T-10) \text{ wenn } T < 10^\circ\text{C}, \text{ sonst } -0.064 \cdot (T-10)$$

Silizium-Alkyd-Anstrich auf Stahlplatten

$$(10\text{-ASTM}) = (0.033 \cdot [\text{SO}_2] + 0.013 \cdot \text{Rh} + f(T)) \cdot t^{0.41} + 0.0013 \cdot \text{Rain} \cdot t^{0.41} \quad (9)$$

$$f(T) = 0.015 \cdot (T-11) \text{ wenn } T < 11^\circ\text{C}, \text{ sonst } -0.15 \cdot (T-11)$$

Glas M1

$$\text{LL} = 0.013 \cdot [\text{SO}_2]^{0.49} \cdot \text{Rh}^{2.8} \cdot t \quad (10)$$

Dosis-Wirkungsfunktion für die regengeschützte Exposition unter einem Schutzdach:Glas M3

$$\text{LL} = 0.4 \cdot [\text{NO}_2]^{0.37} \cdot \text{Rh}^{1.4} \cdot \exp\{f(T)\} \cdot t^{0.45} \quad (11)$$

$$f(T) = 0.041 \cdot (T-10) \text{ wenn } T < 10^\circ\text{C}, \text{ sonst } -0.1 \cdot (T-10)$$

Erläuterung der in den Dosis-Wirkungsfunktionen verwendeten Abkürzungen:

ML = Massenverlust in g/m²

R = Oberflächenrückweichung in μm

ASTM = Standard der American Society for Testing and Materials

LL = Tiefe der ausgelaugten oberflächennahen Schicht in nm

[SO₂] = SO₂-Konzentration in μg/m³ (Jahresmittel)

[O₃] = O₃-Konzentration in μg/m³ (Jahresmittel)

[NO₂] = NO₂-Konzentration in μg/m³ (Jahresmittel)

[H⁺] = H⁺-Konzentration im Niederschlag in mg/l (Jahresmittel)

[Cl⁻] = Cl⁻-Konzentration im Niederschlag in mg/l (Jahresmittel)

Rh = Mittlere jährliche relative Luftfeuchte in %

T = Jahresmitteltemperatur in °C

Rain = Mittlere jährliche Niederschlagssumme in mm

t = Zeitdauer der Exposition in Jahren

2.2.2 Kartierung der aktuellen Korrosion⁹

In Abstimmung mit dem Auftraggeber (Umweltbundesamt) und den Projektpartnern (Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung der Universität Stuttgart (IER), Fraunhofer Institut für Chemische Technologie ICT) wurde entschieden, dass als Input für die ökonomische Abschätzung der Materialschäden Karten der aktuellen Korrosion verwendet werden sollten, die für das 8. Jahr der Exposition und auf der Basis der 1-Jahresmittelwerte der Klima- und Luftschadstoffparameter eben jenes 8. Jahres der Exposition errechnet werden sollten.

Karten mit den Eingangswerten von Einzeljahren sind besser geeignet für die Beschreibung von Sachverhalten, bei denen ein Trend die typischen jährlichen Schwankungen überwiegt (z.B. SO₂). Die Verwendung langjähriger Mittel der Eingangsparameter ist hingegen besser für Parameter geeignet, die von Jahr zu Jahr unregelmäßige Schwankungen zeigen (z. B. Ozon, Klimaparameter) und bei denen kein Trend erkennbar ist. Da für die Schädigung der betrachteten Materialien zumeist die SO₂-Konzentration der Luft der dominierende Einflussparameter ist und im Zeitraum 1988-1999 ein stark rückläufiger Trend der SO₂-Konzentration zu beobachten war, erfolgt die Kartierung der aktuellen Korrosion mit den Klima- und Schadstoffwerten von Einzeljahren. Die Verwendung der Klima- und Schadstoffdaten von Einzeljahren ist zudem für die ökonomische Betrachtung der Materialschäden besser geeignet, da in diesem Fall sowohl die Daten zu Gebäude- und Materialbestand als auch die Daten zu den Klima- und Schadstoffparametern aus ein und demselben Jahr stammen. Die anfallenden Kosten für die Beseitigung der Korrosionsschäden können direkt den in diesem Jahr herrschenden Klima- und Schadstoffwerten zugeordnet werden.

Um eine Aussage über einen möglichen Trend der Materialschäden machen zu können, wurde entschieden die Materialschäden für ein frühes (1990), ein mittleres (1995) und ein möglichst aktuelles Jahr (1999) zu berechnen. Die Entscheidung für die Jahre 1990 und 1999 orientiert sich an der Verfügbarkeit von Daten zum Gebäude- und Materialbestand in Deutschland. Die für das Jahr 1990 beziehungsweise 1999 ermittelten Schäden im 8. Jahr der Exposition können

⁹ in Erweiterung seiner eigentlichen Bedeutung wird der Begriff Korrosion auch für die Schäden an Gesteinen, Anstrichsystemen und Polymeren verwendet

dadurch direkt dem in diesem Jahr tatsächlich vorhandenen Gebäude- und Materialbestand zugeordnet werden.

Die Karten 13 bis 28 zeigen die Kartierungsergebnisse für das 8. Jahr der Exposition und die Jahre 1990, 1995 und 1999. Es zeigt sich, dass bei zehn Materialien die Schäden zu Beginn der 90er Jahre stärker waren als 1999. Abbildung 17 zeigt die Entwicklung der Schäden für die elf Materialien, für die ICP Materials Dosis-Wirkungsfunktionen zur Verfügung standen. In Abbildung 18 ist die zeitliche Entwicklung der Schäden an Polymeren dargestellt.

Insbesondere für die Materialien, für deren Schädigung die SO_2 -Konzentration der Luft von Bedeutung ist, ist ein starker Rückgang der Korrosionsraten festzustellen. Der markante Rückgang der Schwefeldioxid-Konzentration der Luft seit Ende der 80er Jahre hat in der zweiten Hälfte der 90er Jahre zu deutlich geringeren Korrosionsraten geführt. Bei den beiden Anstrichsystemen auf Stahl täuschen die Trendlinien in Abbildung 17 eine Zunahme vor. Höhere ASTM-Werte kennzeichnen aber eine geringere Schädigung des Materials, sodass auch für die Anstrichsysteme auf Stahl eine Abnahme der Korrosionsschäden festgehalten werden kann.

Für die Schäden an den Polymeren sowie die Schäden an Glas M3 kann kein Rückgang der Schäden konstatiert werden kann. Bei Glas M3 (regengeschützte Exposition) ist dies darauf zurückzuführen, dass die Dosis-Wirkungsfunktion für die Berechnung der Schäden an Glas M3 die SO_2 -Konzentration der Luft nicht berücksichtigt. Bei den Schäden an Polymeren wird der Rückgang der SO_2 -Immission offenbar vom Einfluss anderer Einflussfaktoren kompensiert. In die Berechnung der Farbveränderung von PUR und der Schäden an Alkydharzlack geht die SO_2 -Immission mit negativem Vorzeichen ein. Eine gerichtete Entwicklung der Schäden ist jedoch auch bei diesen Materialien nicht erkennbar. Im folgenden werden die Kartierungsergebnisse der einzelnen Materialien näher erläutert.

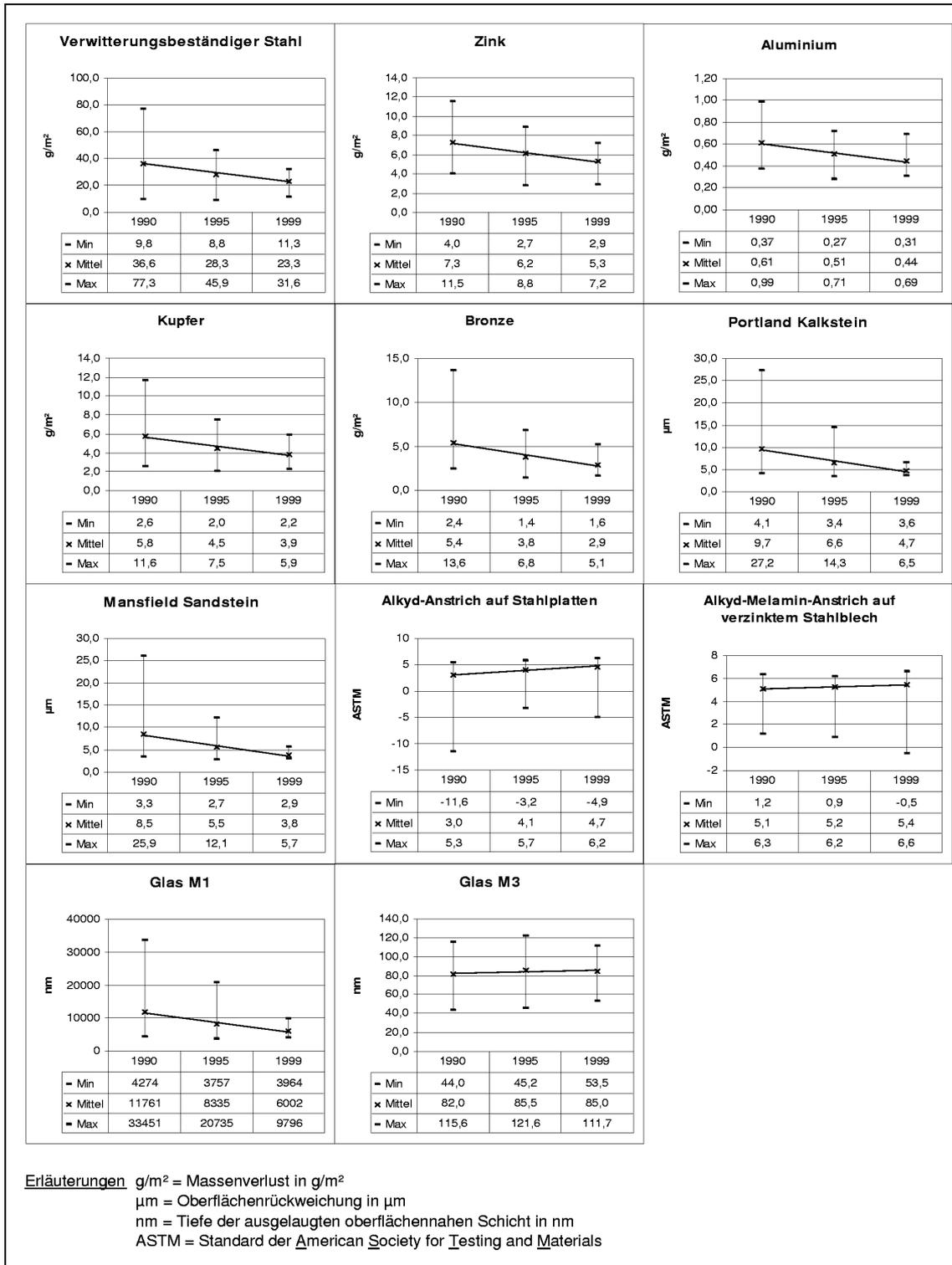


Abb. 17: Korrosion im 8.Jahr der Exposition und die Jahre 1990, 1995 und 1999 (ICP Materials Dosis-Wirkungsfunktionen)

2.2.2.1 Verwitterungsbeständiger Stahl

Die Korrosion im 8. Jahr der Exposition bewegt sich bei verwitterungsbeständigem Stahl zwischen 8,8 und 77,3 g/m², wobei zwischen 1990 und 1999 ein deutlicher Rückgang feststellbar ist (Karte 13, Abbildung 17). Das Gebietsmittel verringerte sich von 36,6 g/m² im Jahr 1990 auf 23,3 g/m² in 1999. Die in den Einzeljahren ermittelten Maximalwerte haben sich um mehr als 50 % verringert. Während 1990 lokal begrenzt noch eine Korrosion von bis zu 77,3 g/m² festgestellt werden konnte, werden 1999 nur noch 31,6 g/m² erreicht. Waren 1990 noch nahezu auf dem gesamten Gebiet der neuen Bundesländer Werte von mehr als 35 g/m² verbreitet, so konzentrieren sich diese hohen Werte 1995 auf die Südhälfte der neuen Bundesländer. 1999 werden, wie bereits erwähnt, Werte in dieser Größenordnung nicht mehr erreicht. Geringe Werte der Korrosion sind vornehmlich in Alpennähe und in einigen Bereichen der Mittelgebirge verbreitet.

Im 1998 abgeschlossenen Kartierungsprojekt wurden für verwitterungsbeständigen Stahl geringere Werte der Korrosion festgestellt. Ursache hierfür sind Veränderungen, die an der Dosis-Wirkungsfunktion vorgenommen wurden. Es werden zwar nach wie vor dieselben Klima- und Schadstoffparameter berücksichtigt, jedoch hat sich die Gewichtung der Parameter verändert. Die räumliche Verteilung der Gebiete mit hohen beziehungsweise niedrigen Werten der Korrosion ist in etwa gleich geblieben. Höchste Werte der Korrosion treten in den Gebieten mit hoher SO₂-Immission auf.

2.2.2.2 Zink

Die Kartierungsergebnisse für die ungeschützte Exposition von Zink stimmen sehr gut mit denen des 1998 abgeschlossenen Kartierungsprojekts überein (ANSHELM ET AL. 1998). Dies war zu erwarten, hat sich doch die Dosis-Wirkungsfunktion nur geringfügig verändert. Höchste Werte der aktuellen Korrosion werden wie bei verwitterungsbeständigem Stahl in den Gebieten höchster SO₂-Konzentration festgestellt (Karte 14, Abbildung 17). Zwischen 1990 und 1999 ist ein rückläufiger Trend zu verzeichnen. Lag das Gebietsmittel 1990 noch bei 7,3 g/m², so liegt es 1999 nur noch bei 5,3 g/m². Die in den Einzeljahren ermittelten Maximalwerte haben sich deutlich verringert. Während 1990 lokal begrenzt noch eine Korrosion von bis zu 11,5 g/m² festgestellt werden konnte, werden 1999 nur noch 7,2 g/m² erreicht.

Inbesondere in den neuen Bundesländern hat sich die Situation deutlich verbessert. 1990 lagen die Werte der aktuellen Korrosion hier nahezu flächendeckend bei Werten größer 8 g/m². In

1999 werden hier maximal noch 6 g/m^2 , im Westen der neuen Länder gar Werte kleiner 5 g/m^2 , erreicht.

2.2.2.3 Aluminium

Die Dosis-Wirkungsfunktion für die ungeschützte Exposition von Aluminium berücksichtigt die Parameter SO_2 , Relative Feuchte, Temperatur sowie die Chlorid-Fracht. Das Gebietsmittel hat in den 90er Jahren von $0,61 \text{ g/m}^2$ (1990) auf $0,44 \text{ g/m}^2$ (1999) abgenommen (Karte 15, Abbildung 17). Auch bei den ermittelten Maximalwerten der Einzeljahre ist ein rückläufiger Trend zu beobachten. Interessant ist die Entwicklung der räumlichen Verteilung der Gebiete mit hohen Werten der aktuellen Korrosion. 1990 waren hohe Werte im Ruhrgebiet, in den neuen Bundesländern und entlang der Nordseeküste festzustellen. Während im Ruhrgebiet und in den neuen Bundesländern die hohen SO_2 -Konzentrationen für die starke Korrosion verantwortlich gemacht werden konnten, war entlang der Nordseeküste der Chlorideintrag über den Niederschlag als Ursache erkannt worden. In 1999 sind nur noch entlang der Nordseeküste Werte größer $0,6 \text{ g/m}^2$ ermittelt worden. SO_2 fällt nach dem starken Rückgang der SO_2 -Konzentrationen in den 90er Jahren als Agens für die Korrosion von Aluminium aus. Die Chloridfracht hat relativ an Bedeutung gewonnen.

2.2.2.4 Kupfer

In die Berechnung der aktuellen Korrosion von Kupfer gehen die Parameter SO_2 , Ozon, relative Feuchte, Temperatur und die Protonenfracht ein. Die Korrosion von Kupfer bewegt sich im achten Jahr der Exposition im Bereich von 2 bis $11,6 \text{ g/m}^2$. Auch hier ist sowohl im Kartenbild (Karte 16), wie auch in den statistischen Werten (Abbildung 17) eine Abnahme in den 90er Jahren erkennbar. Das Gebietsmittel der Korrosion hat sich von $5,8 \text{ g/m}^2$ im Jahr 1990 auf $3,8 \text{ g/m}^2$ im Jahr 1999 verringert. Die Maxima sind von $11,6 \text{ g/m}^2$ auf $5,9 \text{ g/m}^2$ zurückgegangen. Die räumliche Verteilung der Gebiete mit hohen beziehungsweise niedrigen Werten für die Korrosion im achten Jahr der Exposition zeigt zu Beginn der 90er Jahre eine enge Bindung an die räumlichen Muster der Karte der SO_2 -Konzentration. Hohe Werte im Süden der neuen Bundesländer, niedrige Werte in Baden-Württemberg und Bayern. Auch 1995 ist diese großräumige Verteilung noch erkennbar. In 1999 hat sich das Bild verändert. Es ist keine Bindung an die räumlichen Muster der SO_2 -Konzentration mehr erkennbar. Höchste Werte wurden für den Schwarzwald und das Saarland ermittelt. Insgesamt allerdings auf deutlich niedrigerem Niveau.

2.2.2.5 Bronze

Die Dosis-Wirkungsfunktion für Bronze berücksichtigt als Schadstoffparameter die SO_2 -Konzentration, die Chlorid- und die Protonenfracht. Des Weiteren finden die Klimaparameter relative Feuchte und Temperatur Berücksichtigung. Die Korrosion bewegt sich im achten Jahr der Exposition im Gebietsmittel zwischen $5,4 \text{ g/m}^2$ (1990) und $2,9 \text{ g/m}^2$ (1999). Auch für die Maxima kann eine Abnahme konstatiert werden von $13,6 \text{ g/m}^2$ im Jahr 1990 auf $5,1 \text{ g/m}^2$ im Jahr 1999 (Karte 17, Abbildung 17). Auch bei Bronze besteht zunächst eine sehr enge Bindung an die SO_2 -Konzentration der Luft. Der starke Rückgang der SO_2 -Konzentrationen während der 90er Jahre resultiert in einer kräftigen Abnahme der Werte der aktuellen Korrosion von Bronze. Dies zeigt sich besonders deutlich in den neuen Bundesländern. Der Rückgang der aktuellen Korrosion ist überproportional stark in den Gebieten ehemals hoher SO_2 -Konzentrationen. Die niedrigsten Werte sind bis Mitte der 90er Jahre auch bei Bronze in Baden-Württemberg und Bayern zu finden. Wie bei Aluminium zeigt sich auch hier das Phänomen, dass 1999 die höchsten Werte entlang der Nordseeküste und somit in den Gebieten höchster Chloridfrachten festgestellt werden können. Dies ist insofern problematisch, als dass es sich hierbei primär um ein natürliches Phänomen handelt, das auch mit weiteren Emissionsminderungsmaßnahmen nicht eingedämmt werden können. Positiv zu bewerten ist, dass Ende der 90er Jahre der Schadstoffmix offensichtlich auf ein so niedriges Niveau abgesunken ist, dass der vermutlich natürlich vorhandene Gradient vom aggressiven küstennahen Klima zum milderen Klima des Binnenlandes wieder zum Vorschein kommt.

2.2.2.6 Portland Kalkstein

Die Dosis-Wirkungsfunktion für Portland Kalkstein berücksichtigt die den Klimaparameter Temperatur sowie die SO_2 -Konzentration und die Protonenfracht. Als Maß für die Schädigung wird hier nicht der Massenverlust in g/m^2 , sondern die Oberflächenrückweichung in μm herangezogen. Das Gebietsmittel hat sich zwischen 1990 und 1999 halbiert (Karte 18, Abbildung 17). 1990 lag es noch bei einer Oberflächenrückweichung von $9,7 \mu\text{m}$, 1999 nur noch bei $4,7 \mu\text{m}$. Bei den Maximalwerten ist der Rückgang noch dramatischer. 1990 lag das Maximum bei einer Oberflächenrückweichung von $27,2 \mu\text{m}$, 1999 nur noch bei $6,5 \mu\text{m}$. Höchste Werte waren 1990 in den neuen Bundesländern festzustellen. Im Westen Deutschlands wurden nur kleinräumig im Ruhrgebiet und in Rheinland-Pfalz Werte größer $10 \mu\text{m}$ ermittelt. 1995 beschränkten sich die Werte größer $10 \mu\text{m}$ auf die Gebiete höchster SO_2 -Konzentration im Süden der neuen Bundesländer. 1999 gibt es nur noch wenige größere zusammenhängende Flächen Oberflächenrückweichung größer $5 \mu\text{m}$. Ein Erfolg der Verminderung der SO_2 -Konzentration der Luft.

2.2.2.7 Mansfield Sandstein

Die Dosis-Wirkungsfunktion für Mansfield Sandstein berücksichtigt die gleichen Parameter wie die für Portland Sandstein (SO_2 , Protonenfracht, Temperatur). Auch bei der ungeschützten Exposition von Mansfield Sandstein dient die jährliche Oberflächenrückweichung als Maß für den Korrosionsfortschritt. Die berechneten Werte bewegen sich im 8. Jahr der Exposition im Gebietsmittel zwischen $8,5 \mu\text{m}$ im Jahr 1990 und $3,8 \mu\text{m}$ im Jahr 1999 (Karte 19, Abbildung 17). Die Maxima verringern sich von $25,9 \mu\text{m}$ (1990) auf $5,7 \mu\text{m}$ (1999). Die Verteilung der Gebiete mit hohen beziehungsweise niedrigen Werten entspricht weitgehend der für die aktuelle Korrosion von Portland Kalkstein festgestellten Verteilung. Zu Beginn der 90er Jahre sind hohe Werte in den neuen Bundesländern festzustellen, Mitte der 90er Jahre sind die höchsten Werte im Süden der neuen Bundesländer zu finden. Ende der 90er Jahre liegen die Werte der aktuellen Korrosion in Teilen der alten Länder bei Mansfield Sandstein sogar etwas über den in den neuen Ländern festgestellten Werten. Der Rückgang der Werte der aktuellen Korrosion war demnach in den Gebieten ehemals höchster SO_2 -Belastung überproportional hoch.

2.2.2.8 Alkyd-Melamin-Anstrich auf verzinktem Stahlblech

Die Dosis-Wirkungsfunktion für den Alkyd-Melamin-Anstrich auf verzinktem Stahlblech berücksichtigt die SO_2 -Konzentration, die jährliche Niederschlagssumme, die relative Feuchte und die Temperatur. Als Maß für den Korrosionsfortschritt dienen bei den Anstrichsystemen Standards der American Society for Testing and Materials (ASTM). Dem frisch gestrichenen Exponat wird ein Kratzer zugefügt. Der Schadensfortschritt entlang dieses Kratzers dient als Maß für den Fortgang der Schädigung. Dem frisch geritzten und frisch exponierten Exponat wird der ASTM-Wert 10 zugeordnet. Ein ASTM-Wert von 1 entspricht einem völlig zerstörten Exponat. Negative ASTM-Werte sind an sich nicht definiert, können bei der rechnerischen Abschätzung der Schäden an den Anstrichsystemen allerdings vorkommen. Instandsetzungsarbeiten sind bei einem ASTM-Wert von 5 erforderlich. Als Hintergrund-Lebensdauer wird für dieses Anstrichsystem 20 Jahre angenommen (frdl. mündl. Mitteilung J. Tidblad, Swedish Corrosion Institute, Stockholm), das heißt in einem Gebiet, in welchem Klima- und Schadstoffparameter im Niveau des natürlichen Hintergrunds liegen, sollte ein ASTM-Wert von 5 nach 20 Jahren Exposition erreicht sein. Die Kartierungsergebnisse zeigen, dass der ASTM-Wert von 5 in einigen Gebieten bereits nach 8 Jahren erreicht ist, insbesondere in Gebieten mit hohen Niederschlägen. Dies gilt sowohl für den Alpennordrand, als auch für die Mittelgebirgsregionen Deutschlands, wie zum Beispiel Schwarzwald, Harz und Erzgebirge (Karte 20, Abbildung 17). Zu Beginn der 90er Jahre scheint neben der Niederschlagsverteilung auch die SO_2 -Konzentration von Bedeutung zu

sein. Im Süden der neuen Bundesländer, das heißt im Gebiet höchster SO_2 -Konzentrationen, ist das Instandsetzungskriterium ($\text{ASTM} = 5$) bereits nach 8-jähriger Exposition erreicht. Bereits Mitte der 90er Jahre ist das Niveau der SO_2 -Belastung auf ein Maß gesunken, dass der Einfluss der SO_2 -Konzentration in der Kartendarstellung nicht mehr eindeutig erkennbar ist. Ende der 90er Jahre schließlich tritt, dank des weiteren Rückgangs der SO_2 -Konzentration, der Einfluss des Niederschlags noch deutlicher in Erscheinung.

Der Einfluss der SO_2 -Minderung auf die resultierenden ASTM-Werte bleibt insgesamt gering. Trotz des starken Rückgangs der SO_2 -Konzentration erhöhen sich sowohl die im Gebietsmittel als auch die Maximum festgestellten ASTM-Werte nur geringfügig (Abbildung 17). Es überwiegt kein eindeutiger Trend. Die Veränderungen bewegen sich im 10tel-ASTM-Bereich, sind somit nicht messbar. Insgesamt scheint die Schädigung auf einem sehr hohen Niveau zu liegen. Die ASTM-Werte bewegen sich nach nur acht Jahren Exposition großflächig bereits nahe des Instandsetzungskriteriums ($\text{ASTM} = 5$), beziehungsweise haben dieses bereits überschritten. Angesichts der vom Swedish Corrosion Institute erhaltenen Information zur Lebensdauer eines Alkyd-Melamin-Anstrichs auf verzinktem Stahlblech (20 Jahre; frdl. mündl. Mitteilung J. Tidblad) erscheinen die ermittelten Schädigungsgrade doch recht hoch.

2.2.2.9 Alkyd-Anstrich auf Stahlplatten

Auch für das Alkyd-Anstrichsystem auf Stahlplatten dienen ASTM-Werte an künstlich zugefügten Kratzern als Maß für den Korrosionsfortschritt. Bei $\text{ASTM} = 5$ ist das Instandsetzungskriterium erreicht. Unter Hintergrundbedingungen sollte nach 22 Jahren Exposition der ASTM-Wert von 5 erreicht sein (frdl. mündl. Mitteilung J. Tidblad, Swedish Corrosion Institute, Stockholm).

Die Dosis-Wirkungsfunktion berücksichtigt die SO_2 -Konzentration, die Niederschlagssumme, die relative Feuchte und die Temperatur. Die Kartierungsergebnisse zeigen, dass in Gebieten mit hohen Niederschlägen, zu Beginn der 90er Jahre auch im Gebiet maximaler SO_2 -Belastung, der ASTM-Wert von 5 bereits nach 8 Jahren Exposition erreicht beziehungsweise deutlich unterschritten ist (Karte 21, Abbildung 17). Es bestehen allerdings Zweifel an der Zuverlässigkeit der Kartierungsergebnisse, da in Teilen Deutschlands bereits nach einem Jahr Exposition der ASTM-Wert von 5 unterschritten wird. Hier besteht Klärungsbedarf. Die Dosis-Wirkungsfunktion hat sich gegenüber dem 1998 abgeschlossenen Projekt verändert. Die Protonenkonzentration im Niederschlag $[\text{H}^+]$ ist nicht mehr in der Formel enthalten. Nach Auskunft der für

die Entwicklung der Dosis-Wirkungsfunktionen zuständigen Organisation (Swedish Corrosion Institute, Stockholm; frdl. mündl. Mitteilung Johan Tidblad) ist die Dosis-Wirkungsfunktion in ihrer jetzigen Form korrekt. Die ASTM-Werte erhöhen sich im Laufe der 90er Jahre im Gebietsmittel von ASTM 3 auf ASTM 5, im Maximum von ASTM 5 auf ASTM 6.

2.2.2.10 Glas M1

Bei den Gläsern dient die Tiefe der ausgelaugten oberflächennahen Schicht (in nm) als Maß für den Korrosionsfortschritt. Glas M1 ist typisch für mittelalterliche Glasfenster in ungeschützter Exposition. Die Dosis-Wirkungsfunktion für Glas M1 berücksichtigt die Parameter SO_2 und relative Feuchte. Die ermittelten Werte bewegen sich im achten Jahr der Exposition im Gebietsmittel zwischen 11761 nm im Jahr 1990 und 6002 nm im Jahr 1999 (Karte 22, Abbildung 17). Die Maxima liegen zwischen 33451 nm (1990) und 9796 nm (1999). Höchste Werte sind in den Gebieten maximaler SO_2 -Konzentration zu verzeichnen. Zu Beginn der 90er Jahre liegen die Werte noch großflächig über 10000 nm. 1999 konnten Werte in dieser Höhe nicht mehr festgestellt werden. In der 90er Jahren ist ein deutlicher Rückgang in der Intensität der Schädigung feststellbar.

2.2.2.11 Glas M3

Glas M3 ist typisch für mittelalterliche Glasfenster in regengeschützter Exposition. Im Gegensatz zur ungeschützten Exposition, bei der der Parameter SO_2 von Bedeutung ist, spielt hier neben der relativen Feuchte und der Temperatur die NO_2 -Konzentration eine bedeutende Rolle. Verglichen mit den Korrosionsraten der ungeschützten Exposition (Glas M1) sind die festgestellten Werte sehr viel geringer (Karte 23, Abbildung 17). Die Auswaschung der Korrosionsprodukte durch den Regen scheint von großer Bedeutung zu sein. Die Werte bewegen sich im achten Jahr der Exposition im Gebietsmittel zwischen 82 nm im Jahr 1990 und 85 nm im Jahr 1999. Die Maximalwerte liegen zwischen 116 nm (1990) und 112 nm (1999). Es ist keine gerichtete Entwicklung erkennbar. Die Dosis-Wirkungsfunktion für die Berechnung der Schäden an Glas M3 berücksichtigt die NO_2 -Immission. Für die NO_2 -Konzentration der Luft ist in den 90er Jahren keine gerichtete Entwicklung erkennbar. Werden für die Berechnung der Schäden an Glas M3 nicht einjährige Mittelwerte der Eingangsparameter, sondern langjährige Mittel verwendet, so zeichnen sich Gebiete hoher NO_2 -Konzentration durch verhältnismäßig hohe Schäden an Glas M3 aus (Rheinschiene, Großraum München, Bremen). Bei Verwendung von einjährigen Mittelwerten für die Eingangsparameter tritt die Bindung der Schäden an die NO_2 -Konzentration der Luft im Kartierungsergebnis nicht so deutlich hervor.

2.2.2.12 Tiefenschädigung von Polyurethan (PUR)

Die Dosis-Wirkungsfunktion für die Ermittlung der Tiefenschädigung von Polyurethanlack (PUR) wurde am Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie ICT aus den Ergebnissen eigener Expositionsversuche abgeleitet (Kapitel 1). Die Dosis-Wirkungsfunktion berücksichtigt als Parameter die mittlere jährliche Bestrahlungsstärke, die Jahresmitteltemperatur, die mittlere jährliche relative Luftfeuchte sowie die Jahresmittel der Immission von NO₂ und O₃. Zur Ermittlung der Tiefenschädigung von PUR-Lack werden jeweils die Jahresmittelwerte der Klima- und Schadstoffparameter in die Dosis-Wirkungsfunktion eingesetzt. Als Maß für die Tiefenschädigung dient die Eindringtiefe von Lugolscher Lösung in PUR (in µm).

Karte 24 zeigt die Kartierungsergebnisse für die Jahre 1990, 1995 und 1999. Nach acht Jahren Exposition liegt die Eindringtiefe von Lugolscher Lösung in PUR zwischen 15 und 32 µm. Das Gebietsmittel der Eindringtiefe (27 - 28 µm) hat sich im betrachteten Zeitraum kaum verändert (Abbildung 18). Gleiches gilt für die in den einzelnen Jahren festgestellten Maximalwerte (31 – 32 µm). Auch bezüglich der räumlichen Verteilung der Gebiete mit hohen Werten beziehungsweise niedrigen Werten der Eindringtiefe Lugolscher Lösung in PUR-Lack ergeben sich beim Vergleich der Kartierungsergebnisse für die Jahre 1990, 1995 und 1999 keine bedeutenden Veränderungen. Hohe Werte treten vornehmlich entlang des Ober- und Mittelrheins auf. 1999 darüber hinaus auch noch an der deutschen Nordseeküste. Die Verteilung der Gebiete mit hohen und niedrigen Werten scheint sich an die Karte der Jahresmitteltemperatur in Deutschland anzulehnen. Die hohen Werte an der Nordseeküste in 1999 könnten durch die in diesem Gebiet in 1999 relativ hohen Werte der mittleren Bestrahlungsstärke verursacht sein. Geringe Werte der Eindringtiefe von Lugolscher Lösung in PUR-Lack treten vorwiegend in den deutschen Mittelgebirgen und im Alpenraum auf.

2.2.2.13 Tiefenschädigung von Polyvinylchlorid (PVC)

Die Dosis-Wirkungsfunktion für die Ermittlung der Tiefenschädigung von Polyvinylchlorid (PVC) wurde am Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie ICT aus den Ergebnissen eigener Expositionsversuche abgeleitet (Kapitel 1). Die Dosis-Wirkungsfunktion berücksichtigt als Parameter die mittlere jährliche Bestrahlungsstärke, die Jahresmitteltemperatur, die mittlere jährliche relative Luftfeuchte sowie die Jahresmittel der Immission von SO₂, O₃ und NO₂. Zur Ermittlung der Tiefenschädigung von PVC werden jeweils die Jahresmittelwerte der Klima- und Schadstoffparameter in die Dosis-Wirkungsfunktion eingesetzt. Als Maß für die Tiefenschädigung von PVC dient die Eindringtiefe von Acridinorange in PVC (in µm).

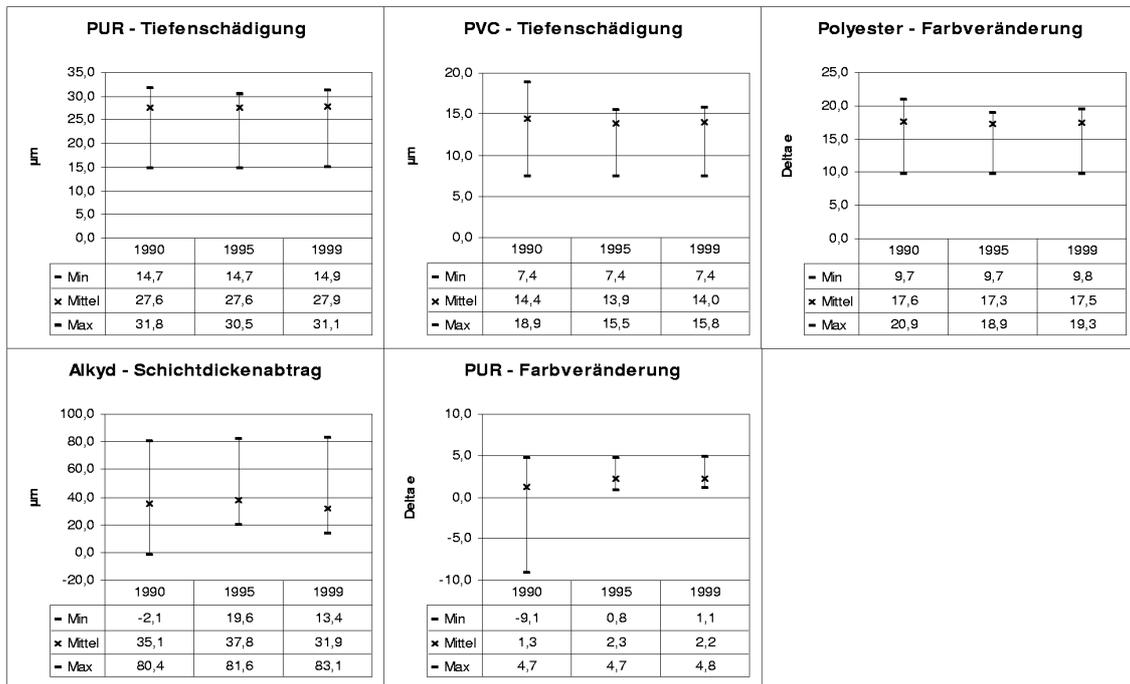


Abb. 18: Schäden an Polymeren 1990, 1995 und 1999 (Dosis-Wirkungsfunktionen des Fraunhofer-Instituts für Chemische Technologie ICT)

Karte 25 zeigt die Kartierungsergebnisse für die Jahre 1990, 1995 und 1999. Nach acht Jahren Exposition liegt die Eindringtiefe von Acridinorange in PVC zwischen 7 und 19 μm . Das Gebietsmittel hat sich im betrachteten Zeitraum von 14,4 auf 14 μm , das Gebietsmaximum von 18,9 auf 15,8 μm verringert (Abbildung 18). Insbesondere bei den Maximalwerten ist somit eine Verbesserung der Situation zwischen 1990 und 1999 festzustellen. Auch bezüglich der räumlichen Verteilung der Gebiete mit relativ hohen Schädigungen ($> 14 \mu\text{m}$) tritt eine Veränderung auf. 1990, und in abgeschwächtem Maße auch noch 1995, treten die höchsten Werte für die Eindringtiefe von Acridinorange in PVC zum einen im Westen entlang der Rheinschiene (hohe Jahresmitteltemperaturen), dann aber auch im Süden der neuen Bundesländer, dem Gebiet mit den höchsten SO_2 -Konzentrationen, auf. 1999 hingegen treten Werte größer 14 μm im Süden der neuen Bundesländern kaum noch auf. Die Verbesserung der Situation in den neuen Bundesländern ist auf den starken Rückgang der SO_2 -Immission zwischen 1990 und 1999 zurückzuführen. In den alten Bundesländern befand sich die SO_2 -Immission bereits zu Beginn der 90er Jahre auf relativ niedrigem Niveau. Die markante Veränderung auf der Schadensseite ist daher im Westen Deutschlands weniger stark ausgeprägt. Für die relativ hohen Werte der Eindringtiefe von Acridinorange in PVC spielen hier andere Faktoren eine Rolle. Die Verteilung der Gebiete mit relativ hohen Schäden lässt einen verhältnismäßig starken Einfluss der Temperaturverteilung als wahrscheinlich erscheinen (Karte 2 und Karte 25). Niedrige Werte für die Ein-

dringtiefe von Acridinorange in PVC finden sich vornehmlich in Alpennähe und in Mittelgebirgsregionen (Schwarzwald, Schwäbische Alb, Bayerischer Wald, Thüringer Wald, Harz, Westerwald) und somit in Regionen, die sich durch relativ geringe Jahresmittelwerte der Temperatur auszeichnen.

Die Ergebnisse der flächendeckenden Kartierung der Schäden an PVC wurden unter Verwendung modellierter Daten der mittleren Bestrahlungsstärke in Deutschland erzielt (Kapitel 2.1). Für 15 Orte in Deutschland lagen darüber hinaus die aus Messwerten der Globalstrahlung abgeleiteten Werte zur Bestrahlungsstärke vor. Die Berechnung der Tiefenschädigung von PVC an diesen 15 Punkten führte zu ähnlichen Resultaten wie die unter Verwendung von Modelldaten durchgeführte flächendeckende Kartierung an diesen 15 Punkten.

2.2.2.14 Farbveränderung von Polyester (PES)

Die Dosis-Wirkungsfunktion für die Ermittlung der Farbveränderung von Polyester (PES) wurde ebenfalls am Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie ICT aus den Ergebnissen von Expositionsversuchen abgeleitet (Kapitel 1). Die Dosis-Wirkungsfunktion berücksichtigt als Parameter die mittlere jährliche Bestrahlungsstärke, die Jahresmitteltemperatur, die mittlere jährliche relative Luftfeuchte sowie die Jahresmittel der Immission von SO_2 und O_3 . Zur Ermittlung der Tiefenschädigung von PUR werden jeweils die Jahresmittelwerte der Klima- und Schadstoffparameter in die Dosis-Wirkungsfunktion eingesetzt. Als Maß für die Farbveränderung von Polyester dient die dimensionslose Größe Delta-E. Je höher Delta-E, desto dunkler ist das Material. Negative Delta-E-Werte entsprechen einer Aufhellung des exponierten Materials.

Karte 26 zeigt die Kartierungsergebnisse für die Jahre 1990, 1995 und 1999. Nach acht Jahren Exposition liegen die Werte für Delta-E zwischen 10 und 21. Das Gebietsmittel hat sich im betrachteten Zeitraum kaum verändert. Es liegt jeweils zwischen 17 und 18. Bei den Gebietsmaxima ist ein leichter Rückgang zu verzeichnen, von 20,9 im Jahr 1990 auf 19,3 im Jahr 1999 (Abbildung 18).

Bezüglich der räumlichen Verteilung von Gebieten mit hohen beziehungsweise niedrigen Delta-E-Werten können markante Veränderungen festgestellt werden. 1990 traten die stärksten Farbveränderungen in den Gebieten höchster SO_2 -Immission auf (Sachsen-Anhalt, Thüringen, Sachsen). Daher können vor allem in den neuen Bundesländern zu Beginn der 90er Jahre starke Farbveränderungen festgestellt werden. Die Bindung hoher Schäden an die Gebiete höchster SO_2 -Immission verliert im Laufe der 90er Jahre mit dem Rückgang der SO_2 -Konzentrationen

zunehmend an Bedeutung. In 1999 scheinen hohe Delta-E-Werte vielmehr an hohe Werte der Ozon-Immission (Südschwarzwald) oder relativen Feuchte (Nordseeküste) gebunden zu sein. Hohe Werte der Farbveränderung im Bereich des Oberrheingrabens sind in erster Linie durch hohe Jahresmitteltemperaturen verursacht. Geringe Farbveränderungen treten in allen Jahren im Alpenraum und den höheren Lagen der Mittelgebirge auf. Dies sind die Gebiete mit den geringsten Jahresmitteltemperaturen.

2.2.2.15 Schichtdickenabtrag von Alkydharzlack (Alkyd)

Die Dosis-Wirkungsfunktion für die Ermittlung des Schichtdickenabtrags von Alkydharzlack wurde am Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie ICT aus den Ergebnissen eigener Expositionsversuche abgeleitet (Kapitel 1). Die Dosis-Wirkungsfunktion berücksichtigt als Parameter die mittlere Bestrahlungsstärke, die mittlere jährliche relative Luftfeuchte, die Jahresmitteltemperatur, die Summe des jährlichen Niederschlags sowie die Jahresmittel der Immission von NO₂, SO₂ und O₃. Zur Ermittlung des Schichtdickenabtrags von Alkydharzlack werden jeweils die Jahresmittelwerte der Klima- und Schadstoffparameter in die Dosis-Wirkungsfunktion eingesetzt.

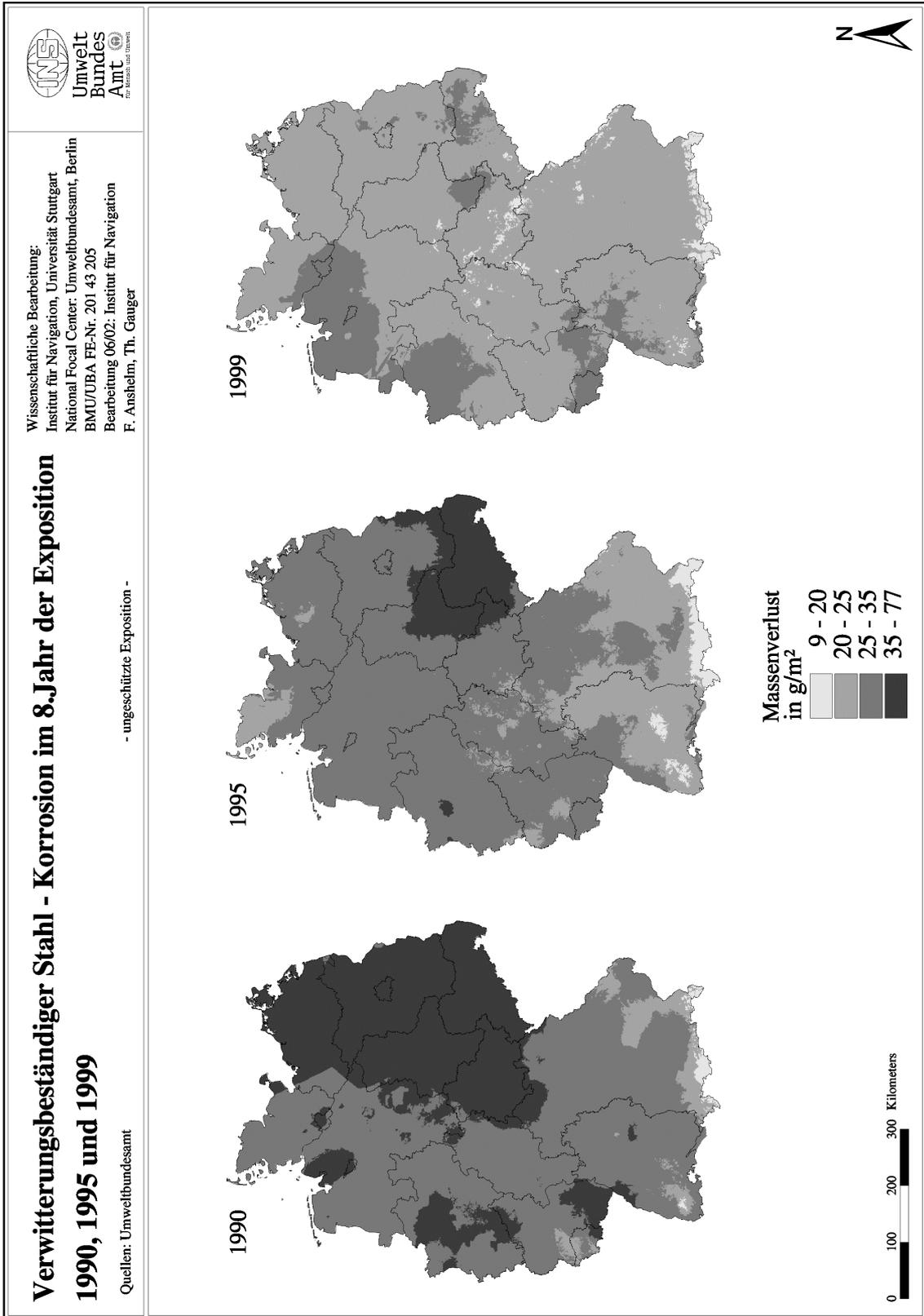
Karte 27 zeigt die Kartierungsergebnisse für die Jahre 1990, 1995 und 1999. Nach acht Jahren Exposition liegt der Schichtdickenabtrag zwischen -2 und 80 µm. Negative Werte des Schichtdickenabtrags können als Schichtaufbau erklärt werden (Oxidationsprodukte). Das Gebietsmittel des Schichtdickenabtrags zeigt im betrachteten Zeitraum keine gerichtete Entwicklung. Der höchste Wert konnte für das Jahr 1995 ermittelt werden (37,8 µm). Das Gebietsmaximum hat sich zwischen 1990 und 1999 von 80,4 µm auf 83,1 µm erhöht (Abbildung 18). Die räumlichen Muster der Verteilung der Gebiete mit hohen Werten beziehungsweise niedrigen Werten des Schichtabtrags lassen sich nicht ohne weiteres auf den Einfluss einzelner klimatischer Faktoren oder bestimmter Schadstoffe zurückführen. Vereinzelt können hohe Werte des Schichtdickenabtrags mit Gebieten hoher Ozon-Immission in Verbindung gebracht werden, so zum Beispiel im Gebiet um Garmisch-Partenkirchen in 1990, im südlichen Schwarzwald in 1990 oder im Süden des Bayerischen Waldes in 1999. Diese niedrigen Werte ließen sich dann als Schichtauftrag durch Oxidationsprodukte interpretieren. Eine Interpretation der Kartierungsergebnisse ist schwierig, da sich aus dem Kartenbild kaum Regelmäßigkeiten erkennen lassen. Das Fehlen regelmäßig auftretender räumlicher Muster in den Karten ist mit hoher Wahrscheinlichkeit darauf zurückzuführen, dass einige Parameter mit positivem Vorzeichen, andere hingegen mit negativem Vorzeichen in die Schadensberechnung einfließen. Es kommt zu einer Überlagerung einer

Vielzahl von, zum Teil auch gegenläufigen, Effekten, was die Herausbildung regelmäßiger räumlicher Strukturen verhindert.

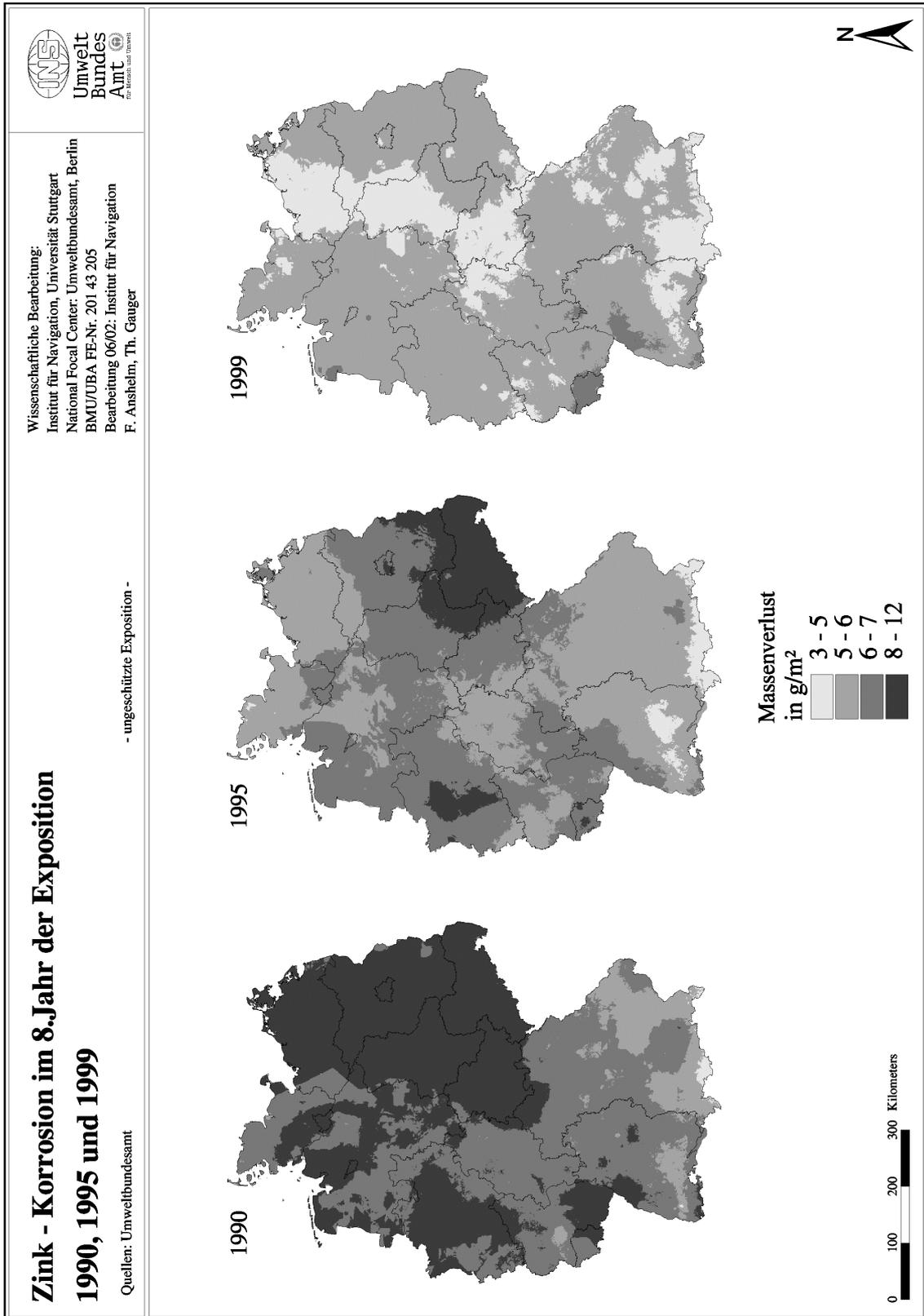
2.2.2.16 Farbveränderung von Polyurethanlack (PUR)

Die Dosis-Wirkungsfunktion für die Ermittlung der Farbveränderung von Polyurethanlack (PUR) wurde am Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie ICT aus den Ergebnissen eigener Expositionsversuche abgeleitet (Kapitel 1). Die Dosis-Wirkungsfunktion berücksichtigt als Parameter die mittlere jährliche Bestrahlungsstärke, die Jahresmitteltemperatur, die mittlere jährliche relative Luftfeuchte, die jährliche Niederschlagssumme sowie die Jahresmittel der Immission von NO₂, SO₂ und O₃. Zur Ermittlung der Farbveränderung werden jeweils die Jahresmittelwerte der Klima- und Schadstoffparameter in die Dosis-Wirkungsfunktion eingesetzt. Als Maß für die Farbveränderung von PUR-Lack dient die dimensionslose Größe Delta-E. Je höher Delta-E, desto dunkler ist das Material. Negative Delta-E Werte entsprechen einer Aufhellung des exponierten Materials.

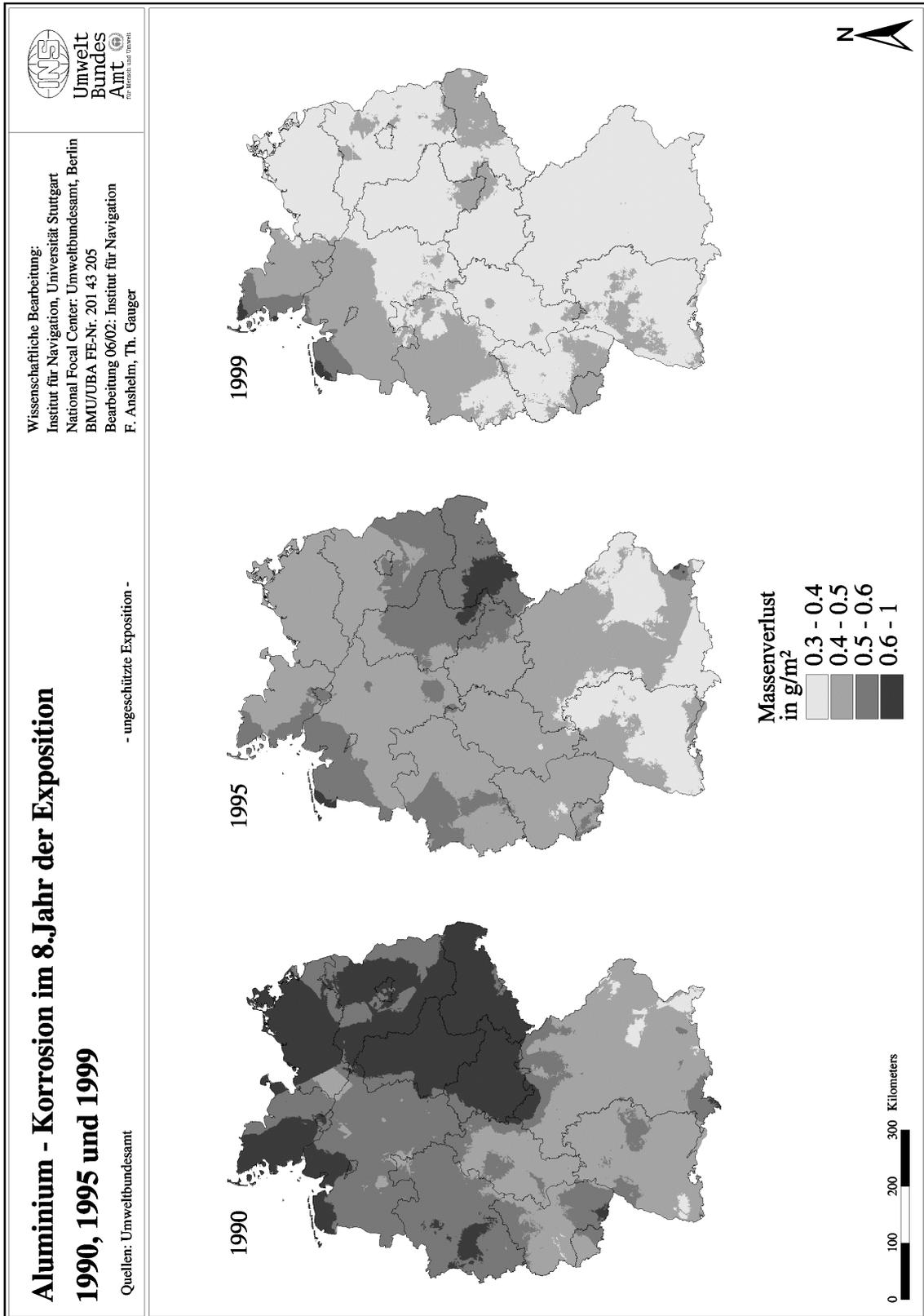
Karte 28 zeigt die Kartierungsergebnisse für die Jahre 1990, 1995 und 1999. Nach acht Jahren Exposition treten Delta-E-Werte zwischen -9 und +5 auf. Das Gebietsmittel liegt zwischen 1,3 und 2,2 (Abbildung 18). Eine gerichtete Entwicklung lässt sich nicht erkennen. Dies gilt auch für die Gebietsmaxima, die bei 4,7 bis 4,8 liegen. Negative Werte treten nur in 1990 auf. Sie sind auf die Gebiete hoher SO₂-Immission beschränkt und können als Auskreiden und damit als Aufhellung des Materials interpretiert werden. Dieser Effekt ist auch im Kartierungsergebnis des Jahres 1995 noch zu erkennen. 1999 hingegen sind die SO₂-Werte so weit gesunken, dass dieser Effekt nicht mehr auftritt. Effekte anderer Klima- oder Schadstoffparameter sind nicht in dieser Eindeutigkeit zu erkennen. Im Jahr 1990 jedoch können niedrige Delta-E-Werte auch mit Gebieten hoher Ozon-Immission in Verbindung gebracht werden (u.a. Südschwarzwald, Bayerischer Wald, Gebiet nördlich von Garmisch-Partenkirchen). In 1999 lässt sich dieser Effekt im Harz und im Südschwarzwald in abgeschwächter Form erkennen. Hohe Delta-E-Werte lassen sich nicht ohne weiteres bestimmten Einflussparametern zuordnen. Werte größer Delta-E = 3 treten nur sehr kleinräumig im Alpenraum auf. Diese Maxima scheinen an die Gebiete mit den geringsten Jahresmittelwerten der Temperatur gebunden zu sein.



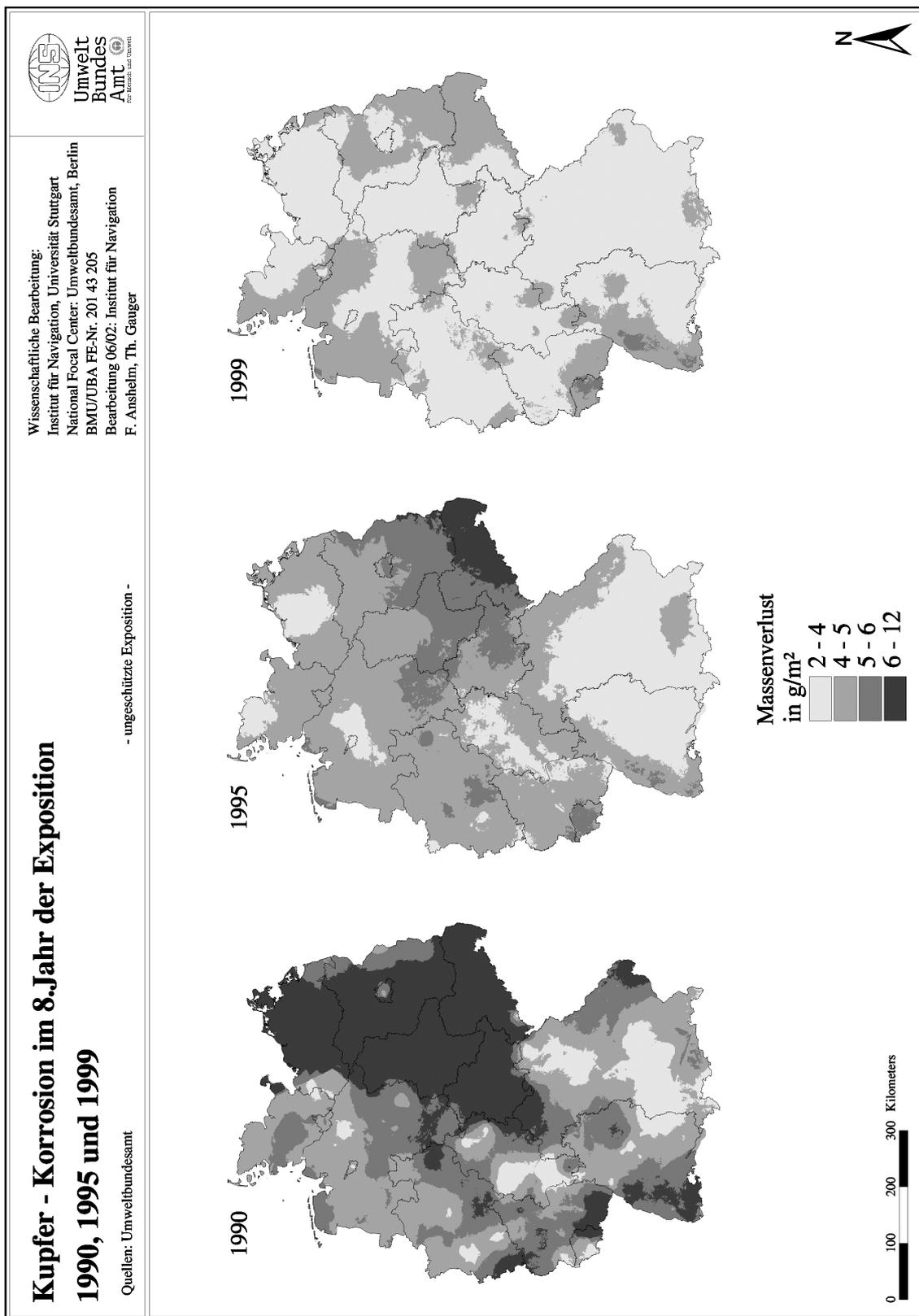
Karte 13: Verwitterungsbeständiger Stahl – Korrosion im 8.Jahr der Exposition 1990, 1995 und



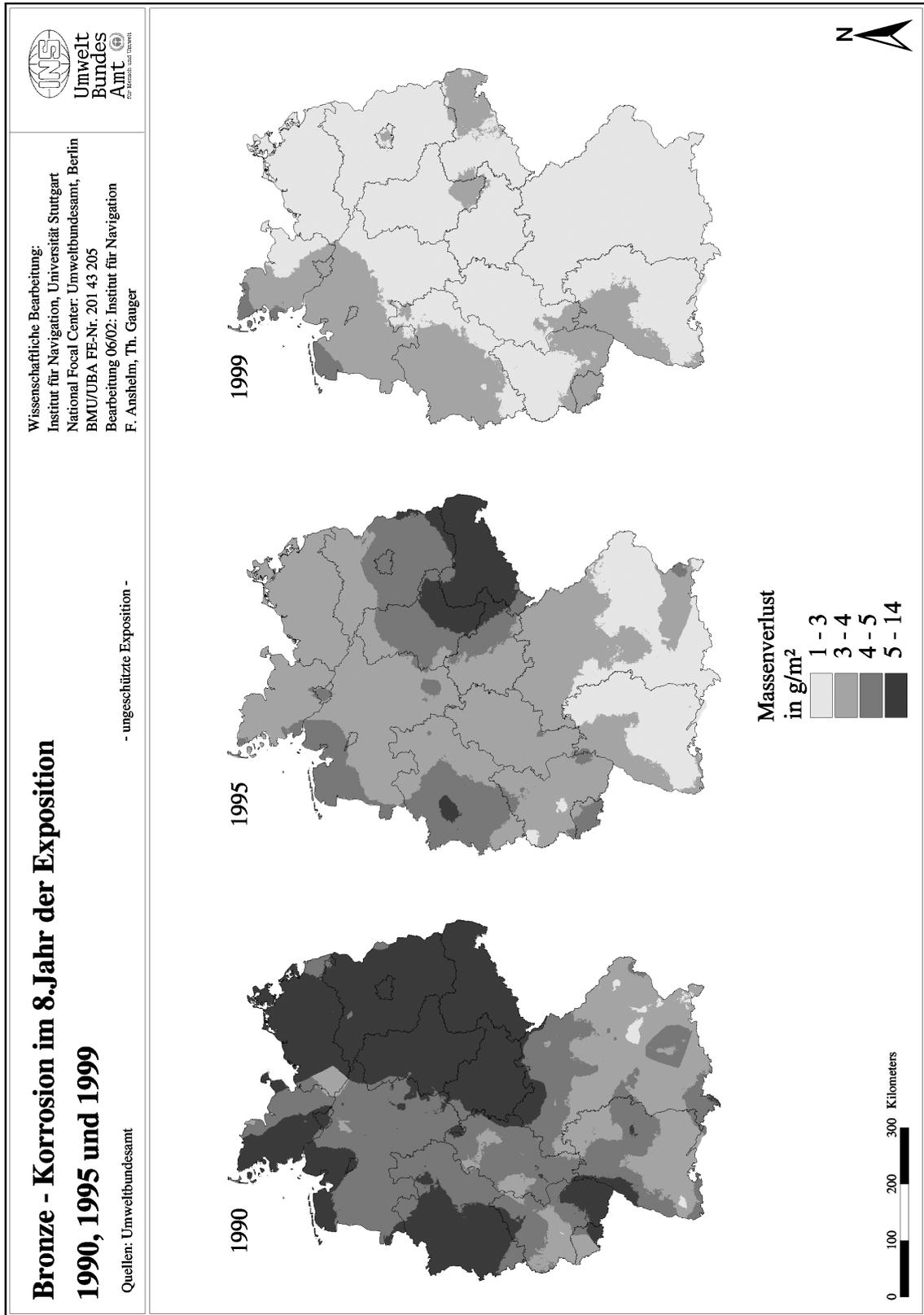
Karte 14: Zink – Korrosion im 8.Jahr der Exposition 1990, 1995 und 1999



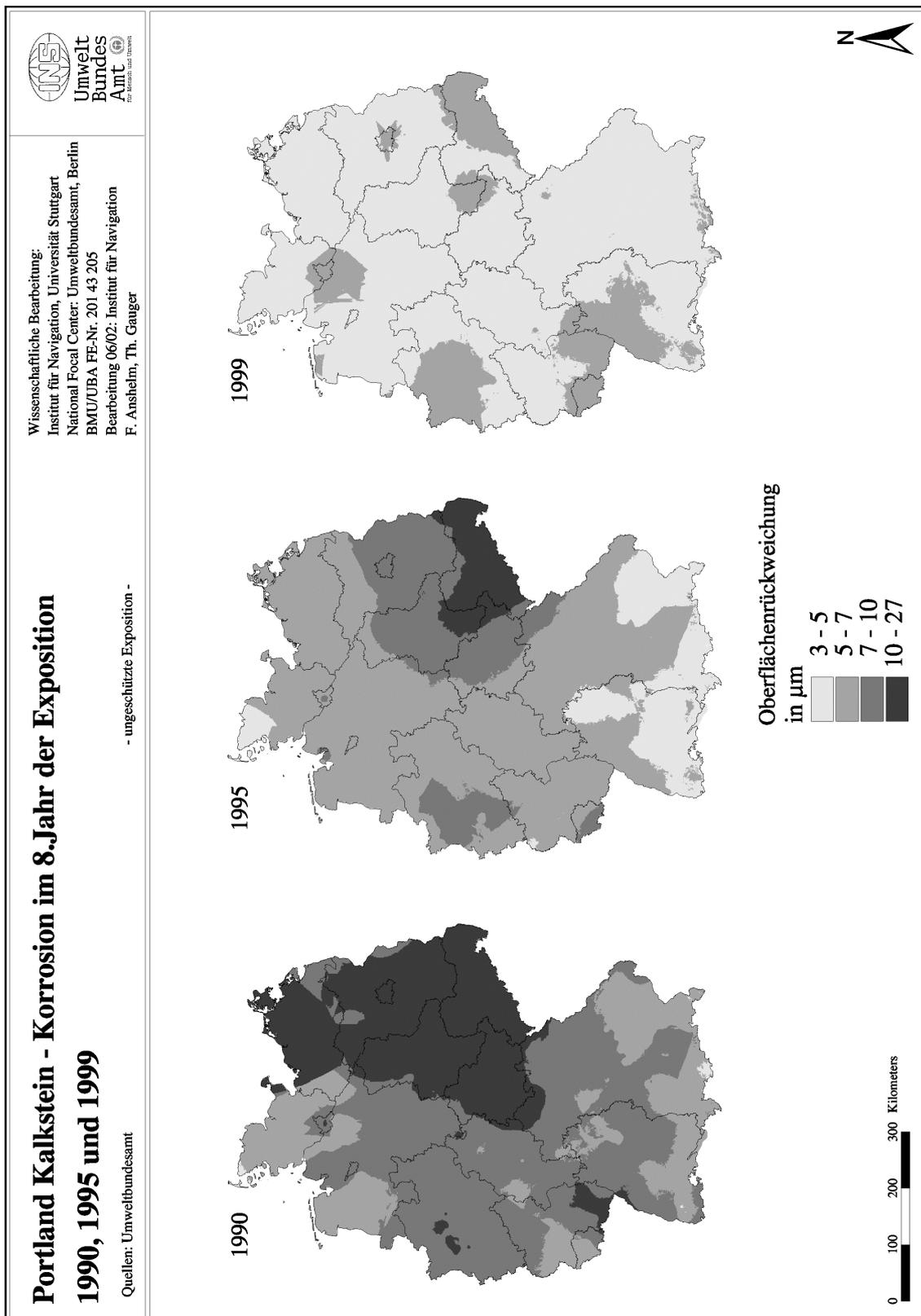
Karte 15: Aluminium – Korrosion im 8.Jahr der Exposition 1990, 1995 und 1999



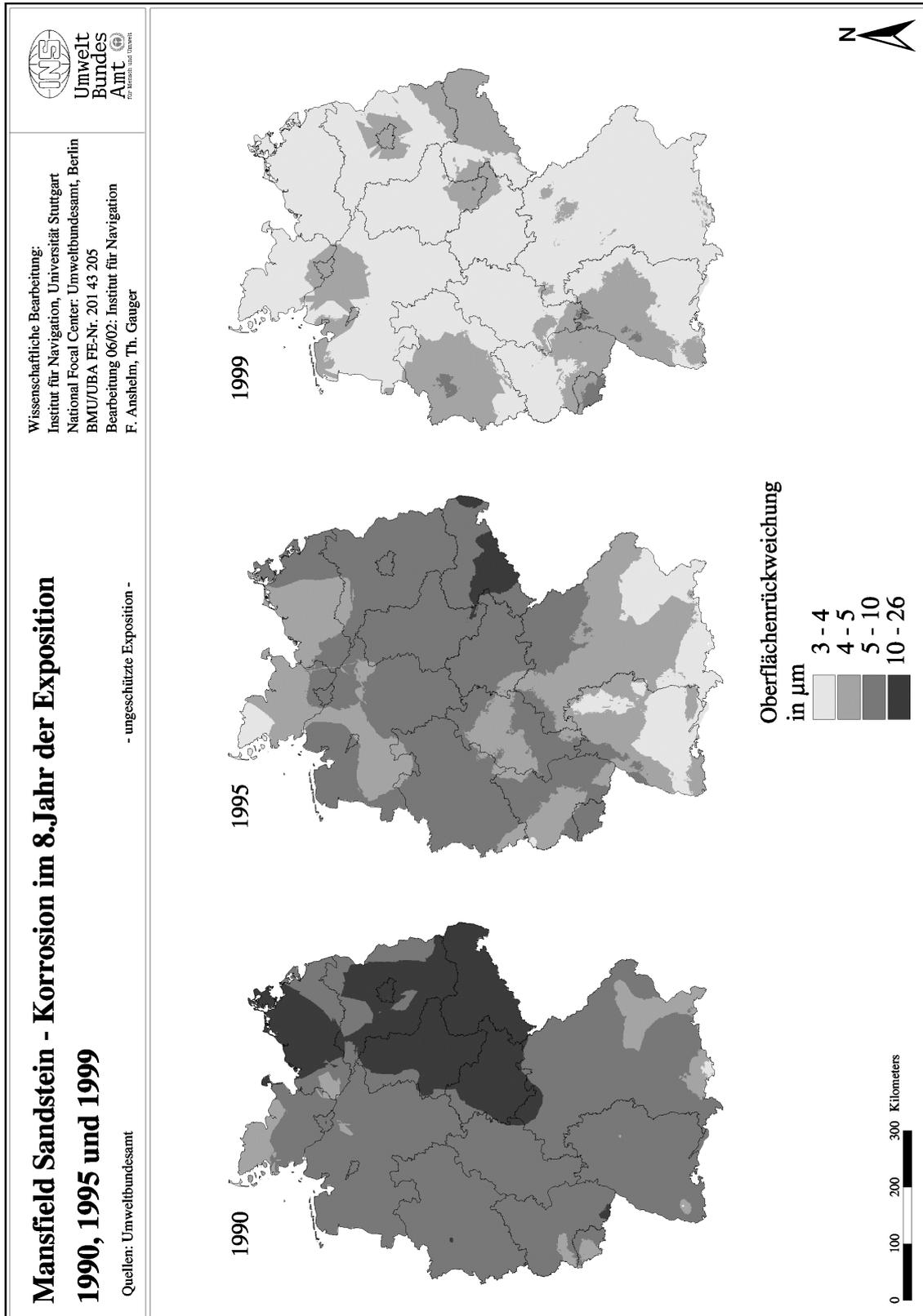
Karte 16: Kupfer – Korrosion im 8. Jahr der Exposition 1990, 1995 und 1999



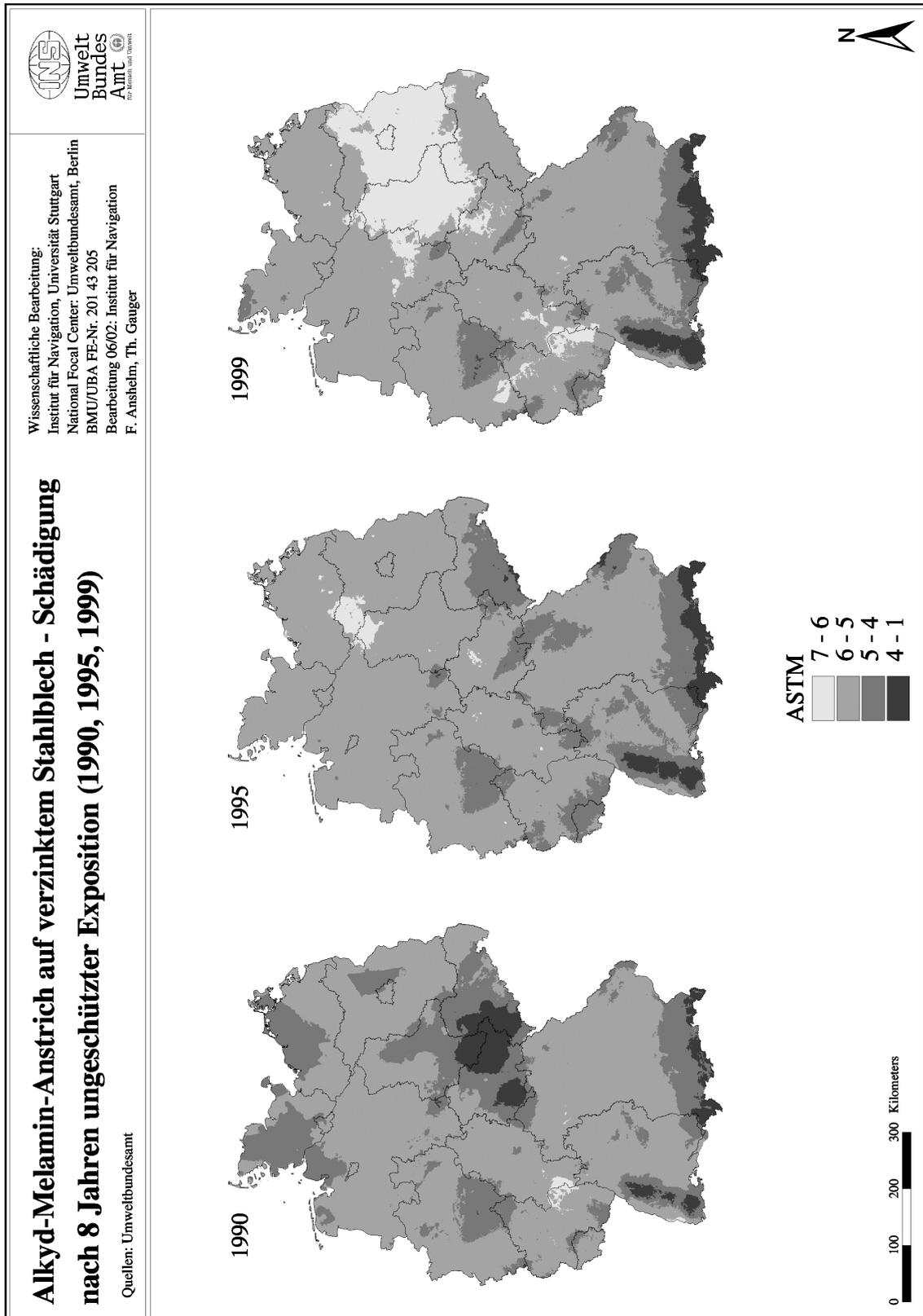
Karte 17: Bronze – Korrosion im 8.Jahr der Exposition 1990, 1995 und 1999



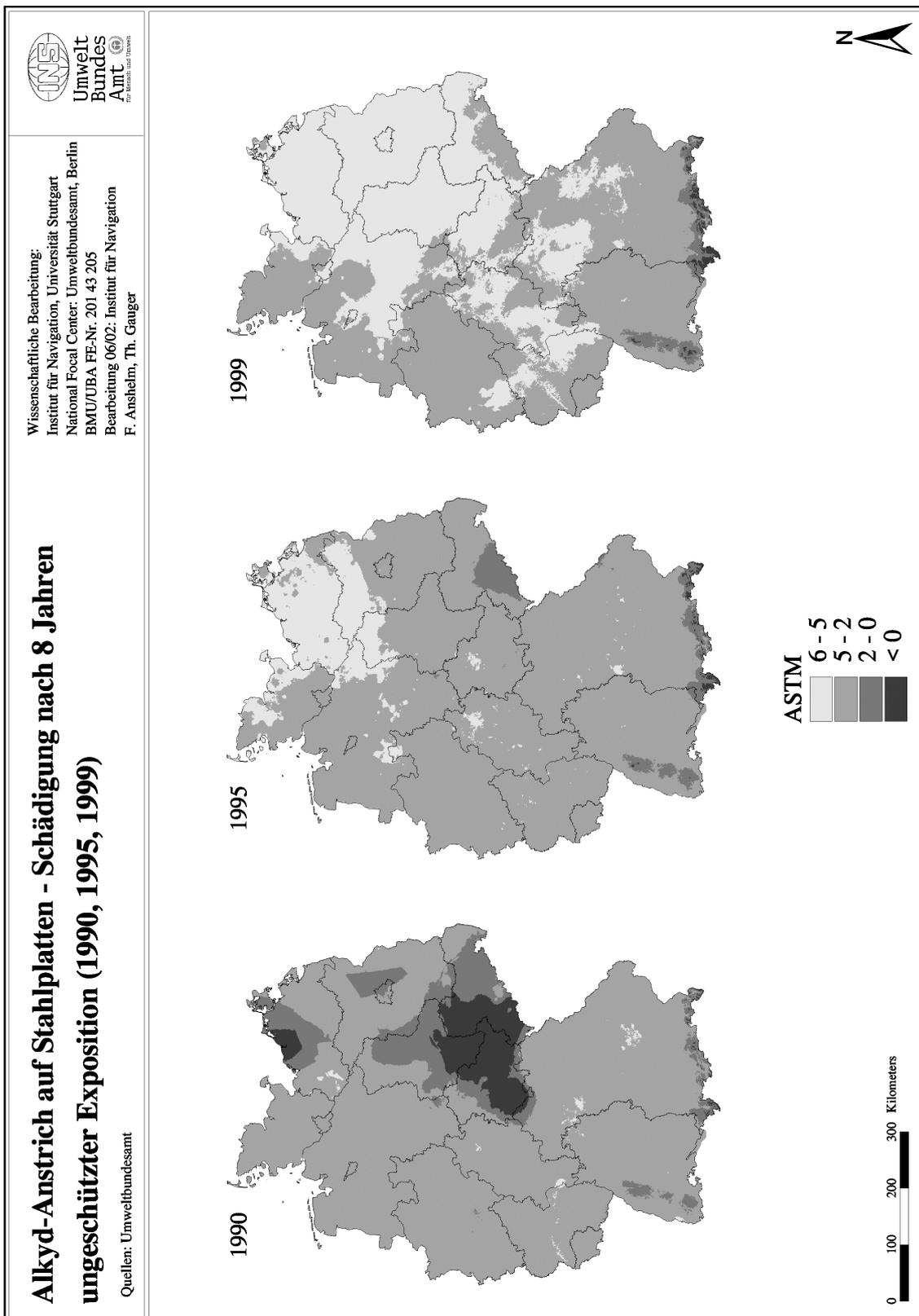
Karte 18: Portland Kalkstein – Korrosion im 8. Jahr der Exposition 1990, 1995 und 1999



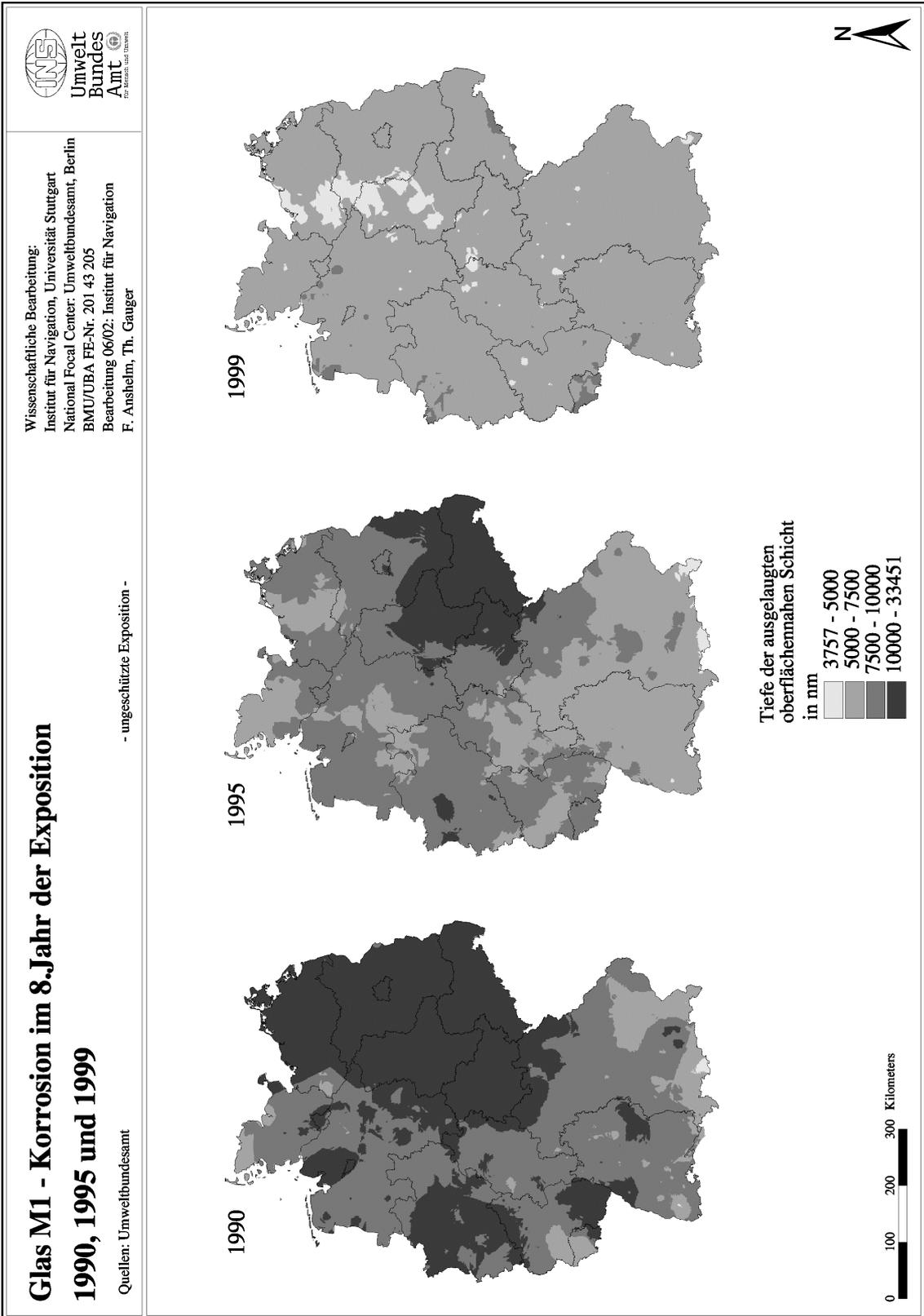
Karte 19: Mansfield Sandstein – Korrosion im 8.Jahr der Exposition 1990, 1995 und 1999



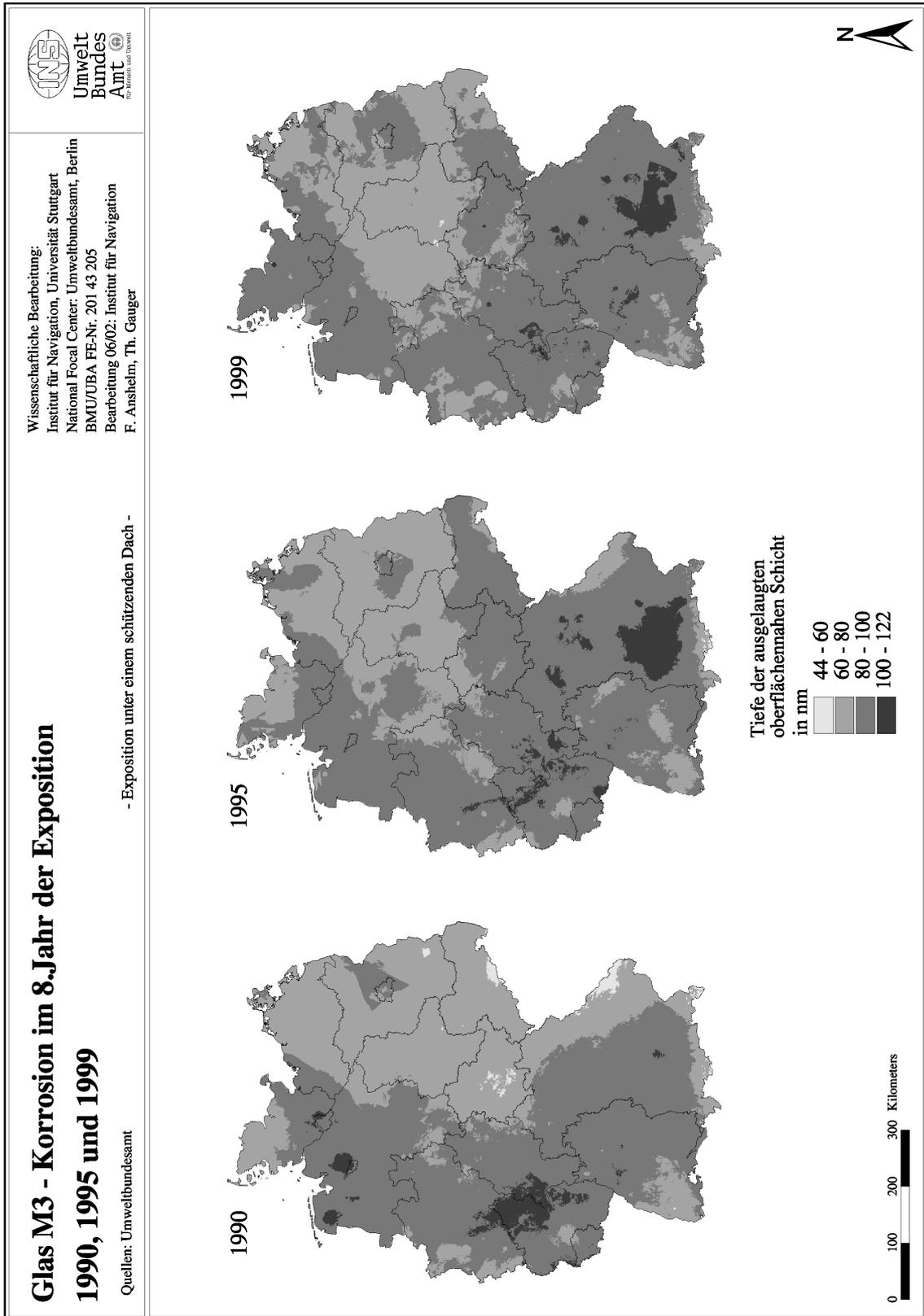
Karte 20: Alkyd-Melamin-Anstrich auf verzinktem Stahlblech – Korrosion im 8.Jahr der Exposition 1990, 1995 und 1999



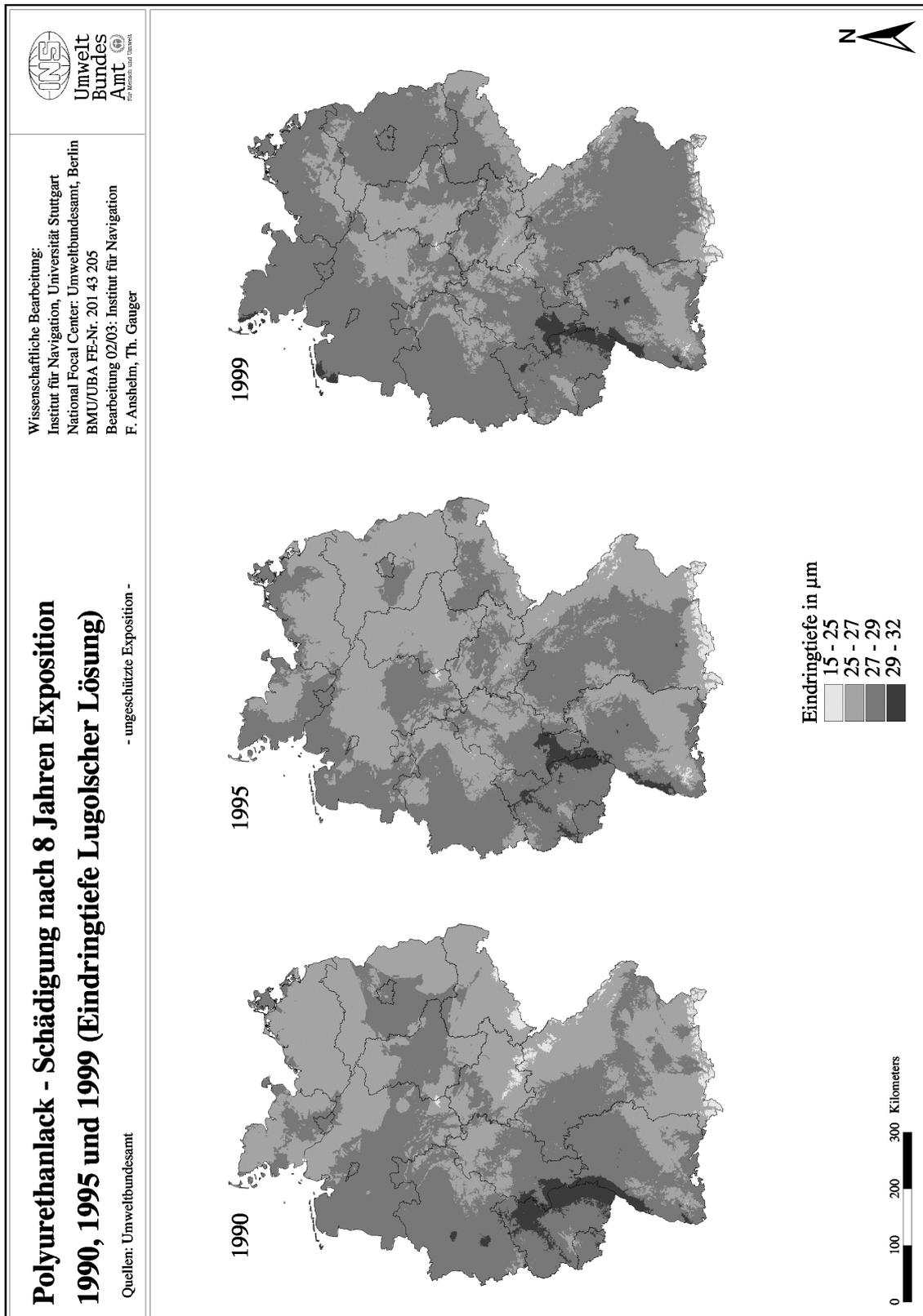
Karte 21: Alkyd-Anstrich auf Stahlplatten – Korrosion im 8.Jahr der Exposition 1990, 1995 und



Karte 22: Glas M1 – Korrosion im 8. Jahr der Exposition 1990, 1995 und 1999

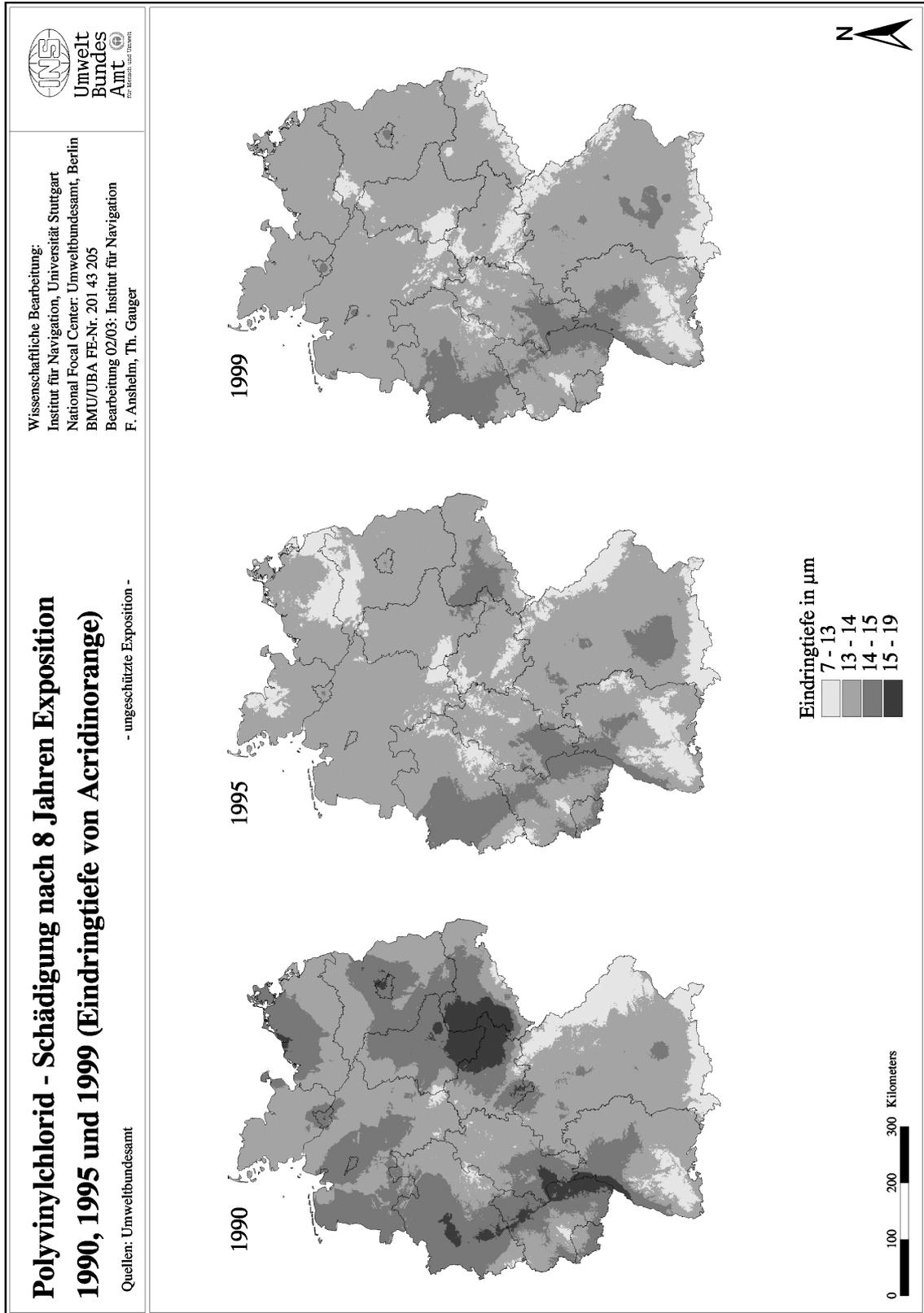


Karte 23: Glas M3 – Korrosion im 8.Jahr der Exposition 1990, 1995 und 1999



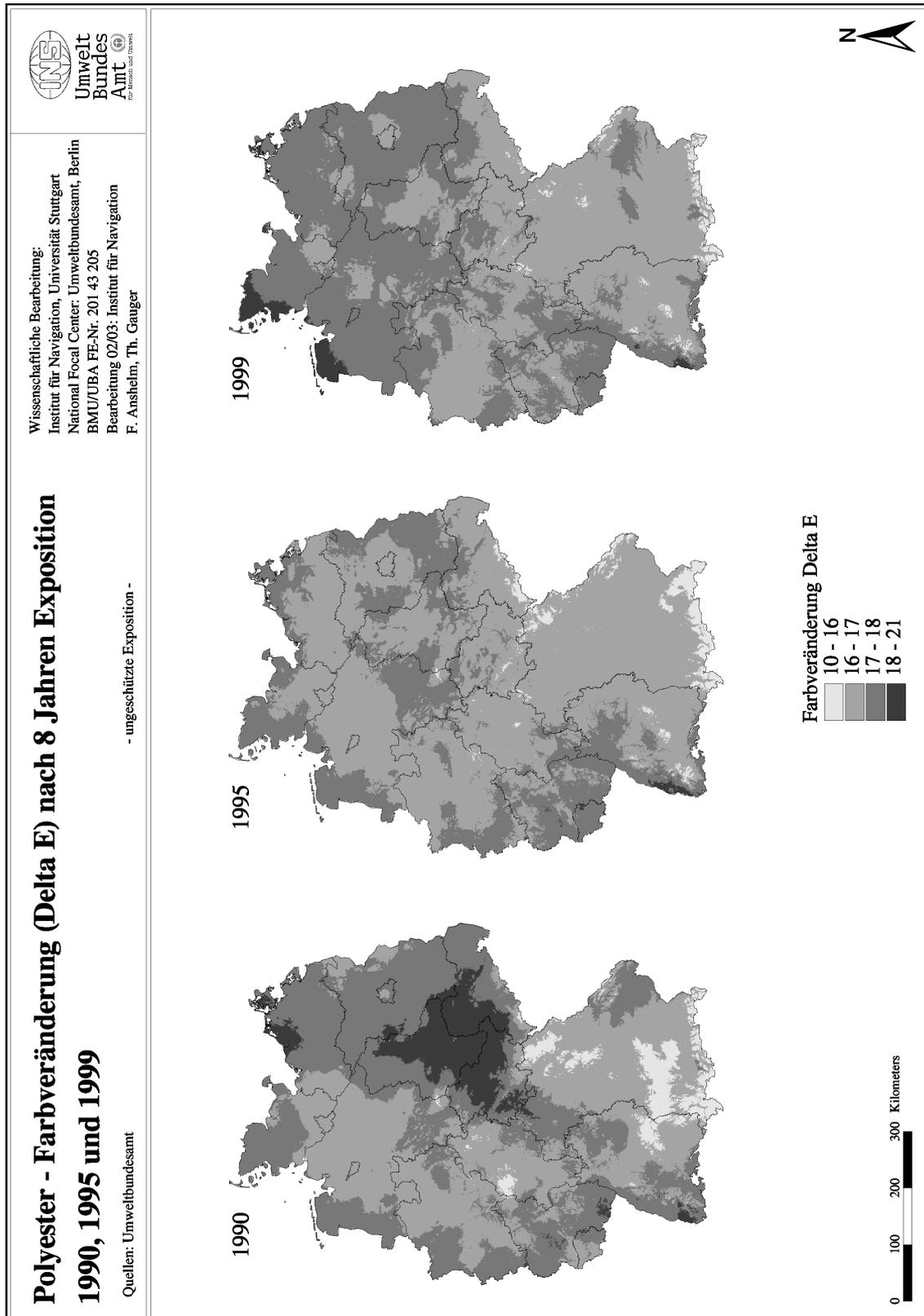
Karte 24: Polyurethanlack (PUR) – Tiefenschädigung nach 8 Jahren Exposition 1990, 1995 und

1999

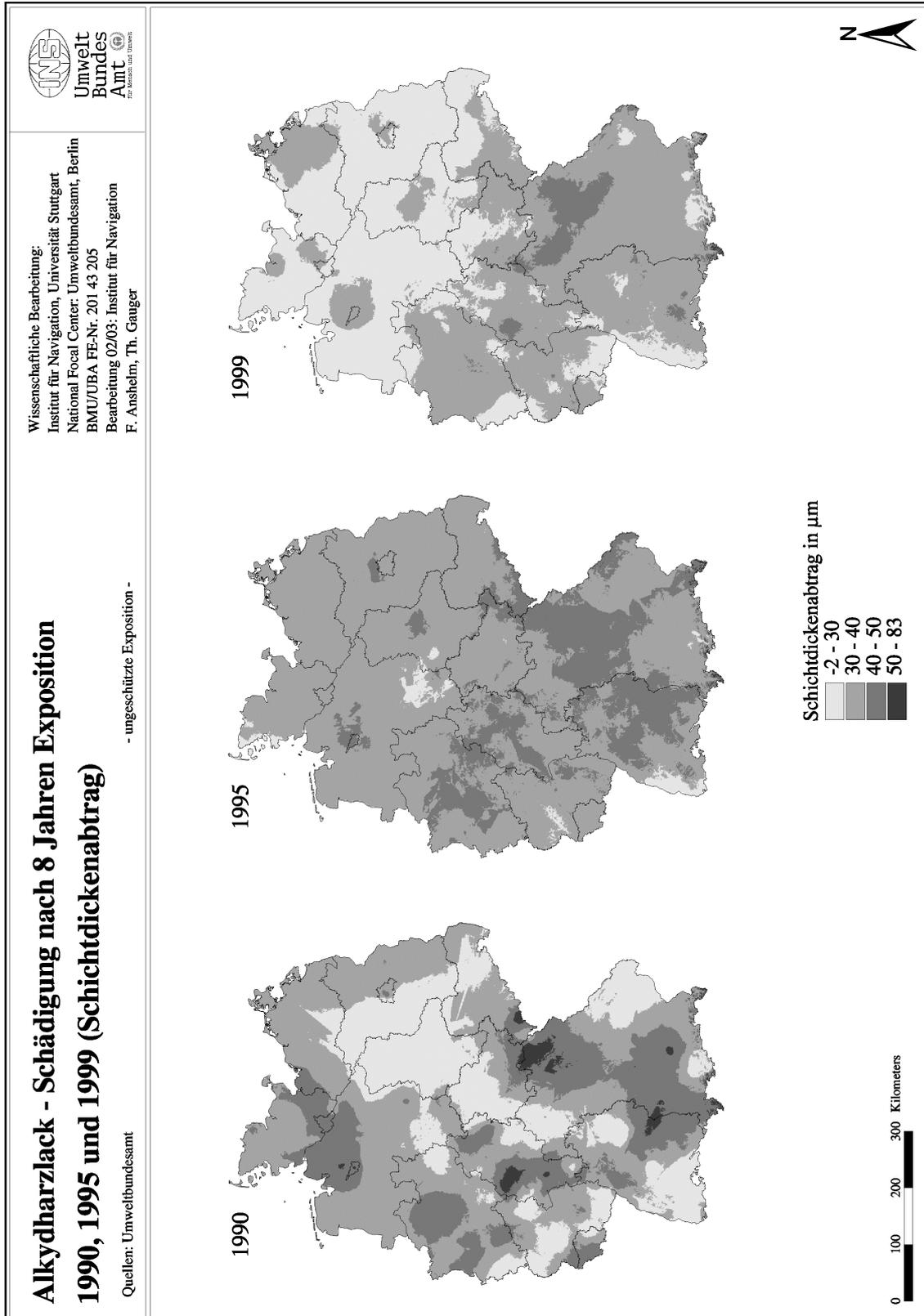


Karte 25: Polyvinylchlorid (PVC) – Tiefenschädigung nach 8 Jahren Exposition 1990, 1995 und

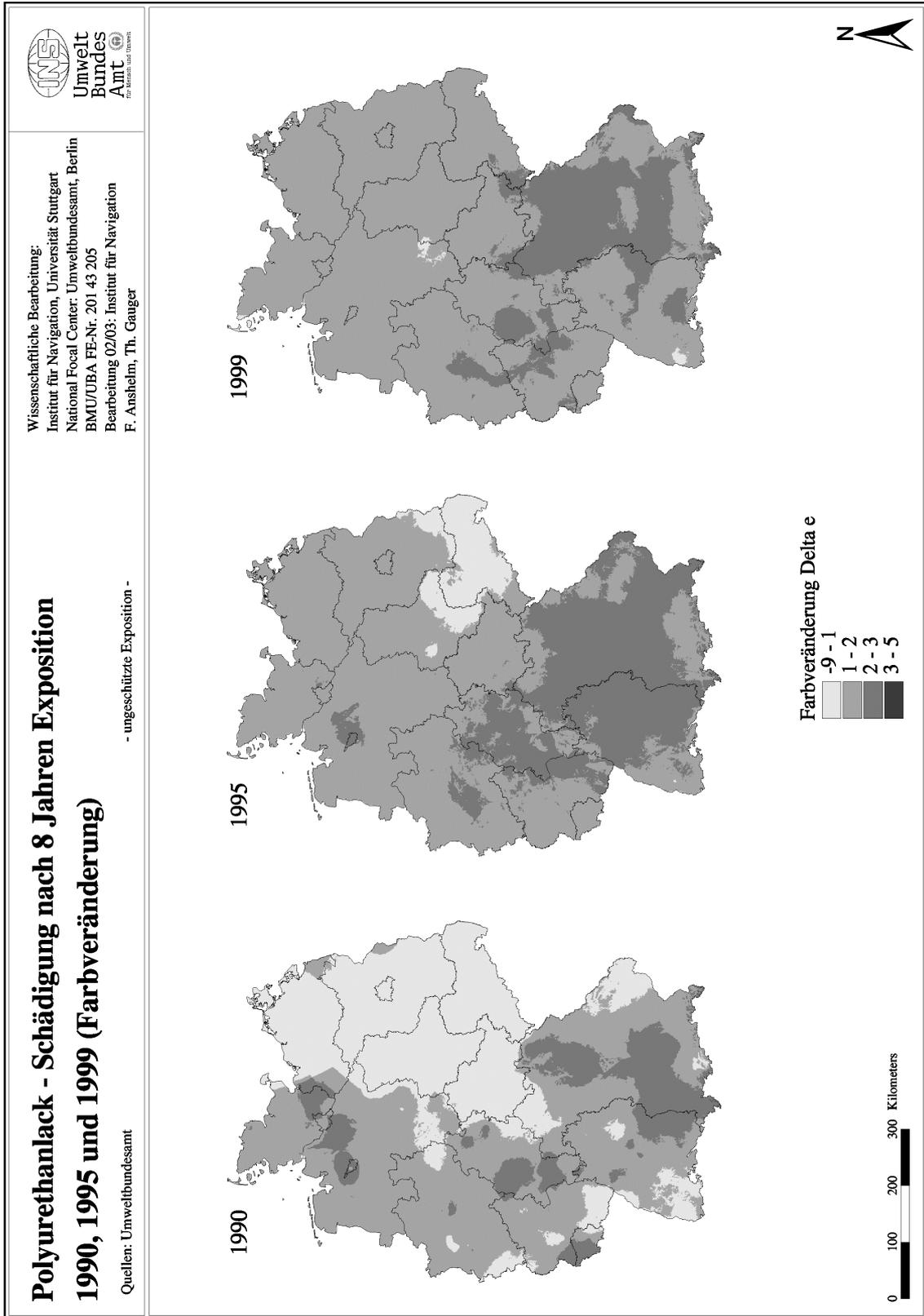
1999



Karte 26: Polyester (PES) – Farbveränderung nach 8 Jahren Exposition 1990, 1995 und 1999



Karte 27: Alkydharzlack – Schichtdickenabtrag nach 8 Jahren Exposition 1990, 1995 und 1999



Karte 28: Polyurethanlack (PUR) – Farbveränderung nach 8 Jahren Exposition 1990, 1995 und

2.3 Überschreitung akzeptabler Korrosionsraten

Die Kartierung der Überschreitung akzeptabler Korrosionsraten ist ein weiteres wesentliches Ziel dieses Forschungsvorhabens. Akzeptable Korrosionsraten kennzeichnen die Grenze zwischen der unter technischen und ökonomischen Gesichtspunkten gerade noch akzeptablen und der nicht mehr zu tolerierenden Schädigung eines Materials durch die Einflüsse von Klima und Luftverunreinigungen.

Akzeptable Korrosionsraten sind gemäß den Vorgaben des „Manual on methodologies and criteria for mapping Critical Levels/Loads and geographical areas where they are exceeded“ (UN ECE 1996) von den ICP Materials Hintergrundkorrosionsraten abzuleiten. Hintergrundkorrosionsraten kennzeichnen das Ausmaß der Korrosion an Materialien unter quasinatürlichen Bedingungen, das heißt unter Ausschluss anthropogener Einflüsse. Mit der Berücksichtigung der materialspezifischen Hintergrundkorrosionsraten soll der Tatsache Rechnung getragen werden, dass Korrosionsschäden selbst in Reinluftgebieten auftreten und die Korrosion mithin ein natürlicher, in der korrosiven Wirkung der Atmosphäre begründeter Vorgang ist.

Aus den Ergebnissen des von 1987 bis 1995 durchgeführten ICP Materials Expositionsversuchs konnten für sieben Materialien Hintergrundkorrosionsraten abgeleitet werden (Tabelle 5). Innerhalb des UN/ECE ICP Materials wurde beschlossen, das unterste 10-Perzentil aller im Zuge des Materialexpositionsprogramms beobachteten Korrosionsraten als Hintergrundkorrosionsrate (K_{10}) festzulegen. Seit Beginn der 90er Jahre haben sich die Korrosionsraten an ICP Materials-Standorten wesentlich verringert, und es ist heute in einigen Ländern der UN/ECE durchaus nicht ungewöhnlich, dass die Werte der aktuellen Korrosion unter den im Mapping Manual empfohlenen Werten für die Hintergrundkorrosionsraten liegen. Die von ICP Materials empfohlenen Hintergrundkorrosionsraten wurden dieser veränderten Situation angepasst. In der Neufassung von Kapitel 4 - „Mapping of Effects on Materials“ - des UN/ECE Kartierungshandbuchs (UN/ECE 2003) werden die Hintergrundkorrosionsraten für einjährige Exposition angegeben (Tabelle 5). Empfehlungen für Hintergrundkorrosionsraten gibt es nach wie vor nur für die Materialien verwitterungsbeständiger Stahl, Zink, Aluminium, Kupfer, Bronze, Portland Kalkstein und Mansfield Sandstein. Für die beiden Gläser M1 und M3 sowie die Anstrichsysteme Alkyd auf Stahlplatten und Alkyd-Melamin auf verzinktem Stahlblech gibt es keine Empfehlungen für Hintergrundkorrosionsraten seitens des ICP Materials, da die Expositionsversuche mit diesen Materialien später begannen und die Expositionsdauer für die Ableitung von Hintergrundkorrosionsraten aus Versuchsergebnissen nicht ausreichend lang war. Auch für die Schä-

den an Polymeren gibt es keine Werte für Hintergrundkorrosionsraten. Die Ableitung der Hintergrundkorrosionsraten aus Resultaten von ICP Materials Expositionsversuchen ist in einem Positionspapier des Swedish Corrosion Institutes ausführlich beschrieben (unveröffentlicht; freundliche schriftliche Mitteilung Johan Tidblad und Vladimir Kucera).

Tab. 5: ICP Materials Hintergrundkorrosionsraten für einjährige Exposition

Hintergrundkorrosionsraten für einjährige Exposition	
Verwitterungsbeständiger Stahl	72*
Zink	3,3*
Aluminium	0,09*
Kupfer	3*
Bronze	2,1*
Portland Kalkstein	3,2**
Mansfield Sandstein	2,8**

* Massenverlust in g/m²

** Oberflächenrückweichung in µm

Ausgehend von den Hintergrundkorrosionsraten können sogenannte akzeptable Korrosionsraten abgeleitet werden. Sie sind als Vielfache der Hintergrundkorrosionsraten ($K_{acc} = K_{10} \cdot n$) definiert und dienen der Kennzeichnung der Grenze zwischen der unter technischen und ökonomischen Gesichtspunkten gerade noch akzeptablen und der nicht mehr zu tolerierenden Schädigung eines Materials durch die Einflüsse von Klima und Luftverunreinigungen. In der Neufassung des UN/ECE Kartierungshandbuchs (UN/ECE 2003) werden für n die Werte 1.5, 2.0 und 2.5 vorgeschlagen. Darüber hinaus wird betont, dass in Gebieten mit erhaltenswertem kulturellem Erbe auch möglich ist, für n Werte kleiner 1.5 zu wählen.

Für die Materialien, für die es ICP Materials Hintergrundkorrosionsraten gibt, besteht die Möglichkeit, Hintergrundkorrosionsraten und akzeptable Korrosionsraten mit Resultaten der Kartierung der Materialschäden in Deutschland zu vergleichen. Auf diese Weise können Gebiete identifiziert werden, in welchen die Wirkung von Klima und Luftschadstoffen zu einer Schädigung von an Kunst- und Bauwerken verwendeten Materialien führt, die unter technischen und ökonomischen Gesichtspunkten nicht akzeptabel ist. Anhand der Kartierungsergebnisse wird erörtert, wie sich die Schadenssituation in Deutschland im Laufe der 90er Jahre entwickelt hat und wie sich die Entscheidung für eine strenge oder weniger strenge akzeptable Korrosionsrate ($n = 1.5$, $n = 2$ oder $n = 2.5$) in der Fläche auswirkt.

Für die Kartierung der Überschreitung akzeptabler Korrosionsraten wurden Karten der aktuellen Korrosion für das erste Jahr der Exposition berechnet und diese mit den akzeptablen Korrosionsraten verglichen. Die Ergebnisse der Kartierung der Überschreitung akzeptabler Korrosionsraten sind in den Karten 29 bis 35 dargestellt. Anhand der Tabellen 6 und 7 werden die Kartierungsergebnisse näher beschrieben. Als Kriterium für den Vergleich der Daten dient zum einen die Höhe der Überschreitungen in % (Tabelle 6), zum anderen der Flächenanteil der Gebiete mit Überschreitung an der Gesamtfläche Deutschlands (Tabelle 7).

Die ICP Materials Hintergrundkorrosionsraten der Materialien verwitterungsbeständiger Stahl, Zink, Aluminium, Kupfer, Bronze, Portland Kalkstein und Mansfield Sandstein werden von der aktuellen Korrosion (einjährige Expositionsdauer!!) in den Jahren 1990 und 1999 deutschlandweit überschritten. Vergleicht man die aktuelle Korrosion der Jahre 1990 und 1999 mit den akzeptablen Korrosionsraten ($n = 1.5$, $n = 2$, $n = 2.5$) so sind, je nach Höhe der gewählten akzeptablen Korrosionsrate unterschiedlich große Gebiete ohne Überschreitung des jeweils gewählten Kriteriums feststellbar. Bei allen Materialien ist bei Vergleich der Ergebnisse für 1990 und 1999 eine Verbesserung der Situation erkennbar. Die Höhe der Überschreitung der akzeptablen Korrosionsraten ist zwischen 1990 und 1999 zurückgegangen. Im Folgenden sind die Ergebnisse für die einzelnen Materialien näher erläutert.

Tab. 6: Prozentuale Überschreitung der ICP Materials Hintergrundkorrosionsraten und der daraus abgeleiteten akzeptablen Korrosionsraten 1990 und 1999

Prozentuale Überschreitung der Hintergrundkorrosionsraten bzw. akzeptablen Korrosionsraten 1990 und 1999					
Exponiertes Material	Bezugsjahr	Faktor ¹	Minimum	Mittelwert	Maximum
Verwitterungsbeständiger Stahl	1990	n = 0	59,6	493,1	1154,6
		n = 1.5	6,4	295,4	736,4
		n = 2	-20,2	196,5	527,3
		n = 2.5	-36,2	137,2	401,9
	1999	n = 0	83,6	277,4	412,7
		n = 1.5	22,4	151,6	241,8
		n = 2	-8,2	88,7	156,3
		n = 2.5	-26,6	50,9	105,1
Zink	1990	n = 0	59,5	240,2	450,1
		n = 1.5	6,4	126,8	266,7
		n = 2	-20,2	70,1	175,0
		n = 2.5	-36,2	36,1	120,0
	1999	n = 0	29,9	150,8	225,3
		n = 1.5	-13,4	67,2	116,9
		n = 2	-35,0	25,4	62,7
		n = 2.5	-48,0	0,3	30,1
Aluminium	1990	n = 0	137,7	295,9	620,5
		n = 1.5	58,5	163,9	380,4
		n = 2	18,9	97,9	260,3
		n = 2.5	-4,9	58,4	188,2
	1999	n = 0	99,2	186,4	455,9
		n = 1.5	32,8	91,0	270,6
		n = 2	-0,4	43,2	177,9
		n = 2.5	-20,3	14,6	122,3
Kupfer	1990	n = 0	54,1	270,6	666,8
		n = 1.5	2,7	147,0	411,2
		n = 2	-23,0	85,3	283,4
		n = 2.5	-38,4	48,2	206,7
	1999	n = 0	34,0	149,9	263,5
		n = 1.5	-10,6	66,6	142,3
		n = 2	-33,0	25,0	81,7
		n = 2.5	-46,4	0,0	45,4
Bronze	1990	n = 0	93,2	313,9	907,6
		n = 1.5	28,8	175,9	571,7
		n = 2	-3,4	106,9	403,8
		n = 2.5	-22,7	65,5	303,0
	1999	n = 0	25,1	121,3	333,4
		n = 1.5	-16,6	47,6	189,0
		n = 2	-37,5	10,7	116,7
		n = 2.5	-50,0	-11,5	73,4
Portland Kalkstein	1990	n = 0	43,8	241,4	860,8
		n = 1.5	-4,1	127,6	540,6
		n = 2	-28,1	70,7	380,4
		n = 2.5	-42,5	36,6	284,3
	1999	n = 0	26,4	64,9	130,4
		n = 1.5	-15,7	9,9	53,6
		n = 2	-36,8	-17,6	15,2
		n = 2.5	-49,4	-34,0	-7,8
Mansfield Sandstein	1990	n = 0	56,7	298,7	1116,8
		n = 1.5	4,5	165,8	711,2
		n = 2	-21,7	99,3	508,4
		n = 2.5	-37,3	59,5	386,7
	1999	n = 0	34,7	80,7	166,5
		n = 1.5	-10,2	20,5	77,7
		n = 2	-32,6	-9,6	33,3
		n = 2.5	-46,1	-27,7	6,6

¹ICP Materials Hintergrundkorrosionsrate: n = 0; akzeptable Korrosionsraten: n = 1.5, 2, 2.5

Tab. 7: Prozentuale Flächenanteile einzelner Klassen der Überschreitung an der Gesamtfläche der Bundesrepublik Deutschland 1990 und 1999

Prozentuale Flächenanteile einzelner Überschreitungsklassen an der Gesamtfläche 1990 und 1999						
Exponiertes Material	Bezugsjahr	Faktor ¹	keine	1-100	101-200	201-max
Verwitterungsbeständiger Stahl	1990	n = 0	-	-	0,4	99,6
		n = 1.5	-	0,4	11,9	87,7
		n = 2	-	4	62,1	33,9
		n = 2.5	0,1	31,5	50,4	18
	1999	n = 0	-	-	0,5	99,5
		n = 1.5	-	0,5	98,3	1,3
		n = 2	-	77,8	22,2	-
		n = 2.5	0,1	99,9	-	-
Zink	1990	n = 0	-	0,1	23,3	76,6
		n = 1.5	-	23,7	72,1	4,3
		n = 2	0,1	84,8	15,2	-
		n = 2.5	1,5	97,9	0,6	-
	1999	n = 0	-	0,2	99,3	0,4
		n = 1.5	-	99,6	0,4	-
		n = 2	0,3	99,7	-	-
		n = 2.5	53,8	46,2	-	-
Aluminium	1990	n = 0	-	-	3,7	96,3
		n = 1.5	-	3,8	73,6	22,6
		n = 2	-	59,5	39,8	0,7
		n = 2.5	-	90,6	9,3	-
	1999	n = 0	-	-	82,4	17,6
		n = 1.5	-	82,6	16,4	1
		n = 2	-	98	2	-
		n = 2.5	0,8	98,8	0,3	-
Kupfer	1990	n = 0	-	0,5	29,1	70,4
		n = 1.5	-	29,7	47,3	23
		n = 2	0,5	69,3	26,7	3,5
		n = 2.5	8,5	75,4	16,1	-
	1999	n = 0	-	1,2	94,6	4,2
		n = 1.5	-	95,9	4,1	-
		n = 2	1,3	98,7	-	-
		n = 2.5	55,2	44,8	-	-
Bronze	1990	n = 0	-	-	15,9	84,1
		n = 1.5	-	16	52,4	31,6
		n = 2	-	57,7	33,6	8,7
		n = 2.5	1,8	76,8	19,4	2
	1999	n = 0	-	31,9	65,5	2,6
		n = 1.5	-	97,4	2,6	-
		n = 2	32,7	67,1	0,2	-
		n = 2.5	82,3	17,7	-	-
Portland Kalkstein	1990	n = 0	-	3,1	52,9	43,9
		n = 1.5	-	56,2	24,4	19,4
		n = 2	3,3	71,8	19,2	5,7
		n = 2.5	24,2	62	12	1,8
	1999	n = 0	-	96,4	3,6	-
		n = 1.5	21,9	78,1	-	-
		n = 2	96,6	3,4	-	-
		n = 2.5	100	-	-	-
Mansfield Sandstein	1990	n = 0	-	0,3	31,3	68,5
		n = 1.5	-	31,6	41,8	26,6
		n = 2	0,3	67,7	18,5	13,5
		n = 2.5	8,4	69,3	17,6	4,7
	1999	n = 0	-	83,7	16,3	-
		n = 1.5	5,8	94,2	-	-
		n = 2	84,1	15,9	-	-
		n = 2.5	99,8	0,2	-	-

¹ICP Materials Hintergrundkorrosionsrate: n = 0; akzeptable Korrosionsraten: n = 1,5, 2, 2,5

2.3.1 Verwitterungsbeständiger Stahl

Bei der Korrosion verwitterungsbeständigen Stahls treten im Vergleich zu den anderen Materialien verhältnismäßig hohe Überschreitungen der akzeptablen Korrosionsraten auf. Der Flächenanteil der Gebiete mit sehr hoher Überschreitung akzeptabler Korrosionsraten ($> 200\%$ Überschreitung) ist relativ hoch (Karte 29). Zwischen 1990 und 1999 ist eine deutliche Verbesserung der Situation erkennbar.

Die ICP Materials Hintergrundkorrosionsrate für einjährige Exposition liegt bei einem Massenverlust von 72 g/m^2 (Tabelle 5). Dieser Wert wird sowohl 1990 als auch 1999 flächendeckend überschritten. Im Expositionsjahr 1990 wird ein Maximalwert der Überschreitung von 1155% erreicht. Das Gebietsmittel der Überschreitung der Hintergrundkorrosionsrate liegt 1990 bei 493% , 1999 bei „nur noch“ 240% (Tabelle 6).

Stellt man die Kartierungsergebnisse der Korrosion nach einjähriger Exposition den Werten der akzeptablen Korrosionsraten gegenüber, so zeigt sich, dass die aktuelle Korrosion verwitterungsbeständigen Stahls selbst in 1999 und bei Anwendung des lockersten Kriteriums (akzeptable Korrosionsrate = $2,5 \cdot$ Hintergrundkorrosionsrate) zu hohen und großflächigen Überschreitungen führt. Nur auf $0,1\%$ der Fläche Deutschlands wird die akzeptable Korrosionsrate ($n = 2,5$) nicht überschritten. Die strengeren akzeptablen Korrosionsraten ($n = 1,5$ und $n = 2$) werden auch in 1999 noch flächendeckend überschritten. Zwischen 1990 und 1999 ist zwar eine Verbesserung eingetreten, die Werte bewegen sich aber immer noch auf sehr hohem Niveau.

Im Kartenbild (Karte 29) wird der räumliche Effekt der Wahl unterschiedlich hoher akzeptabler Korrosionsraten deutlich. Bei Wahl eines strengeren oder weniger strengeren Kriteriums kann es zu beträchtlichen Verschiebungen kommen. Besonders deutlich wird dies bei Betrachtung der Kartierungsergebnisse des Jahres 1990. Wählt man $n = 1,5$ zur Berechnung der akzeptablen Korrosionsrate, so nimmt die Klasse der sehr hohen Überschreitung ($> 200\%$) $87,7\%$ der Fläche Deutschlands ein. Entscheidet man sich für $n = 2$, so beträgt der Flächenanteil der Klasse mit sehr hoher Überschreitung nur noch $33,9\%$ der Fläche Deutschlands. Bei $n = 2,5$ schließlich weisen nur noch 18% der Fläche Deutschlands eine Überschreitung $> 200\%$ auf (Tabelle 7).

Beim Vergleich der Kartierungsergebnisse für 1990 und 1999 wird auch deutlich, dass sich die räumlichen Muster der Gebiete mit hohen Überschreitungen verändert haben. Während in 1990 die höchsten Überschreitungen in den neuen Bundesländern anzutreffen waren, liegen sie in

1999 im Saarland beziehungsweise in Niedersachsen. Diese Veränderung hängt mit dem starken Rückgang der SO₂-Immission in den 90er Jahren zusammen. Dieser Rückgang war in den neuen Bundesländer überproportional stark. Gebiete höchster Überschreitung akzeptabler Korrosionsraten sind 1999 nicht mehr zwingend an die Gebiete höchster SO₂-Immission gebunden. Der Einfluss anderer Parameter ist dadurch stärker geworden. Räumliche Muster der Eingangsdaten anderer Parameter (relative Feuchte, Temperatur) können sichtbar werden.

2.3.2 Zink

Die ICP Materials Hintergrundkorrosionsrate für Zink liegt bei 3,3 g/m² (Massenverlust, einjährige Exposition). Auch bei diesem Material wird die Hintergrundkorrosionsrate sowohl 1990 als auch 1999 flächendeckend überschritten (Karte 30). Das Gebietsmittel der Überschreitung der Hintergrundkorrosionsrate liegt 1990 bei 240 %, 1999 bei 150 % (Tabelle 6). Im Maximum treten Überschreitungen der Hintergrundkorrosionsrate von bis zu 450 % (1990) bzw. 225 % (1999) auf.

Stellt man die Kartierungsergebnisse der Korrosion nach einjähriger Expositionsdauer den akzeptablen Korrosionsraten gegenüber so zeigt sich, dass es bei Zink im Gegensatz zu verwitterungsbeständigem Stahl auch Bereiche gibt, in denen akzeptable Korrosionsraten nicht überschritten werden. Die strengste akzeptable Korrosionsrate ($n = 1,5$) wird 1990 und 1999 flächendeckend überschritten. Wählt man die mittlere akzeptable Korrosionsrate ($n = 2$), so treten im Alpenraum kleinere Gebiete auf, in denen die akzeptable Korrosionsrate nicht überschritten wird. Bei einer Entscheidung zugunsten von $n = 2,5$ schließlich wächst der Flächenanteil des Gebiets ohne Überschreitung der akzeptablen Korrosionsrate in 1999 auf 53,8 % an. Ein Vergleich mit dem entsprechenden Wert für das Jahr 1990 zeigt das Ausmaß der Verbesserung, denn in 1990 lag der Flächenanteil des Gebiets ohne Überschreitung der akzeptablen Korrosionsrate ($n = 2,5$) noch bei nur 1,5 % (Tabelle 7).

1990 hatten die Gebiete höchster Überschreitungen fast ausnahmslos auf dem Gebiet der neuen Bundesländer gelegen. Im Laufe der 90er Jahre hat sich die Situation in den neuen Bundesländern dramatisch verbessert, sodass 1999 - trotz einer großflächig ebenfalls rückläufigen Tendenz in den alten Bundesländern - die Situation in den alten Bundesländern nicht mehr schlechter ist als in den neuen Bundesländern.

2.3.3 Aluminium

Die Hintergrundkorrosionsrate für Aluminium beträgt $0,09 \text{ g/m}^2$ (Massenverlust, einjährige Exposition). Diese wird in den Jahren 1990 und 1999 flächendeckend überschritten (Tabelle 7). Die Überschreitung erreicht in 1990 lokal Werte von bis zu 621 % und liegt im Gebietsmittel bei 296 % (Tabelle 6). In 1999 wird im Gebietsmittel immer noch eine Überschreitung von 186 % erreicht. Höchste Überschreitungen treten hierbei im Nordwesten Deutschlands auf, was auf den Einfluss der Chloridfracht des Niederschlags zurückzuführen ist.

Die Karten der Überschreitung der akzeptablen Korrosionsraten für das Jahr 1990 unterscheiden sich nicht nur in der Höhe der festgestellten Überschreitungen sondern auch in den räumlichen Mustern der Gebiete mit Überschreitungen von den Karten für das Jahr 1999 (Karte 31). Während in 1990 sowohl an der Nordseeküste (Chloride) als auch auf dem Gebiet der neuen Bundesländer (SO_2) hohe Überschreitungen auftraten, treten in 1999 nur noch die Gebiete entlang der Nordseeküste im Kartenbild hervor. Die Verringerung der SO_2 -Immission in den 90er Jahren hat dazu geführt, dass ehemalige Hochgebiete in der Fläche „untergehen“. Selbst bei der Wahl des am wenigsten strengsten Kriteriums ($n = 2,5$) zur Berechnung der akzeptablen Korrosionsrate ist in 1999 auf 99,2 % der Fläche eine Überschreitung der akzeptablen Rate festzuhalten (Tabelle 7). Ganz im Norden Deutschlands werden nach wie vor Werte der Überschreitung der akzeptablen Korrosionsrate ($n = 2,5$) von mehr als 100 % erreicht. Im Vergleich zu Zink ist die Situation bezüglich der Schäden an Aluminium deutlich schlechter.

2.3.4 Kupfer

Die Hintergrundkorrosionsrate für Kupfer beträgt 3 g/m^2 (Massenverlust, einjährige Exposition). Diese wird in den Jahren 1990 und 1999 flächendeckend überschritten (Tabelle 7). Im Gebietsmittel liegt die Überschreitung in 1990 bei 271 %, in 1999 bei 149,9 % (Tabelle 6). Zu Beginn der 90er Jahre wird die Hintergrundkorrosionsrate in den neuen Bundesländern großräumig um mehr als 300 % überschritten. Jedoch auch in den alten Bundesländern gibt es Bereiche, in denen Überschreitungen in dieser Größenordnung auftreten. Zum Ende der 90er Jahre treten keine Überschreitungen größer 300 % mehr auf. Bundesweit liegt die Überschreitung der Hintergrundkorrosionsrate zwischen 100 und 200 %. Nur regional treten noch Überschreitungen größer 20 % auf. Dies nun vor allem in einigen der alten Bundesländer. Obwohl sich die Spitzenwerte der Überschreitungen stark verringert haben, hat sich die Fläche der Gebiete mit Überschreitungen unter 100 % kaum vergrößert (Tabelle 7). Eine Verbesserung auf allerdings hohem Niveau.

Stellt man die Kartierungsergebnisse der aktuellen Korrosion nach einjähriger Exposition den Werten der akzeptablen Korrosionsraten gegenüber, so zeigt sich, dass die akzeptable Korrosionsrate erst bei der Wahl eines weniger strengen Kriteriums ($n = 2$, $n = 2,5$) auf größeren Flächen nicht mehr überschritten wird (Karte 32, Tabelle 7). In 1999 erreicht der Flächenanteil der Gebiete ohne Überschreitung der akzeptablen Korrosionsrate ($n = 2,5$) immerhin 55,2 %. Legt man einen etwas strengeren Maßstab an ($n = 2$), so sinkt der Flächenanteil der Gebiet ohne Überschreitung der akzeptablen Korrosionsrate bereits auf nur noch 0,5 %. Auch bei der Schädigung von Kupfer tritt die bereits mehrfach angesprochene Veränderung bezüglich der räumlichen Verteilung der Gebiete mit hohen Überschreitungen akzeptabler Korrosionsraten auf. 1990 sind die Gebiete mit sehr hohen Überschreitungen akzeptabler Korrosionsarten nahezu ausschließlich auf das Gebiet der neuen Bundesländer (SO_2) beschränkt. 1999 liegen die Maxima in niederschlagsreichen Gebieten (Schwarzwald, Nordseeküste) oder aber im Saarland, wo nach dem Rückgang der SO_2 -Immission in den neuen Bundesländern nun relativ (!) hohe SO_2 -Konzentrationen auftreten.

2.3.5 Bronze

Die Hintergrundkorrosionsrate für Bronze beträgt $2,1 \text{ g/m}^2$ (Massenverlust, einjährige Exposition). Diese wird in den Jahren 1990 und 1999 flächendeckend überschritten (Tabelle 7). Das Gebietsmittel der Überschreitung der Hintergrundkorrosionsrate liegt in 1990 bei 313,9 %, in 1999 bei 121,3 % (Tabelle 6). Wie bei verwitterungsbeständigem Stahl treten in 1990 die Maximalwerte der Überschreitung sowohl in Gebieten hoher SO_2 -Konzentration wie auch entlang der Nordseeküste (Chloride) auf. In 1999 hingegen bleiben Überschreitungen größer 300 % auf küstennahe Gebiete beschränkt (Chloride). Die Verringerung der SO_2 -Konzentration der Luft hat vor allem in den neuen Bundesländern, aber auch in Nordrhein-Westfalen und anderen Teilen der alten Bundesländer zu einer markanten Verringerung der Überschreitung der Hintergrundkorrosionsrate für Bronze geführt.

Stellt man die Kartierungsergebnisse der aktuellen Korrosion nach einjähriger Exposition den Werten der akzeptablen Korrosionsraten gegenüber, so zeigt sich, dass sich die Situation bei Bronze im Vergleich zu Kupfer etwas günstiger darstellt (Karte 33). Bei Verwendung der mit $n = 2$ berechneten akzeptablen Korrosionsrate kann in 1999 bereits für knapp ein Drittel der Fläche Deutschlands eine Unterschreitung der akzeptablen Korrosionsrate konstatiert werden (Tabelle x). Dieser Flächenanteil steigt auf 82,3 %, wenn man $n = 2,5$ für die Berechnung der ak-

zeptablen Korrosionsrate verwendet. Die strengste akzeptable Korrosionsrate ($n = 1,5$) wird auch in 1999 noch flächendeckend überschritten.

2.3.6 Portland Kalkstein

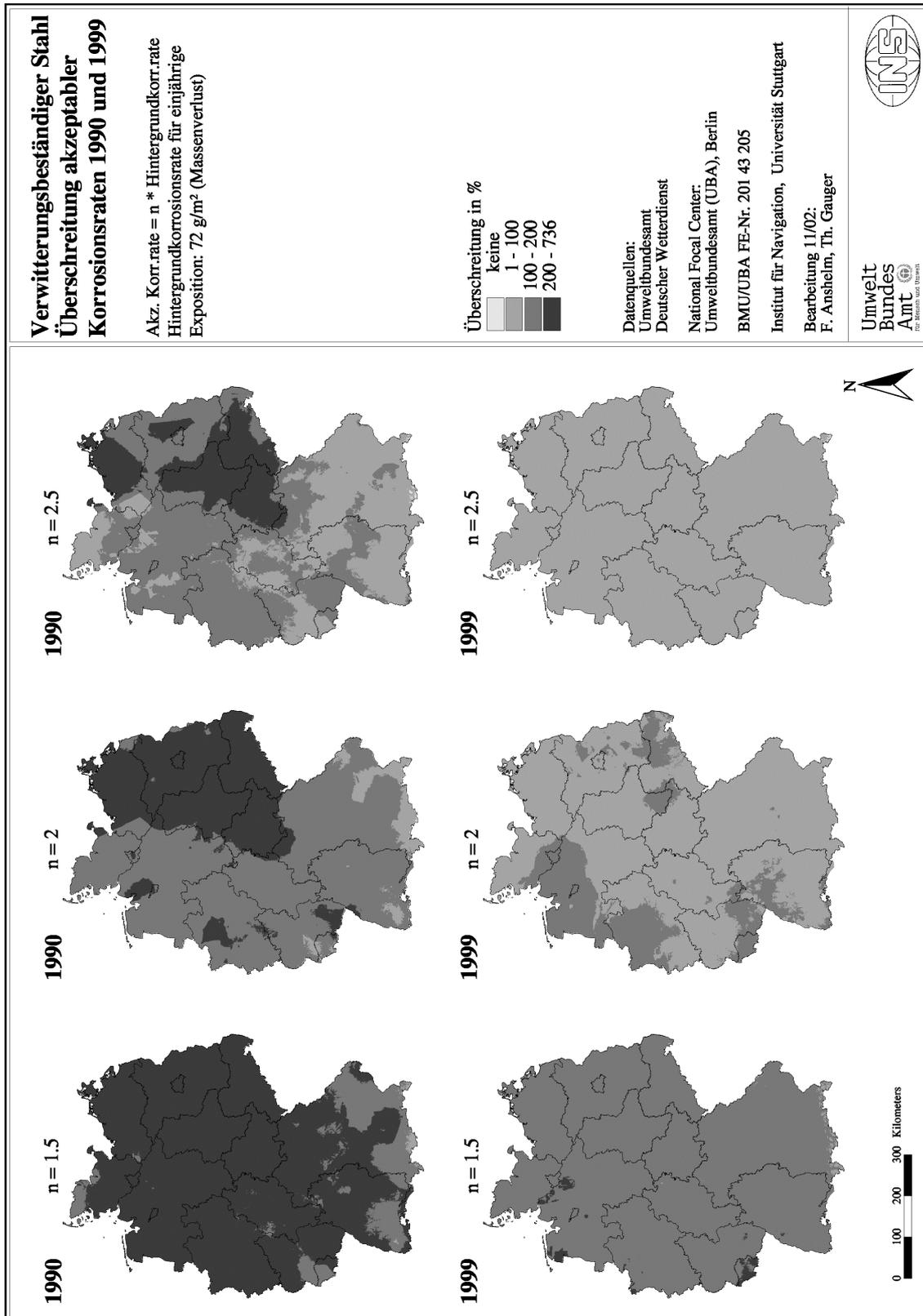
Die Hintergrundkorrosionsrate für Portland Kalkstein beträgt $3,2 \mu\text{m}$ (Oberflächenrückweichung, einjährige Exposition). Diese wird in den Jahren 1990 und 1999 flächendeckend überschritten (Tabelle 7). Im Vergleich zu den Metallen und Legierungen sieht die Situation bei den Natursteinen deutlich besser aus. Überschreitungen der Hintergrundkorrosionsrate um mehr als 130,4 % treten bei Portland Kalkstein in 1999 nicht mehr auf (Tabelle 6). 1990 gab es noch Gebiete mit Überschreitungen von mehr als 800 %. Der Rückgang der SO_2 -Konzentration hat zu erheblich geringeren Schäden an Kalksteinen geführt. In 1990 waren die Gebiete mit Überschreitungen von mehr als 300 % fast ausschließlich auf die neuen Bundesländer beschränkt. 1999 gibt es nirgendwo in Deutschland Gebiete mit Überschreitung der Hintergrundkorrosionsrate von mehr als 130,4 %.

Die Überschreitung akzeptabler Korrosionsraten fällt entsprechend gering aus (Karte 34, Tabelle 6). In 1999 wird selbst die strengste akzeptable Korrosionsrate ($n = 1,5$) nur noch um maximal 53,6 % überschritten. Bereits bei der Wahl der mittleren akzeptablen Korrosionsrate ($n = 2$) steigt der Flächenanteil der Gebiete ohne Überschreitung auf 96,6 % (Tabelle 7). Das am wenigsten strenge Kriterium – $n = 2,5$ – wird in 1999 in Deutschland nicht überschritten. 1990 wurde dieses Kriterium noch auf circa einem Viertel der Fläche Deutschlands überschritten. Die Überschreitungen erreichten dabei noch Werte von bis zu 284 %.

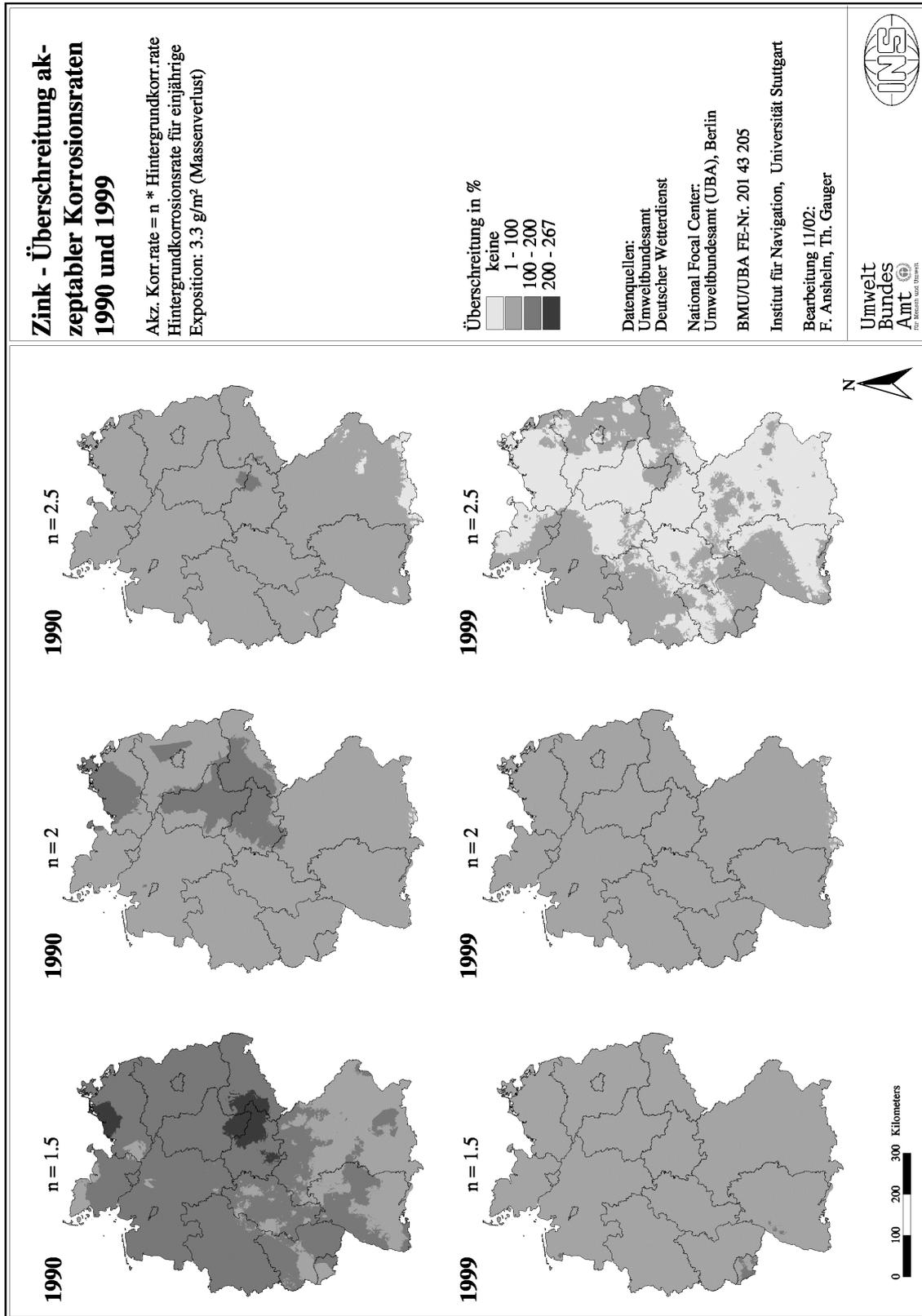
2.3.7 Mansfield Sandstein

Ähnlich günstig sieht das Bild bei Mansfield Sandstein aus. Zwar wird auch hier die Hintergrundkorrosionsrate nach einjähriger Expositionsdauer ($2,8 \mu\text{m}$ Oberflächenrückweichung) sowohl 1990 als auch 1999 flächendeckend überschritten (Tabelle 7). In 1990 treten dabei noch extrem hohe Überschreitungen (bis zu 1117 %) der Hintergrundkorrosionsrate auf (Tabelle 6). Aber 1999 hat sich die Situation stark verbessert. Ursache hierfür ist die starke Bindung der Schäden an Natursteinen an die SO_2 -Konzentration der Luft. Der starke Rückgang der SO_2 -Immission im Laufe der 90er Jahre hat zu einer erfreulichen Verbesserung bezüglich der Korrosion von Sandsteinen geführt. Der Wert für Hintergrundbedingungen wird in Deutschland zwar nach wie vor flächendeckend überschritten, aber bei Betrachtung der Karten der Überschreitung akzeptabler Korrosionsraten wird deutlich, dass sich hier einiges getan hat (Karte 35). Bei Ent-

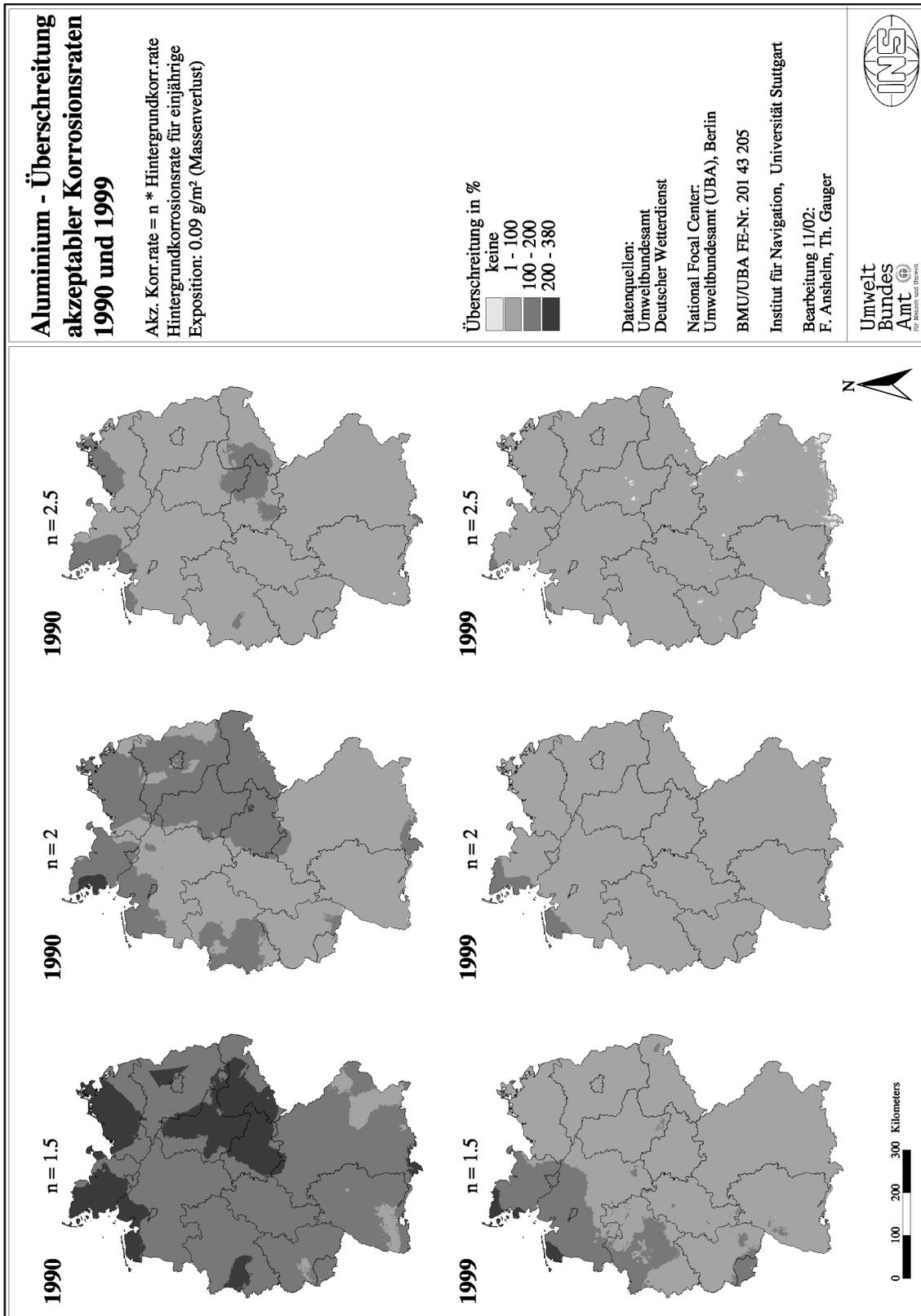
scheidung für eine mittlere akzeptable Korrosionsrate ($n = 2$) steigt der Flächenanteil der Gebiete ohne Überschreitung der akzeptablen Korrosionsrate bereits auf 84,1 % (Tabelle 7). Selbst bei einer Entscheidung für das weniger strenge Kriterium $n = 1,5$ tritt im Norden Deutschland ein größeres zusammenhängendes Gebiet auf, in welchem die akzeptable Korrosionsrate nicht überschritten wird. Überschreitungen akzeptabler Korrosionsraten von mehr als 100 % treten 1999 nicht mehr auf.



Karte 29: Verwitterungsbeständiger Stahl – Überschreitung akzeptabler Korrosionsraten 1990 und 1999



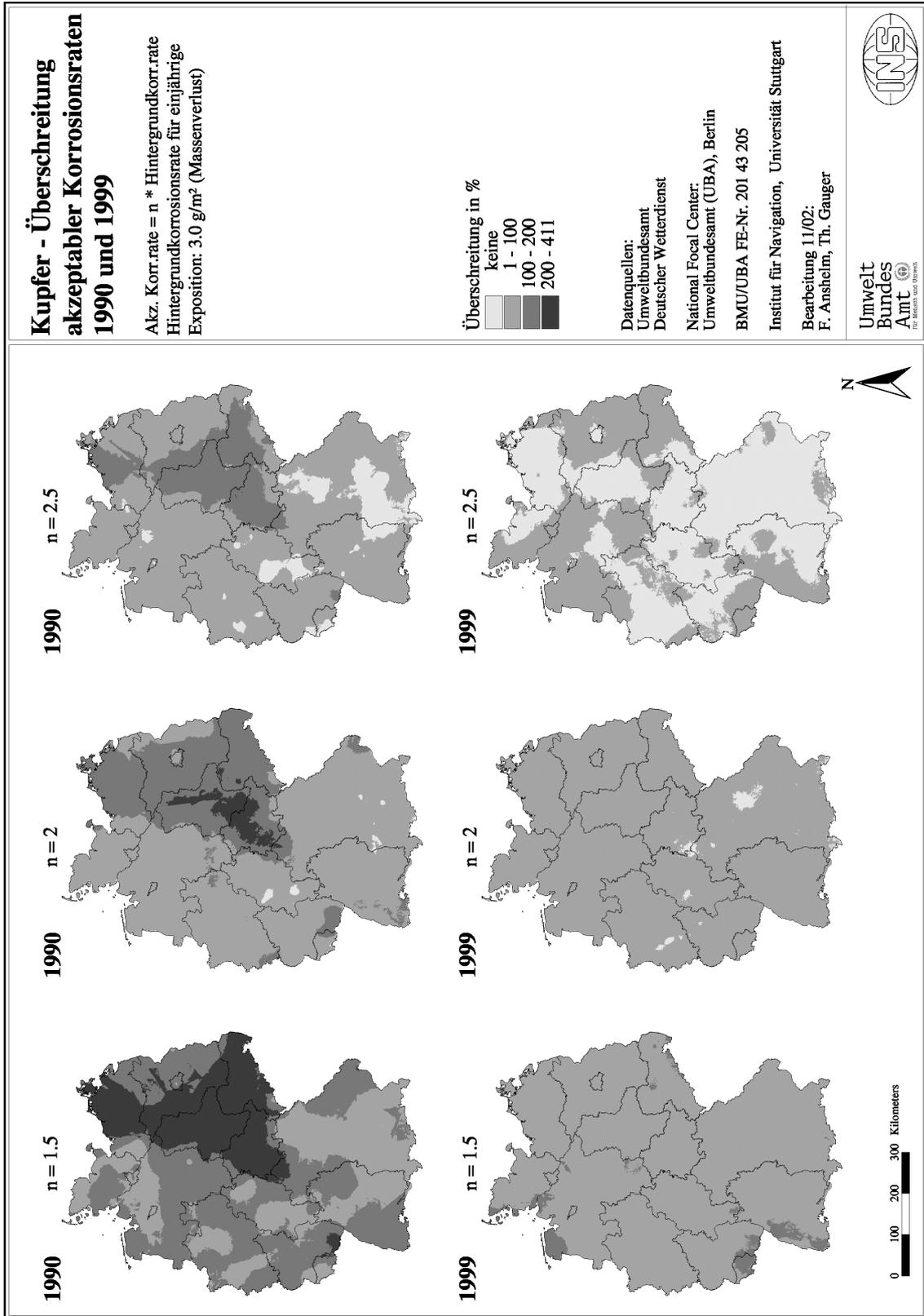
Karte 30: Zink – Überschreitung akzeptabler Korrosionsraten 1990 und 1999



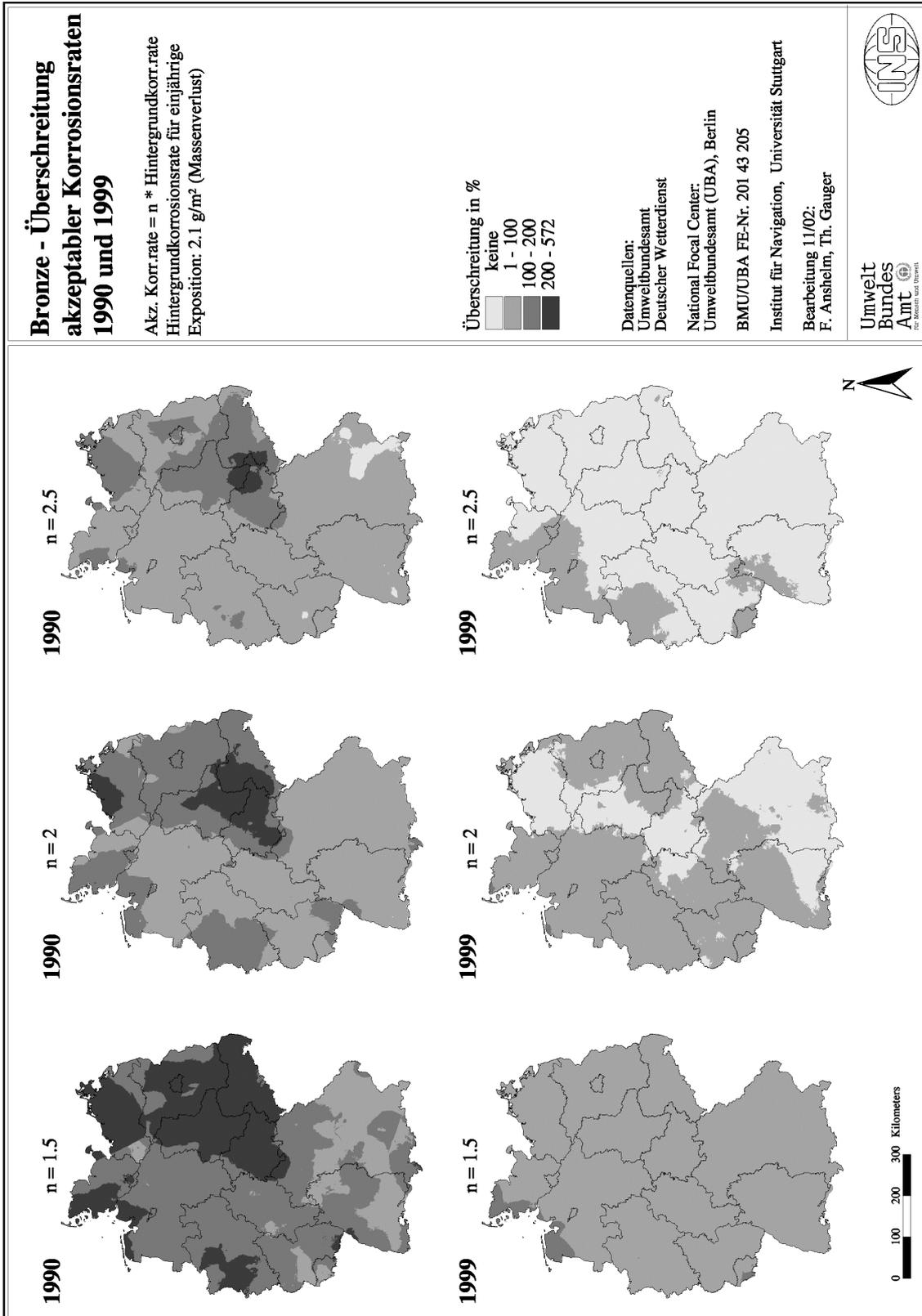
Karte 31: Aluminium – Überschreitung akzeptabler Korrosionsraten 1990 und 1999



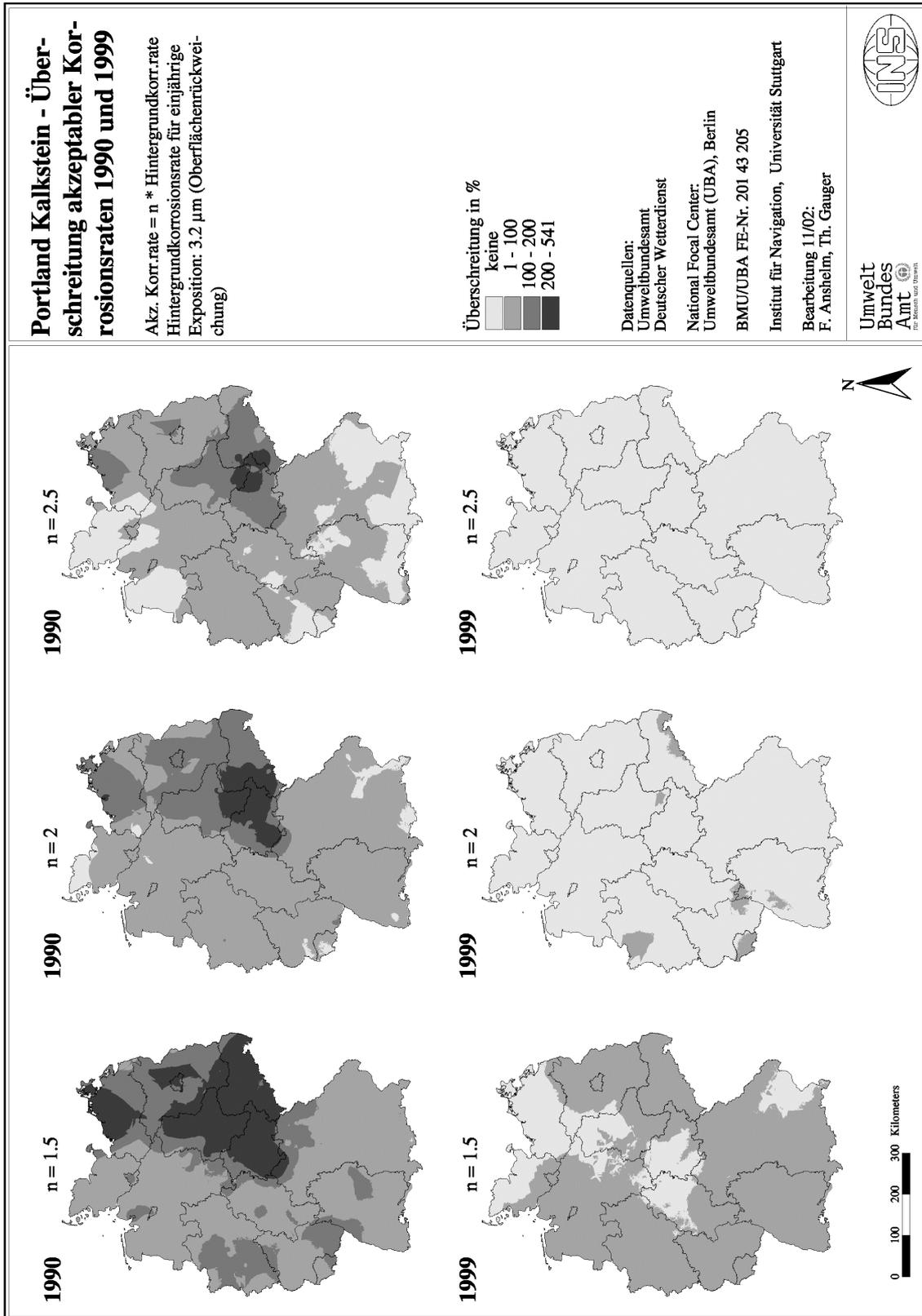
Umwelt
Bundes
Amt



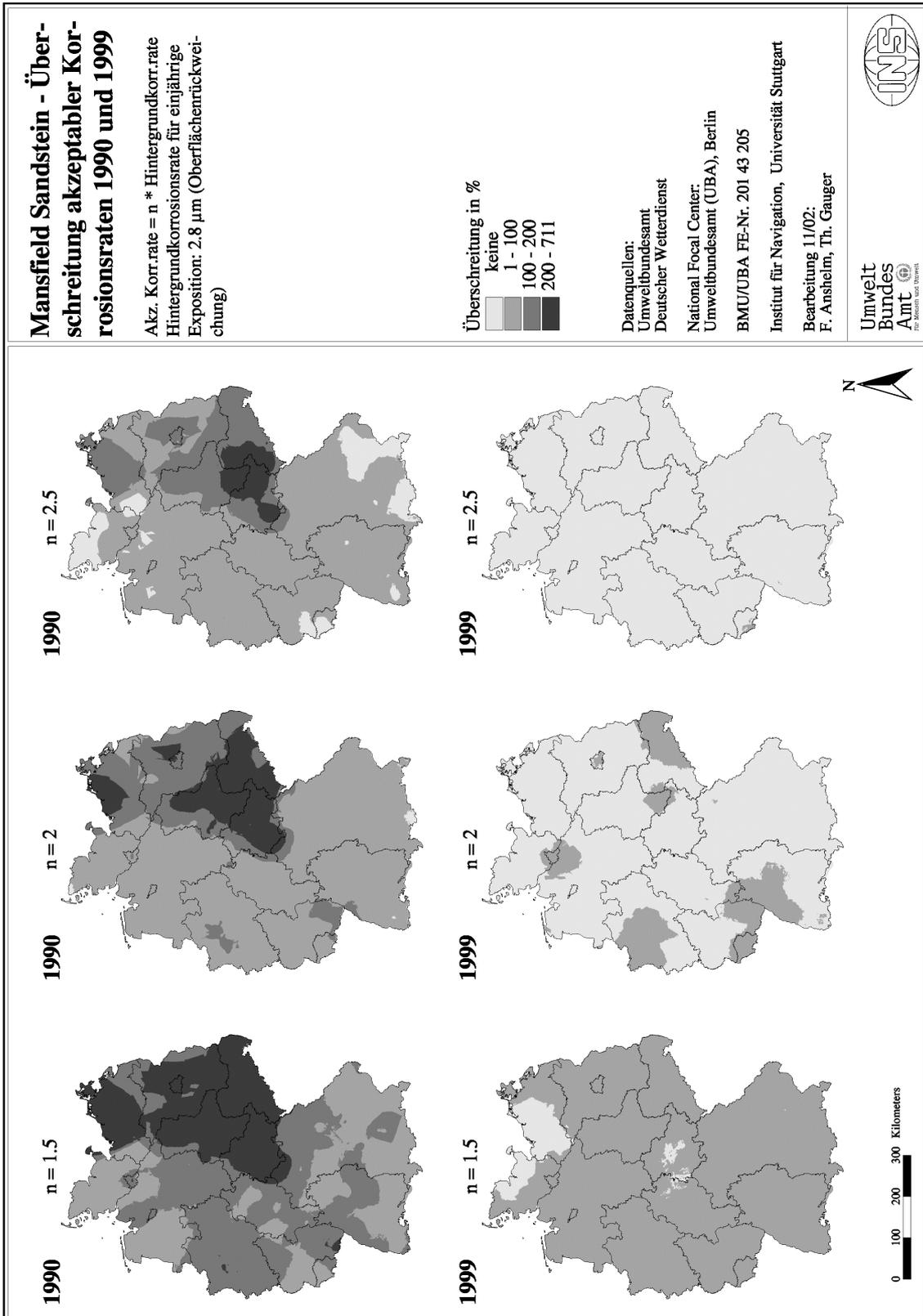
Karte 32: Kupfer – Überschreitung akzeptabler Korrosionsraten 1990 und 1999



Karte 33: Bronze – Überschreitung akzeptabler Korrosionsraten 1990 und 1999



Karte 34: Portland Kalkstein – Überschreitung akzeptabler Korrosionsraten 1990 und 1999



Karte 35: Mansfeld Sandstein – Überschreitung akzeptabler Korrosionsraten 1990 und 1999

2.4 Fallstudie Ballungsraum

Die bei der Kartierung von Materialschäden zu berücksichtigenden Rezeptoren sind inhomogen über die Fläche der Bundesrepublik Deutschland verteilt. In städtischen Gebieten ist Fläche exponierten Materials deutlich höher als in ländlichen Räumen. Mit hohen Materialschäden ist daher vornehmlich in städtischen Gebieten und Ballungsräumen zu rechnen. Dies belegen auch die Ergebnisse des 1998 abgeschlossenen Projekts „Kartierung von Toleranzgrenzwerten der Wirkung von Luftverunreinigungen auf Materialien in Deutschland“ (ANSHELM ET AL. 1998).

Die korrekte Erfassung der Materialschäden in den Städten ist daher von besonderer Bedeutung. Gleichzeitig besteht jedoch die Vorgabe einer flächendeckenden Kartierung für das Gebiet der Bundesrepublik Deutschland. Die Kartierungsarbeiten bewegen sich daher im Spannungsfeld zwischen dem Zwang zur flächendeckenden Kartierung und dem Wunsch nach hoher Detailgenauigkeit in städtischen Gebieten. Um zu überprüfen, ob die Ergebnisse der flächendeckenden Kartierung die Situation in den Städten und Ballungsräumen ausreichend gut beschreiben, wurde eine zweite, auf das Gebiet einzelner Städte beschränkte Kartierung angestrebt. Als zentrales Problem erwies sich die Verfügbarkeit von Eingangsdaten zu Klima und Luftschadstoffen in hoher räumlicher Auflösung.

Grundlage der Kartierungsarbeiten sind Daten zur Landnutzung, Klima, Luftschadstoff-Immission und Luftschadstoff-Deposition. In einem ersten Ansatz wurde versucht, auf Basis der für die flächendeckende Kartierung verwendeten Daten, eine auf die besondere Situation der Städte ausgerichtete Kartierung der Materialschäden durchzuführen. Hierfür wurden ausschließlich die Daten der in städtischen Gebieten gelegenen Messstationen verwendet. Messdaten zur Luftschadstoff-Deposition in städtischen Gebieten waren in der zur Verfügung stehenden Depositionsdatenbank jedoch nicht vorhanden. Die Anzahl der verbliebenen Messdaten zur Luftschadstoff-Immission erwies sich ebenso als zu gering.

In einem zweiten Ansatz wurde versucht die im Zusammenhang mit der Aufstellung von Luftreinhalteplänen erhobenen Messdaten zur Luftschadstoff-Immission in die Kartierung mit einzubeziehen. Hierbei handelt es sich um Daten, die über einen Zeitraum von einigen Monaten bis mehreren Jahren in einem Rastermessnetz mit einer Auflösung von $1\text{km} \cdot 1\text{km}$ bis $3\text{km} \cdot 3\text{km}$ direkt in den Städten erhoben wurden. Auf Basis dieser Daten konnten für das jeweilige Stadtgebiet flächendeckende Karten der Luftschadstoff-Immission in verhältnismäßig hoher Detailgenauigkeit erstellt werden. Daten zu Klima und Luftschadstoff-Deposition wurden im Zuge dieser Messkampagnen nicht erhoben. Ein Vergleich der auf Basis der Rastermessdaten in den

Städten erzielten Kartierungsergebnisse zur Luftschadstoff-Immission mit den bei der nationalen Kartierung für diese Gebiete ermittelten Werten ergab für SO_2 und NO_2 insbesondere in den Stadtzentren in der Mehrzahl höhere Werte. In den Außenbereichen der Stadtgebiete lagen die für diese Schadstoffe festgestellten Werte hingegen meist unter den bei der nationalen Kartierung für diese Gebiete ermittelten Werten. Bei Ozon zeigte sich zumeist eine eher gegenläufige Tendenz (ANSHELM ET AL. 2002a).

Die Einbeziehung von Ergebnissen der Fallstudie Ballungsraum in die nationale Kartierung der Materialschäden in Deutschland erschien aus verschiedenen Gründen nicht sinnvoll. Zum einen lagen nicht für alle erforderlichen Parameter Daten aus Rastermessnetzen vor (Chloridfracht, Protonenfracht, klimatische Parameter). Zum anderen wurden auch die für die Luftschadstoff-Immission erzielten Ergebnisse als nicht ausreichend betrachtet, da nur für einige wenige Städte Daten aus Rastermessnetzen verfügbar waren (Halle, Dresden, Stuttgart) und diese Daten zudem nur für relativ kurze Zeiträume existieren. Die Einbeziehung von Modelldaten zu Klima und Luftschadstoffen in Städten wäre als möglicher Lösungsansatz denkbar. Die Resultate der Fallstudie Ballungsraum sind im 1. Zwischenbericht zu diesem Forschungsvorhaben dokumentiert (ANSHELM ET AL. 2002a).

3 Ökonomische Berechnung von Materialschäden in Deutschland

Neben den Abschätzungen von Dosiswirkungs-Beziehungen und Korrosionsraten wurden Arbeiten zur ökonomischen Abschätzung der Materialschäden in Deutschland für die Jahre 1990, 1995 und 1999 durchgeführt. Sie stellen eine Aktualisierung und Weiterführung der Berechnungen aus dem UBA Forschungsvorhaben „Kartierung von Toleranzgrenzwerten der Wirkung von Luftverunreinigungen auf Materialien in Deutschland“ (FKZ 108 07 034) dar.

Zur Abschätzung der Materialschäden wurde der 'Schadensfunktionsansatz' verfolgt. Dabei wurden in einem ersten Schritt anhand von Dosis-Wirkungsbeziehungen Materialabträge in den betrachteten Jahren abgeschätzt. Die Berechnungen dazu erfolgten am Institut für Navigation (INS). Ausgehend von den resultierenden Karten zu Materialabträgen wurden dann mit Hilfe von Instandsetzungskriterien die geographisch variierenden Instandsetzenden Flächenanteile abgeleitet. Aus diesen ergaben sich schließlich anhand von berechneten Materialbeständen für die Jahre 1990, 1995 und 1999 und der flächenspezifischen Instandsetzungskosten ökonomische Schäden.

In Kapitel 3.1 wird zunächst die Methodik zur ökonomischen Bewertung von Materialschäden beschrieben. Kapitel 3.2 werden die Erweiterung und Aktualisierung der grundlegenden Daten zur Berechnung von Materialschäden dargestellt. Eine detaillierte Diskussion der Methodik ist in (MAYERHOFER ET AL. 1998) zu finden. In Kapitel 3.3 werden schließlich die Ergebnisse der Schadensberechnung diskutiert. Kapitel 3.4 enthält Zusammenfassung und Ausblick.

3.1 Methode zur ökonomischen Bewertung von Materialschäden

3.1.1 Aspekte der Bewertung von Materialschäden

Je nach Art des geschädigten Materials können verschiedene Arten von Kosten entstehen. Diese beinhalten

- Instandsetzungskosten:
direkte und indirekte Kosten, die durch frühere Instandsetzung der Materialien entstehen

- Folgekosten:
Kosten durch Schäden die indirekt als Folge der primären Materialschäden entstehen
- Präventivkosten:
Kosten die bereits beim Neubau oder der Renovierung investiert werden um einer Schädigung durch Luftschadstoffe und Klima vorzubeugen
- Ästhetische Kosten:
Kosten, die durch die ästhetische Zustandsverschlechterung der Materialien im Vergleich zum Neuzustand entstehen bevor sie wieder instandgesetzt werden
- Verlust des kulturellen Wertes:
Der irreversible Verlust der Einmaligkeit von gewissen Kulturgütern.

Die meisten der genannten Einzelkomponenten sind nur sehr schwer zu ermitteln. Zum Teil erfordert deren Berücksichtigung detaillierte Einzelfallstudien oder Marktanalysen. Insbesondere der Wert von Kulturgütern ist sehr schwer zu erfassen. Selbst durch Restauration ist es nicht möglich die Originalität von Kulturgütern wieder herzustellen. Da es sich meist um Einzelstücke handelt sind sie in ihren spezifischen Charakteristika und Eigenschaften besonders heterogen. Ergebnisse aus Einzelstudien können deshalb meistens nicht auf andere Kulturgüter übertragen werden. Im Sinne der Erhaltung der Kulturgüter für die Nachwelt wird stattdessen versucht eine übermäßige Belastung der Kulturgüter und dadurch entstehende irreversible Schädigungen zu vermeiden indem die Einhaltung akzeptabler Korrosionsraten gefordert wird. Die Kartierung der Überschreitung akzeptabler Korrosionsraten für verschiedene Materialien wurde vom Institut für Navigation durchgeführt. Die Ergebnisse werden in Kapitel 2.3 diskutiert.

Diese Studie beschränkt sich aus den angegebenen Gründen auf die Abschätzung von direkten Instandsetzungskosten für Gebrauchsgüter und konzentriert sich dabei auf Wohngebäudeaußenflächen.

3.1.2 Methodik zur Abschätzung der Instandsetzungskosten

Als Methodik zur Ermittlung von Instandsetzungskosten wurde wie im Vorgängerprojekt der Schadensfunktionsansatz gewählt, weil dieser fortschreibbar und ohne großen Aufwand auf ein größeres Gebiet anwendbar ist.

Im Schadensfunktionsansatz erfolgt zunächst die Berechnung der potentiellen Zustandsänderung ΔZ einer Materialoberfläche unter bestimmten Umweltbedingungen (s. Abbildung 19). Zu

diesem Zweck werden die im Kapitel 2.2.1 dargestellten Dosis-Wirkungsbeziehungen verwendet um aufgrund von Klima- und Schadstoffparametern (potentielle) jährliche Korrosionsraten zu berechnen (s. Kapitel 2.2.2). Zusätzlich zu den tatsächlichen Korrosionsraten werden zur Bewertung kritische Werte der Schädigung Z_{krit} benötigt, die angeben bei welcher Schädigung das betrachtete Material wieder instandgesetzt wird. Durch Division der Korrosionsrate mit der kritischen Schädigung, erhält man den Oberflächenanteil der durch die Schädigung in der betrachteten Periode zusätzlich wieder instandgesetzt werden muss. Durch Multiplikation dieses Wertes mit der tatsächlichen Materialoberfläche, errechnet sich dann die zusätzlich instandgesetzte Oberfläche. Die zusätzlichen Instandsetzungskosten ergeben sich schließlich aus dieser Größe und den Kosten der Instandsetzung pro Quadratmeter Materialoberfläche.

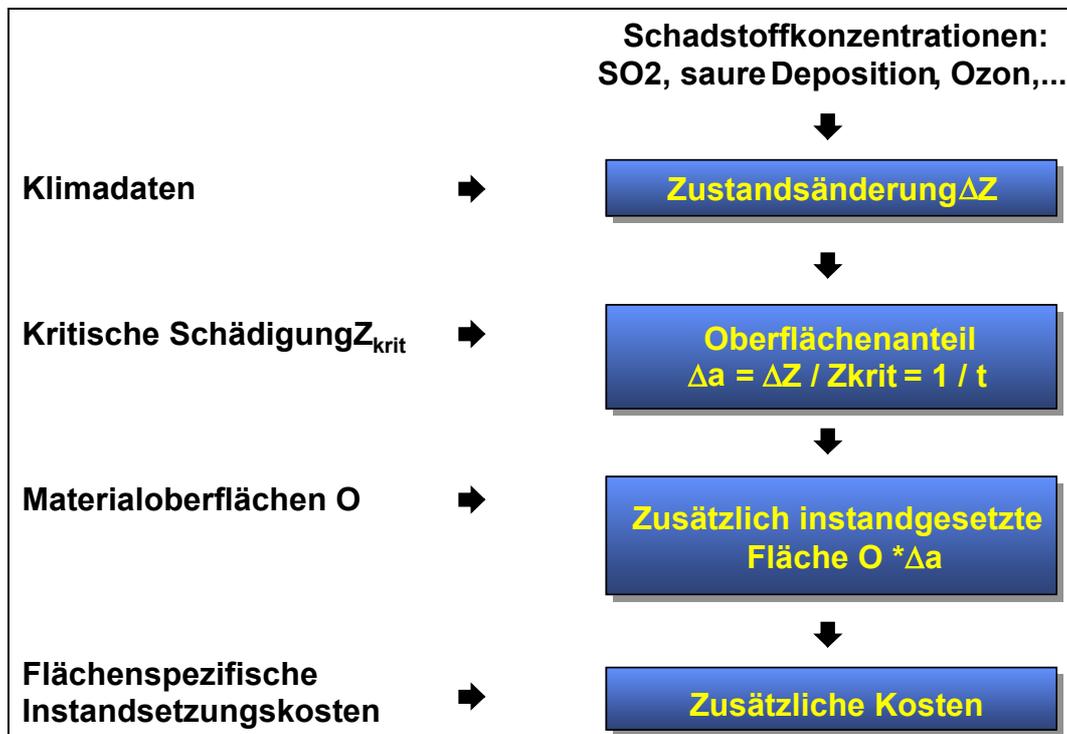


Abb. 19: Flussbild für das verwendete Verfahren zur Berechnung von zusätzlichen Instandsetzungskosten durch Klima- und Luftschadstoffeinflüsse

Als Gleichung für die Berechnung der zusätzlichen Instandsetzungskosten ergibt sich

$$\Delta K = K_{spez} \cdot O \cdot \Delta a = K_{spez} \cdot O \cdot \frac{\Delta Z}{Z_{krit}}$$

mit

ΔK	Zusätzliche Instandsetzungskosten
K_{spez}	Spezifische Instandsetzungskosten
O	Materialoberfläche
Δa	Anteil der zusätzlich instandgesetzten Oberfläche
ΔZ	Zustandsänderung
Z_{krit}	Kritische Schädigung/Zustandsänderung

Die verwendete Gleichung beinhaltet insbesondere die Annahme, dass die Vorschädigung der Oberflächen homogen über das gesamte Material verteilt ist. Zudem ist keine Diskontierung der auftretenden Kosten berücksichtigt. Tatsächlich werden die Materialien allerdings im allgemeinen nicht in dem Jahr instandgesetzt in dem sie geschädigt werden. Die Instandsetzung kann bei langen Lebensdauern und gerade erst instandgesetzten oder neu verbauten Materialien erst wesentlich später stattfinden. Eine Abdiskontierung ist sinnvoll, da das für die Instandsetzung zu investierende Geld bei späterer Instandsetzung zunächst angelegt werden und damit Zinserträge erwirtschaftet werden können. Als Zins wird hierbei der langfristige, inflationsbereinigte Kapitalmarktzins verwendet.

$$\Delta K = K_{spez} \cdot O \cdot \frac{\Delta Z}{Z_{krit}} \cdot \frac{1}{T} \cdot \sum_{t=0}^{T-1} \left(\frac{1}{1+r} \right)^t = K_{spez} \cdot O \cdot \frac{\Delta Z}{Z_{krit}} \cdot F$$

mit

T	Lebensdauer
r	Diskontrate

Der Einfluss der Diskontrate auf das Endergebnis wird in Kapitel 3.3.2 diskutiert. Insbesondere bei langen Lebensdauern von Materialien hat eine zusätzliche Diskontierung eine starke Auswirkung auf die berechneten Kosten. Die besondere Schwierigkeit, die sich für die Berücksich-

tigung der Abdiskontierung ergibt ist, dass Annahmen über die Lebensdauer und damit der zukünftigen Belastung des Materials getroffen werden müssen.

3.2 Überarbeitung der Daten zur ökonomischen Berechnung

Wesentliche Grundlagen für die ökonomische Abschätzung von Materialschäden bilden kritische Materialabträge, das Materialkataster und die flächenspezifischen Instandsetzungskosten.

Um möglichst genaue Werte der Gebäudeoberflächen zu erhalten, wird für die Ableitung des Materialkatasters die Gebäudetypenmethode verwendet. Im ersten Schritt erfolgt eine Einteilung der Gebäude- und Wohnungszahlen des statistischen Bundesamtes nach Gebäude- und Siedlungstypen (Kapitel 3.2.1). Diese ermöglicht schließlich die Zuordnung von Materialoberflächen die für repräsentative Wohngebäude in Dortmund und Köln erhoben wurden und die Ableitung der Kataster für verschiedene Jahre in Deutschland (Kapitel 3.2.2 und 3.2.3). In Kapitel 3.2.4 wird die Anwendung der Dosis-Wirkungsbeziehungen für das abgeleitete Materialkataster diskutiert. Danach werden in Kapitel 3.2.5 die verwendeten Instandsetzungskriterien und –kosten beschrieben. Schließlich erfolgt in Kapitel 3.2.6 eine Abschätzung der Hintergrundkorrosionsraten zur Berechnung des anthropogenen Anteils an den Materialschäden.

Tab. 8: Gebäudetypenmatrix für die alten Bundesländer (GÜLEC ET AL. 1994)

Typ	Anzahl der Wohnungen	A ¹ bis 1900 Fachwerk	B 1901-1918 Massiv	C 1919-1948	D 1949-1957	E 1958-1968	F 1969-1978	G 1979-1983	H 1984-1987
Freistehende Einfamilienhäuser EFHW	1	EFHW A	EFHW B	EFHW C	EFHW D	EFHW E	EFHW F	EFHW G	EFHW H
Reihen- und Doppelhäuser RDHW	2	/	RDHW B	RDHW C	RDHW D	RDHW E	RDHW F	RDHW G	RDHW H
Kleine Mehrfamilienhäuser bis 4 Geschosse KMHW	3-6	KMHW A	KMHW B	KMHW C	KMHW D	KMHW E	KMHW F	KMHW G	KMHW H
Große Mehrfamilienhäuser GMHW	7-12	/	GMHW B	GMHW C	GMHW D	GMHW E	GMHW F	/	/
Hochhäuser HOHW	> 12	/	/	/	/	HOHW E	HOHW F	/	/

¹ überwiegend denkmalgeschützte Gebäude

Tab. 9: Gebäudetypen für die neuen Bundesländer (GÜLEC ET AL. 1994)

Typ	Baualter/Bauweise/Geschosse					
Einfamilienhäuser EFHO	EFHOA bis 1918	EFHOB 1918-1945	EFHOC 1946-1970	EFHOD 1971-1985	EFHOE 1986-1989	
Kleine Mehrfamilienhäuser KMHO	KMHOA bis 1918 Fachwerk	KMHOB bis 1918 Ziegelbau 2-3 Geschosse	KMHOC bis 1918 Ziegelbau 4-5 Geschosse	KMHOD 1919-1945 Ziegelbau 4-6 Geschosse	KMHOE 1946-1960 Ziegelbau 4-6 Geschosse	KMHOF 1961-1989 Block- und Streifenbau 4 Geschosse
Große Mehrfamilienhäuser GMHO	GMHOA 1970-1985 Plattenbau 5-6 Geschosse					
Hochhäuser HOHO	HOHA 1970-1985 Plattenbau 11 Geschosse	HOHB 1970-1985 Plattenbau 18 Geschosse				

3.2.1 Zuordnung der Zahlen des Gebäude und Wohnungsbestandes zu Gebäudetypen

Als erster Schritt wurden die Berechnungsalgorithmen aus dem Vorgängerprojekt (Mayerhofer et al. 1998) analysiert, angepasst und erweitert, um mit Hilfe der Fortschreibungen des Statistischen Bundesamtes aus den Gebäudezählungen von 1987 für die alten Bundesländer (GWZ87) und von 1995 für die neuen Bundesländer (GWZ95), sowie deren Fortschreibungen und Daten zu Wohnungen in 1990 in den neuen Ländern (FGWB), den Gebäudebestand in 1990, 1995 und 1999 zu ermitteln (Statistisches Bundesamt 1990, Statistisches Bundesamt 1991-2001, Statistisches Bundesamt 1997, Statistisches Bundesamt 2000). Dabei erfolgte eine Aufteilung des Bestandes nach Baualterklassen, Geschoszahl, Wohnungszahl und Bauweise. Tabelle 8 und 9 zeigen die verwendeten Gebäudetypen in den alten und neuen Bundesländern für die Jahre bis 1987 bzw. 1989. Die Zuteilung der Gebäudetypen zu den Zahlen des Gebäudebestandes erfolgte in den alten Bundesländern nach Wohnungszahl und Alter, während für die Zuordnung in den neuen Bundesländern die Geschoszahl, Bauweise und Alter verwendet wurden. Grundlage der Berechnungen sind Typisierungen, die im Rahmen der IKARUS-Studie (EBEL ET AL. 1990, GÜLEC ET AL. 1994) und einer Studie des Instituts für Heizung, Lüftung und Grundlagen der Bautechnik (IHLGB) in Berlin (ROSIN ET AL. 1994) entwickelt wurden. Bezüglich Neubauten

wurden sieben Gebäudetypen unterschieden, die vom Institut für Bauphysik in Stuttgart entwickelt wurden (GÜLEC ET AL. 1994). Ihre Zuordnung erfolgte anhand der Wohnungszahl und des Baujahres:

- freistehendes Einfamilienhaus (EFHG): 1 Wohnung;
- Doppelhaushälfte (DHHG): 1 Wohnung;
- Reihenmittelhaus (RMHG): 1 Wohnung;
- Zweifamilienhaus (ZFHG): 2 Wohnungen;
- Kleines Mehrfamilienhaus (KMHG): 3-6 Wohnungen;
- Großes Mehrfamilienhaus (GMHG): 7-12 Wohnungen und
- Hochhaus (HOHG): mehr als 12 Wohnungen.

3.2.2 Ermittlung des Materialkatasters

Wie bereits beschrieben wird in diesem Projekt die Gebäudetypenmethode zur Ableitung eines Materialkatasters verwendet. Grundlage dazu bilden Ergebnisse der Erhebung von Materialoberflächen an repräsentativen Wohngebäuden aus der Studie (HOOS ET AL. 1987). Andere Studien wie etwa die ‚Drei-Städte-Studie‘ (KUCERA ET AL. 1993) machen lediglich Angaben bezüglich dem Zusammenhang von Gebäudeoberfläche und Bevölkerungsdichte. Eine Ableitung der Materialoberflächen über Bevölkerungszahlen ist jedoch wesentlich ungenauer als die hier verwendete Methode, die auf vorhandenen Gebäudestatistiken aufbaut.

Die Angabe der Materialoberflächen in der Studie von (HOOS ET AL. 1987) erfolgt nach den Siedlungstypen wie sie von (ROTH ET AL. 1980) definiert wurden (s. Tabelle 10 und Tabelle 11). Tabelle 12 fasst die Verteilung der Gebäude der bestimmten Gebäudetypen auf die verschiedenen Siedlungstypen zusammen.

Tab. 10: Materialoberfläche in Quadratmetern pro Gebäude, dargestellt nach den verschiedenen Siedlungstypen, abgeleitet aus Ergebnissen von HOOS *ET AL.*, 1987 für Gebäude in Dortmund und Köln

	Siedlungstyp								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Wandfläche	146,7	148,3	68,7	352,0	428,3	267,5	202,0	196,7	433,3
Fensterfläche	26,7	16,7	15,3	88,0	285,6	66,7	67,3	65,7	233,3
Dachfläche	146,7	114,2	88,0	181,3	118,0	150,0	173,3	175,0	1000
Galvanisierter Stahl	5,0	3,3	2,7	5,3		4,2	3,3	5,3	13,3
Zink	21,7	17,5	10,0	32,0	9,5	30,0	20,7	35,0	60,0
Aluminium	3,3	1,7	2,0	12,0	49,5	1,7	48,0		116,7
Sandstein						2,5	12,7	29,7	
Kalkstein							24,0		
Andere Natursteine							16,0		
Beton	3,3	3,3	1,3	38,7	163,8		12,0		70,0
Anstriche	80,0	76,7	52,7	112,0	262,7	139,2	85,3		183,3
Putz	30,0	30,8	14,0	193,3		117,5	20,0		30,0
Backstein	23,3	23,3	10,7						
Asbestzement									216,7
Kunststoff	5,0	2,5	10,7	18,7		20,0	5,3		13,3
Zementdachziegel	120,0	93,3	72,0	145,3		52,5	60,7		120,0
Tondachziegel	6,7	5,8	4,7			97,5			40,0
Flachdach	18,3	15,0	11,3	36,0	120,0		112,7		680,0
Weitere	21,7	21,7	11,3	28,0	116,2	38,3	27,3	14,0	83,3

Tab. 11: Spezifikation der Gebäudetypen je Siedlungstyp in der Studie von ROTH ET AL. 1980 (ST = Siedlungstyp)

ST	Geschosszahl	Gebäude pro km ²	Baualter	Dachform (Steil/ Flachdach [%])
1	Einfamilienhäuser niedriger Dichte und Mehrfamilienhäuser, die sich in der Bauform kaum von größeren Einfamilienhäusern unterscheiden. Typische Erkennungsmerkmale auf dem Kartenbild sind die minimalen Dimensionen der Baukörper, die niedrige Dichte und die Lage am Rand von Siedlungsgebieten.			
	1-2	400-800	1915-1948: 1/3; nach 1948: 2/3	100/0
2	historische Dorfkern und dichte Einfamilienhaussiedlungen Die Dorfkern sind gekennzeichnet durch eine hohe Dichte und ein Straßennetz, das mehr von topographischen Bedingungen als von geometrischen Vorstellungen geprägt ist. Die Einfamilienhaussiedlungen unterscheiden sich vom ST1 vor allem durch ihre höhere Dichte.			
	1,5-2,5	800-1600	vor 1915	100/0
3	Reiheneinfamilienhäuser. Auf dem Kartenbild sind sie durch eine dichte, parallele Anordnung und ein kleinmaschiges, rechtwinkliges Erschließungsnetz zu erkennen.			
	1,5-2,5	1000-2000	1915-1948: 3/4; nach 1948: 1/4	100/0
4	Zwei-, Drei- und Vierspänner mit drei bis fünf Geschossen Diesem Siedlungstyp läßt sich ein großer Teil der Nachkriegsbauten zuordnen. Entsprechend ihrem Baualter finden sich diese Gebäude vorwiegend am Stadtrand.			
	3-5	500-1000	nach 1948	85/15
5	hohe Zeilenbauten und Hochhäuser. Auf dem Kartenbild ist dieser Siedlungstyp an der weitläufigen Verteilung großer Gebäude erkennbar. Diese kommen praktisch nur in äußerster Randlage oder in neuen Stadtzentren vor.			
	6-15	360-870	nach 1948	0/100
6	Städtischen Mehrfamilienhäuser der Jahrhundertwende, die zusammen ganze Straßenblöcke bilden. Typische Merkmale der Blockbebauung sind die darin liegenden großen, zentralen Freiräume und die Hauptorientierung der Wohnungen auf die Straße. Entsprechend ihrem Baualter schließt dieser Blockbauweise direkt an den Stadtkern an.			
	3-4	800-1600	vor 1915: 60%, 1915-1948: 40%	100/0
7	Städtische Bauten, die Ende des 19. Jahrhunderts oder nach dem 2. Weltkrieg, während einer Phase wirtschaftlichen Aufschwungs, errichtet wurden In dichten Baublöcken zusammengedrängt, enthalten diese Gebäude vorwiegend Büros und Geschäfte. In den meisten Städten befindet sich dieser Siedlungstyp zwischen der mittelalterlichen Altstadt und den damals neugebauten Bahnhof.			
	4-6	1000-2000	vor 1915: 1/2, nach 1948: 1/2	50/50
8	mittelalterliche Altstadt Zentrale Lage, geschlossene Bauweise und verwickelte Erschließung sind eindeutige Merkmale dieses Siedlungstyps, wie dies die Kartenbilder deutlich zeigen. Ebenfalls typisch sind die hohe Bebauungsdichte und die verhältnismäßig hohen Gebäude.			
	3-5	2000-4000	vor 1915	100/0
9	sämtliche Industrie-, Lager- und Gewerbebauten Diese liegen meistens am Stadtrand und haben oft den Anschluß an das Bahnnetz. Diese beiden Merkmale gestatten eine eindeutige Identifikation auf dem Kartenbild.			
	2-4	200-400	vor 1915: 1/4; 1915-1948: 1/2; nach 1948: 1/4	40/60

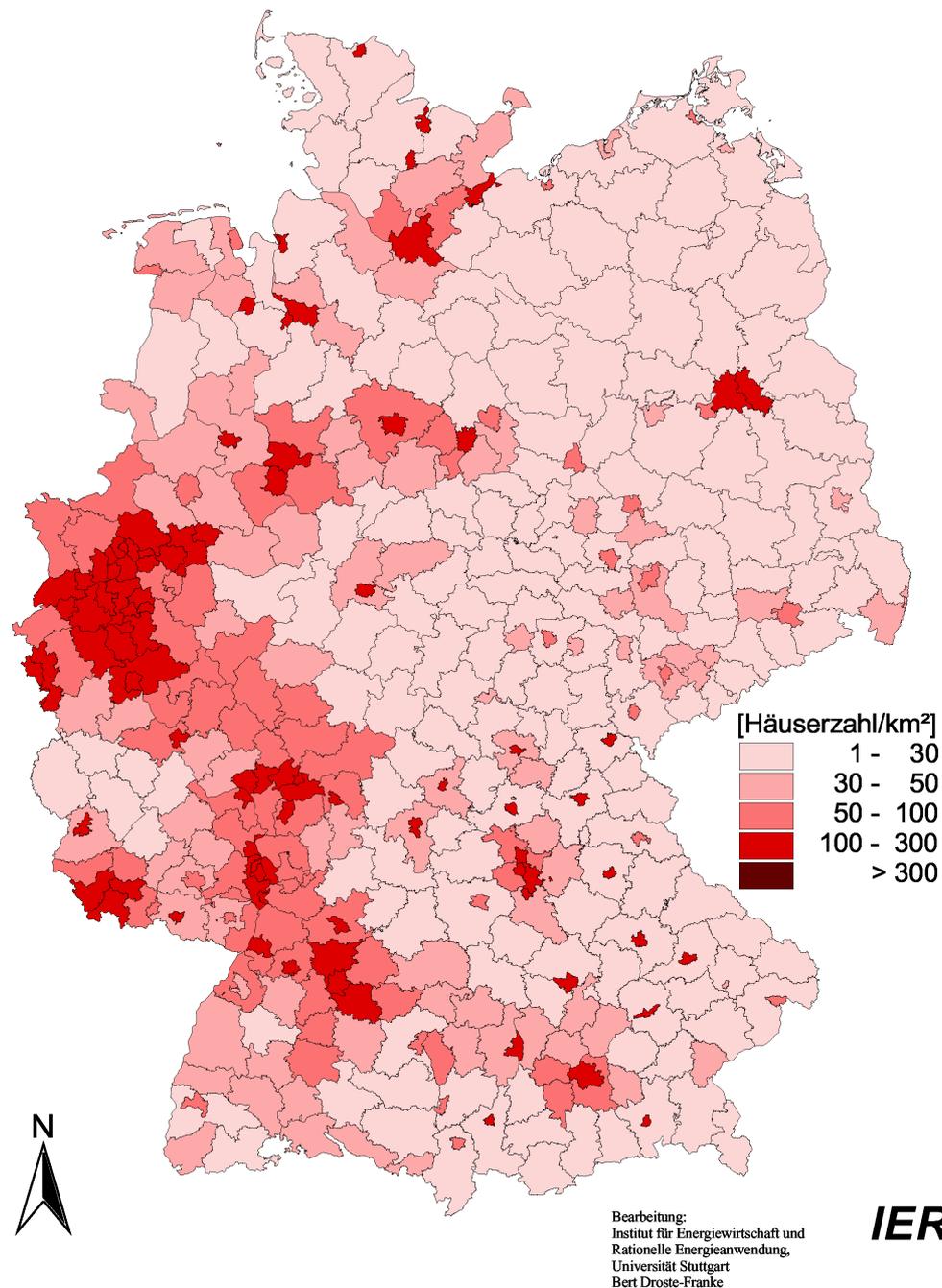
Tab. 12: Verteilung der Gebäudetypen auf Siedlungstypen

Gebäudetyp-Kürzel	Verteilung auf Siedlungstypen
EFHWA	ST8
EFHWB	ST2
EFHWC-H	ST1
RDHWB-H	ST3
KMHW A	½ ST6, ½ ST8
KMHWB	½ ST6, ½ ST7
KMHW C	ST6
KMHW D-H	½ ST4, ½ ST7
GMHWB	ST7
GMHW C	ST6
GMHW D-F	20% ST4, 20% ST5, 60% ST7
HOHWE-F	ST5
EFHOA	ST2
EFHOB	ST1
EFHOC-E	ST1
KMHOA	ST8
KMHOB	ST6
KMHOC-D	ST4
KMHOE	½ ST4 ½ ST5
KMHOF	80% der Oberfläche von ST4
GMHOA	80% der Oberfläche von ST4/5
HOHA	80% der Oberfläche von ST5
HOHB	80% der Oberfläche von ST5*18/11
EFHG	ST1
DHHG	ST3
RMHG	ST3
ZFHG	ST1
KMHG	½ ST1, ½ ST4
GMHG	ST4
HOHG	½ ST4, ½ ST5

3.2.3 Gebäude- und Materialbestand in 1990, 1995 und 1999

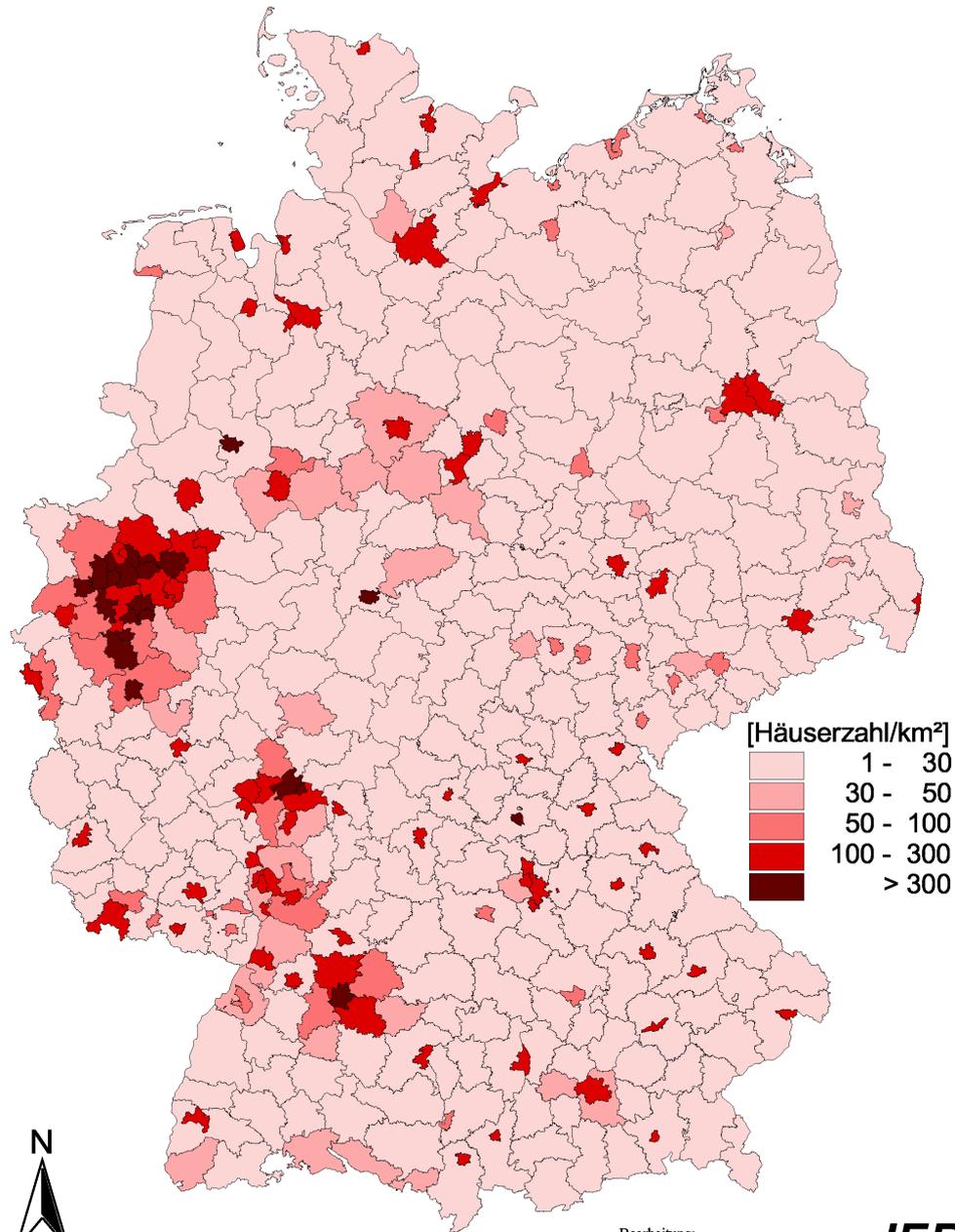
Karte 36 gibt einen Eindruck des abgeschätzten Gebäudebestandes. Sie zeigt die Bebauungsdichte von Einfamilien-, Reihen- und Doppelhäusern in Deutschland in 1999 auf Kreisebene. Während in großen Teilen des westlichen Gebietes eine Dichte von mehr als 30 Gebäuden pro Quadratkilometer zu beobachten ist, wird dieser Wert im östlichen Teil nur in der Umgebung von Städten erreicht. In Karte 37 ist zu sehen, dass, wie zu erwarten, hohe Dichten von Gebäuden mit mehr als 2 Wohnungen (Mehrfamilien- und Hochhäuser) nur direkt in Stadtkreisen und großen Ballungszentren zu verzeichnen sind. In einigen Gebieten sind dabei Dichten von mehr als 300 Gebäuden pro Quadratkilometer zu beobachten. Die dargestellten Daten bilden die Grundlage für die Ableitung der Materialoberflächen an Wohngebäuden in 1999 auf Kreisflächen.

Bestand an Einfamilien-, Reihen- und Doppelhäusern am 31.12.1999



Karte 36: Abgeschätzter Bestand an Gebäuden mit 1 und 2 Wohnungen in 1999

Bestand an Mehrfamilien- und Hochhäusern am 31.12.1999



Bearbeitung:
Institut für Energiewirtschaft und
Rationelle Energieanwendung,
Universität Stuttgart
Bert Droste-Franke

IER

Karte 37: Abgeschätzter Bestand an Gebäuden mit 3 und mehr Wohnungen in 1999

Tabelle 13 zeigt die quantifizierten Wohngebäudeoberflächen in Deutschland. Insgesamt stieg die Zahl der Gebäude und der Gesamtoberfläche an. Die Erhöhungen der Oberflächen einzelner Materialien variieren deutlich zwischen –0.5 und 10 Prozent. Insbesondere die Oberfläche an Putz, Backsteinen und Kunststoff erhöhten sich deutlich mit 8-10%. Natursteinoberflächen blieben entweder gleich oder verringerten sich leicht. Das ist dadurch zu erklären, dass diese nur an älteren Bauten anzutreffen sind. Leichte Unterschiede im Materialinventar für 1995 gegenüber der Vorgängerstudie (MAYERHOFER ET AL. 1998) entstehen durch kleine Änderungen in der verwendeten Methodik.

Tab. 13: Materialoberflächen an Wohngebäudefassaden in Deutschland in 1990, 1995 und 1999

Material	Materialoberflächen an Wohngebäuden in Deutschland [Millionen m ²]		
	1990	1995	1999
Galvanisierter Stahl	80	83	86
Zink	425	438	453
Aluminium	283	286	289
Sand	82	82	81
Kalk	85	85	85
Andere Natursteine	57	57	57
Putz	866	898	938
Anstriche	1969	2023	2084
Beton	331	337	344
Backstein	223	234	246
Kunststoff	147	154	163
Fenster	1141	1164	1191
Kupfer ¹	35	50	62

¹gesamte Fläche an Kupfer abgeschätzt nach Zahlen aus (Hullmann et al. 2001)

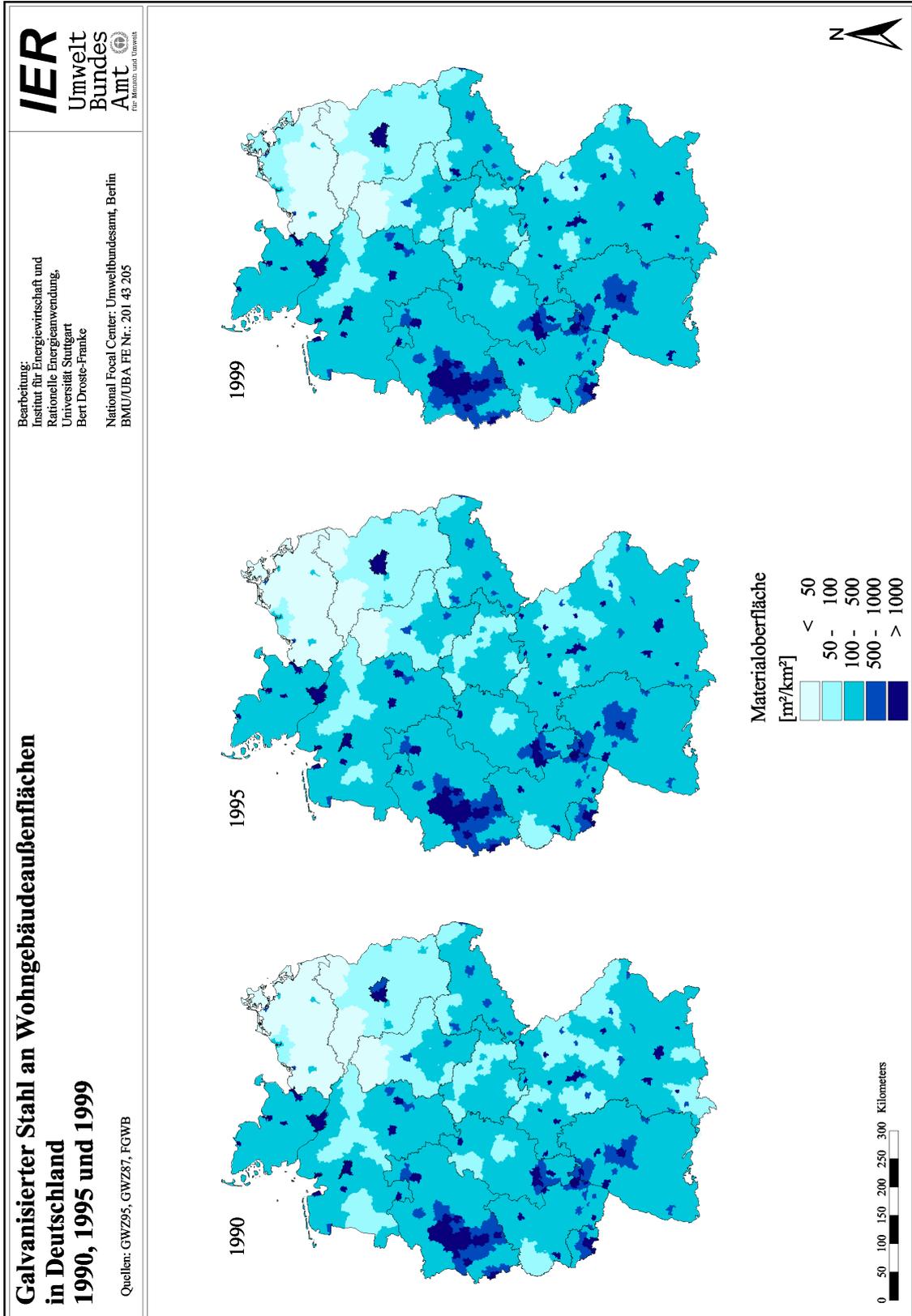
Um eine detailliertere geographische Auflösung zu erreichen und damit eventuellen Schwankungen in den lokalen Konzentrationen berücksichtigen zu können, wurden die Daten innerhalb der Stadt- und Landkreise zusätzlich auf Siedlungsflächen nach CORINE Landcover Daten mit einer Auflösung von 250 × 250 m² verteilt. Zum Vergleich wurden bei der Berechnung der Materialschäden beide geographischen Auflösungen verwendet.

Die Karten 38 bis 46 zeigen die räumliche Verteilung der Materialoberflächen in Deutschland. Um den großen örtlichen Schwankungen der Materialdichte gerecht zu werden, wurde jeweils eine logarithmische Skala verwendet. Der Abstand von zwei Klassen entspricht einer Verzehnfachung der Werte. Aufgrund der großen Unterschiede in den Größen der Materialoberflächen,

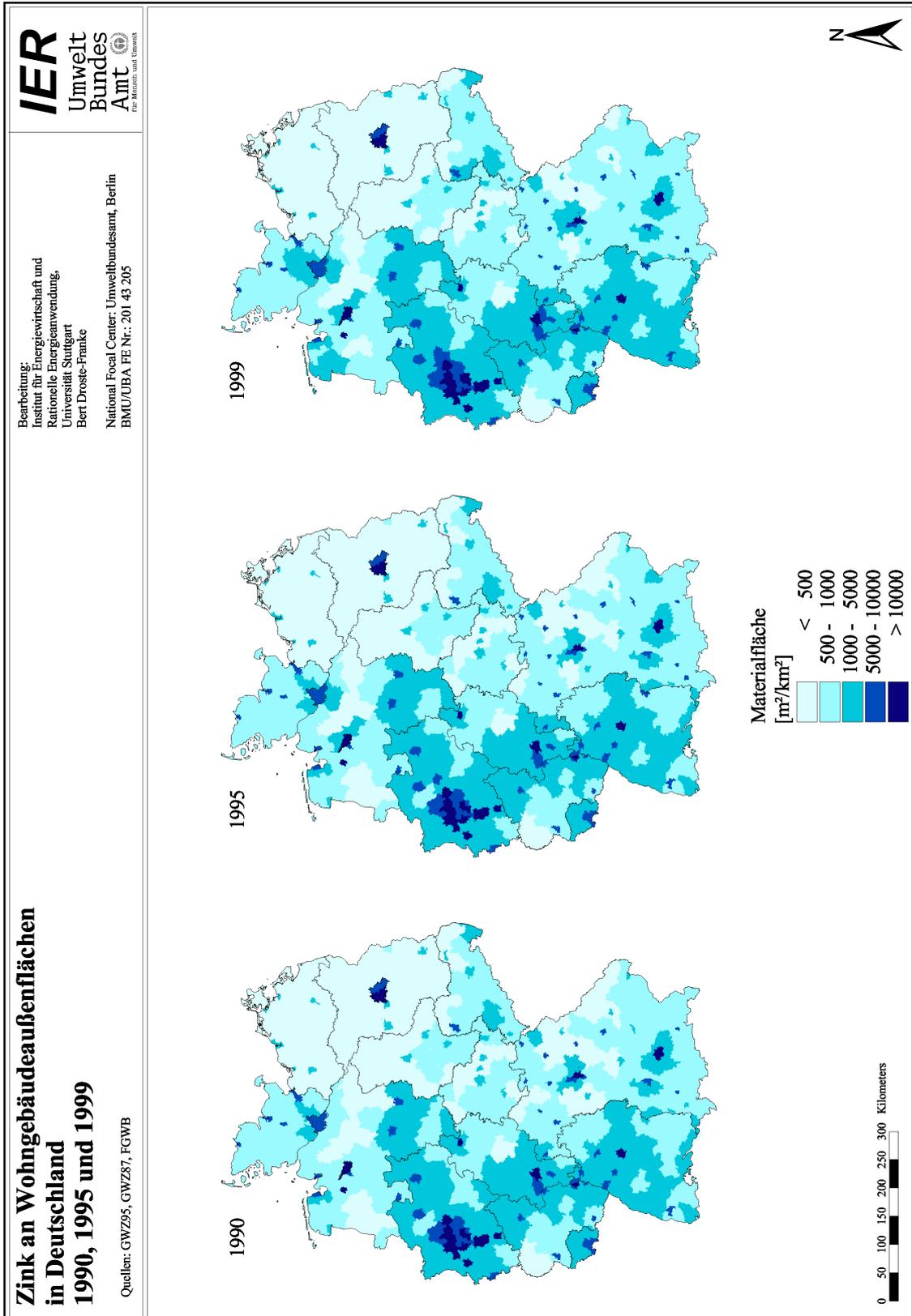
mussten außerdem für Zink und Aluminium, sowie für Putz und Anstriche andere Skalen verwendet werden als für den Rest der Materialien.

In den Verteilungen der Materialien können klare Unterschiede ausgemacht werden. Während galvanisierter Stahl, Zink, Putz und Anstriche auch in den ländlicheren Gebieten eine weite Verbreitung finden, treten Aluminium und die Natursteine gehäuft in größeren Städten auf. Insbesondere sind nach der Studie von (HOOS ET AL. 1987) Sandsteinoberflächen nur in den Siedlungsklassen 6, 7 und 8 zu beobachten, Kalkstein und andere Natursteine sogar nur in der Siedlungsklasse 7. Das führt zu Häufungen dieser Oberflächen im westlichen Gebiet der Bundesrepublik und in Berlin. Die geringsten Materialoberflächen sind aufgrund der geringen Bebauungsdichte in diesem Gebiet durchweg im nördlichen Mecklenburg-Vorpommern abgeschätzt worden.

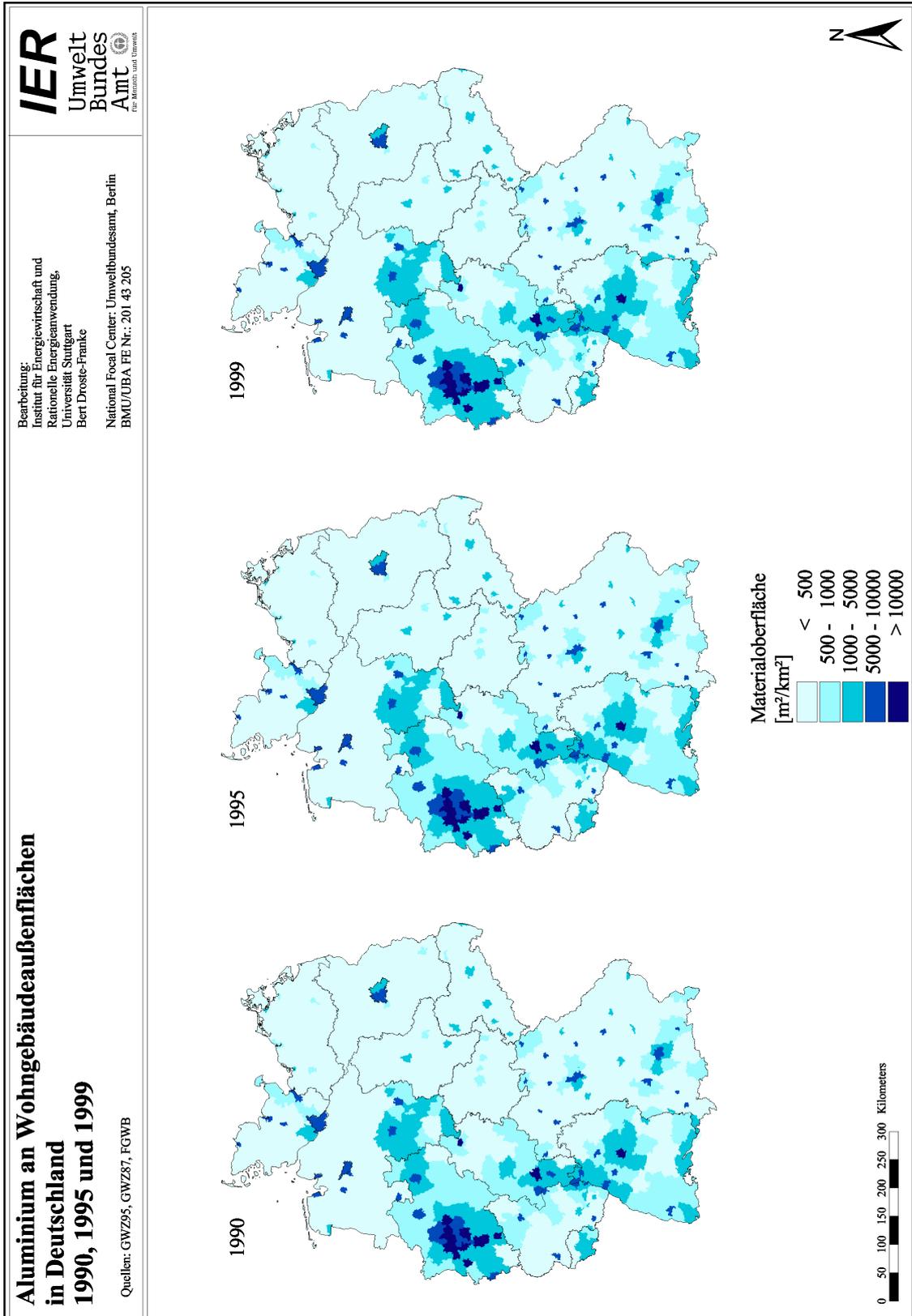
Im Vergleich der Karten für die verschiedenen Jahre 1990, 1995 und 1999 bei den jeweiligen Materialien sind kaum Unterschiede zu erkennen. Der Grund dafür ist die geringe Änderung der Materialoberfläche zwischen 1990 und 1999 im Vergleich zur Skala in der die Karten dargestellt sind. Vereinzelt sind Veränderungen jedoch gut erkennbar. Zum Beispiel sieht man, dass die Flächen galvanisierten Stahls im nordwestlichen Ruhrgebiet und nordöstlich von Stuttgart von 1990 bis 1999 zugenommen haben.



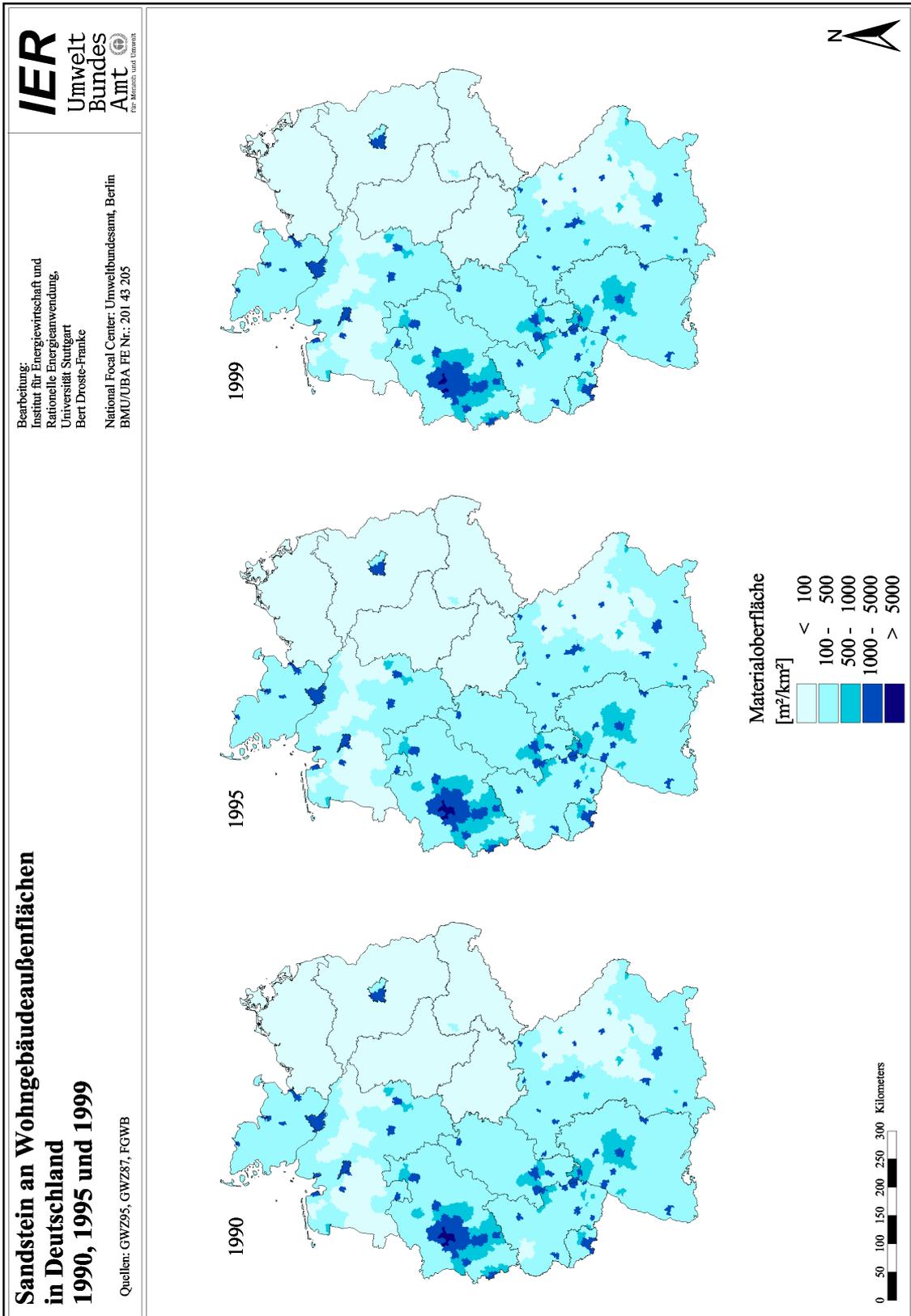
Karte 38: Galvanisierter Stahl an Wohngebäudeaußenflächen in 1990, 1995 und 1999



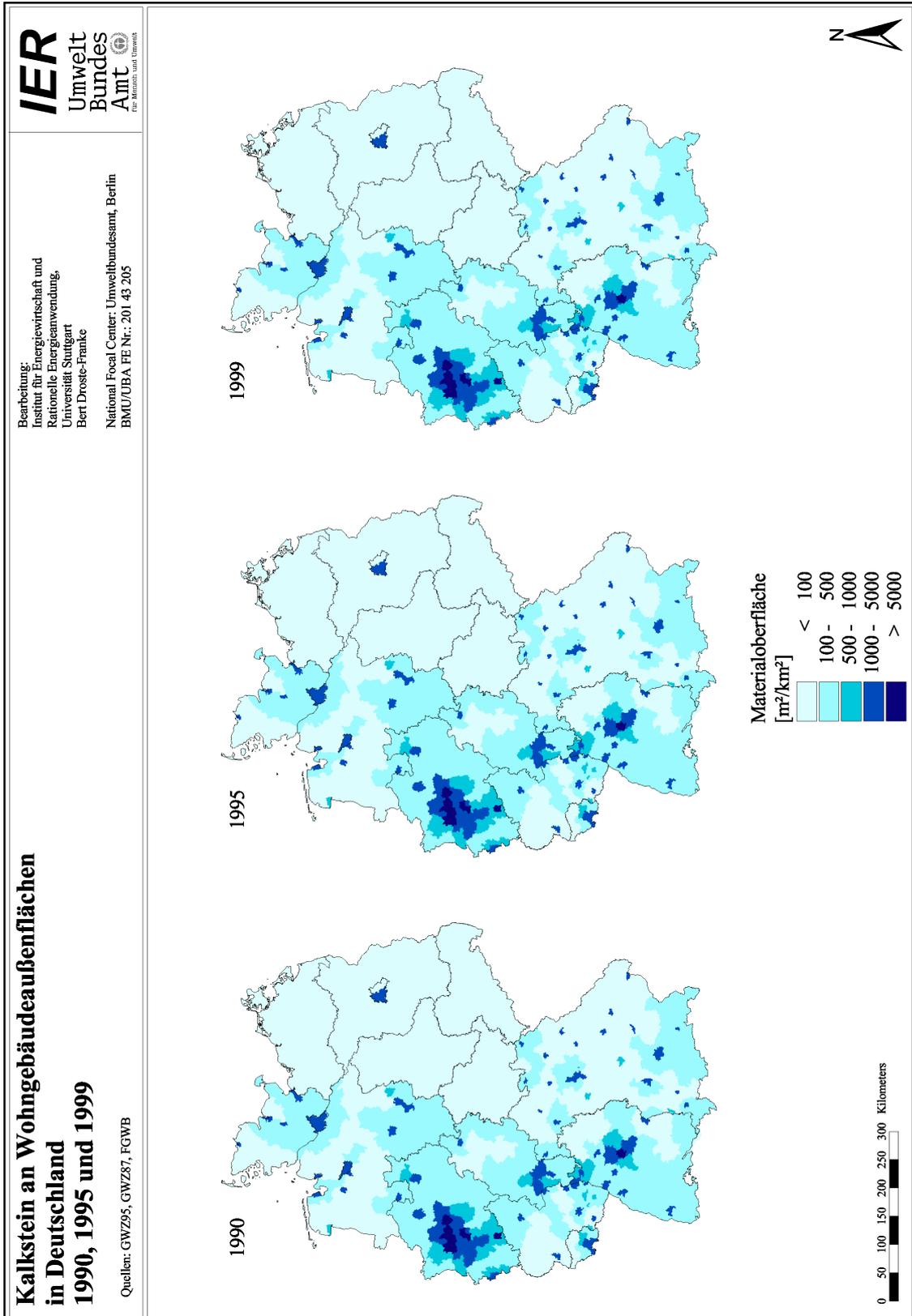
Karte 39: Zink an Wohngebäudeaußenflächen in 1990, 1995 und 1999



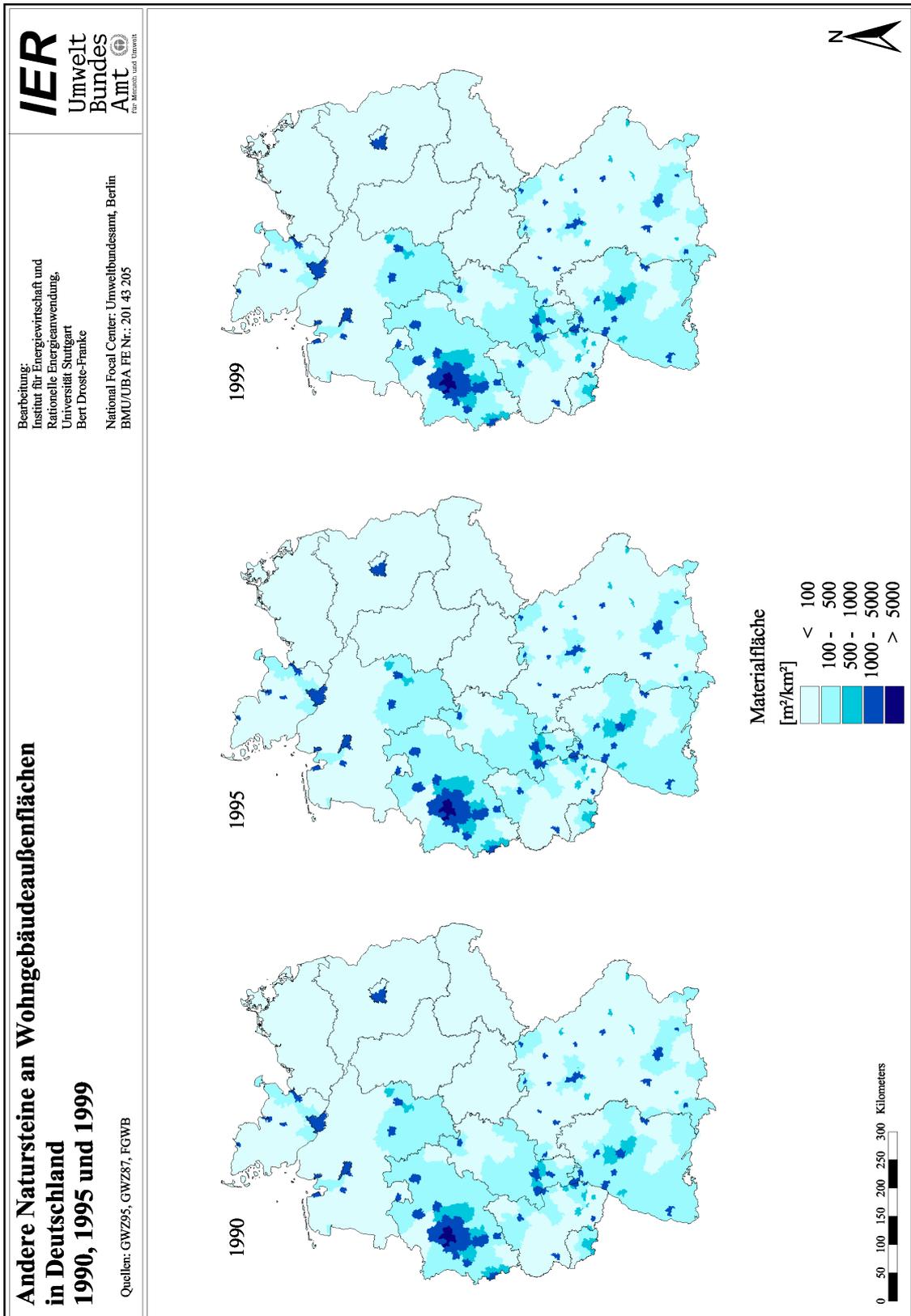
Karte 40: Aluminium an Wohngebäudeaußenflächen in 1990, 1995 und 1999



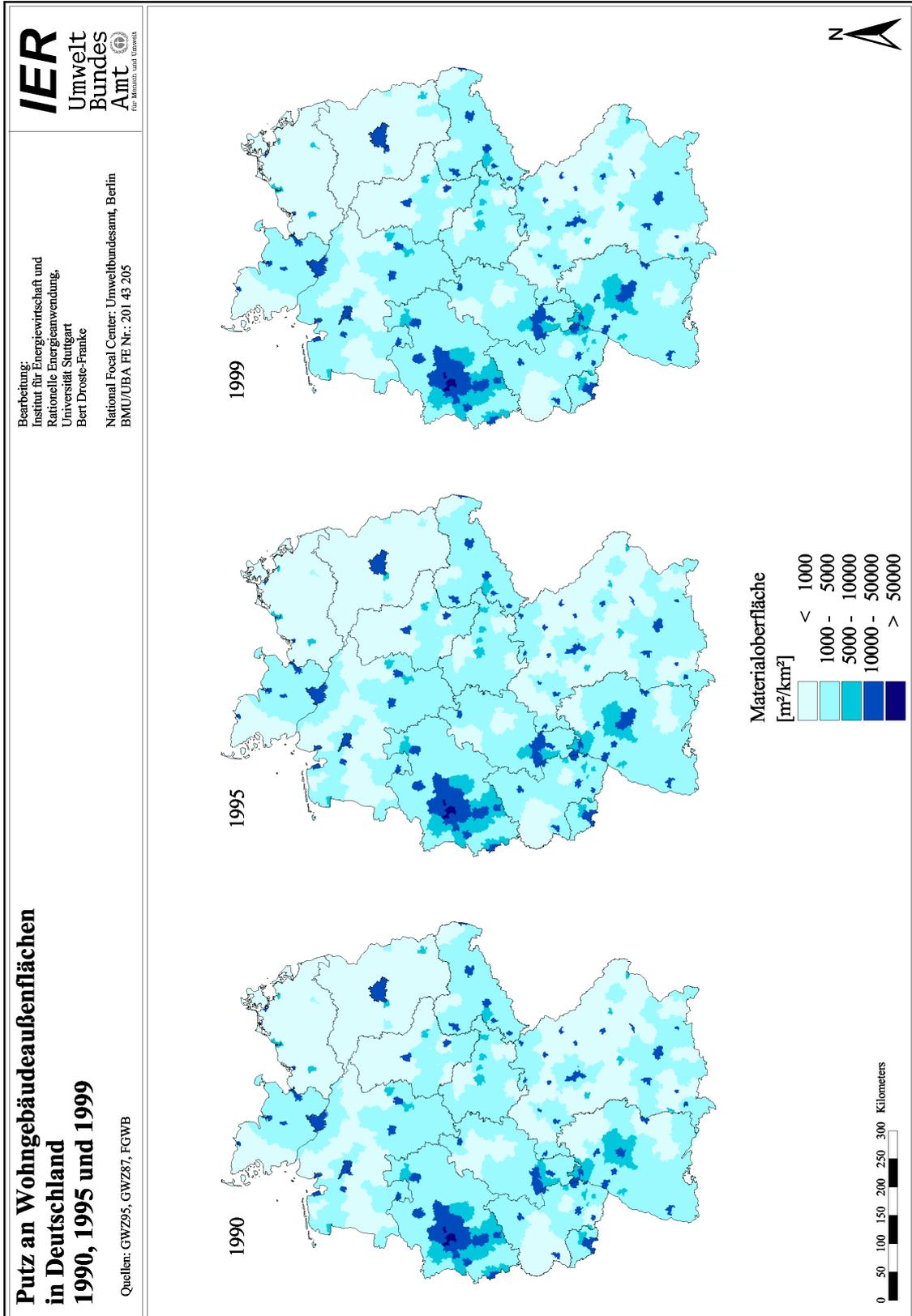
Karte 41: Sandstein an Wohngebäudeaußenflächen in 1990, 1995 und 1999



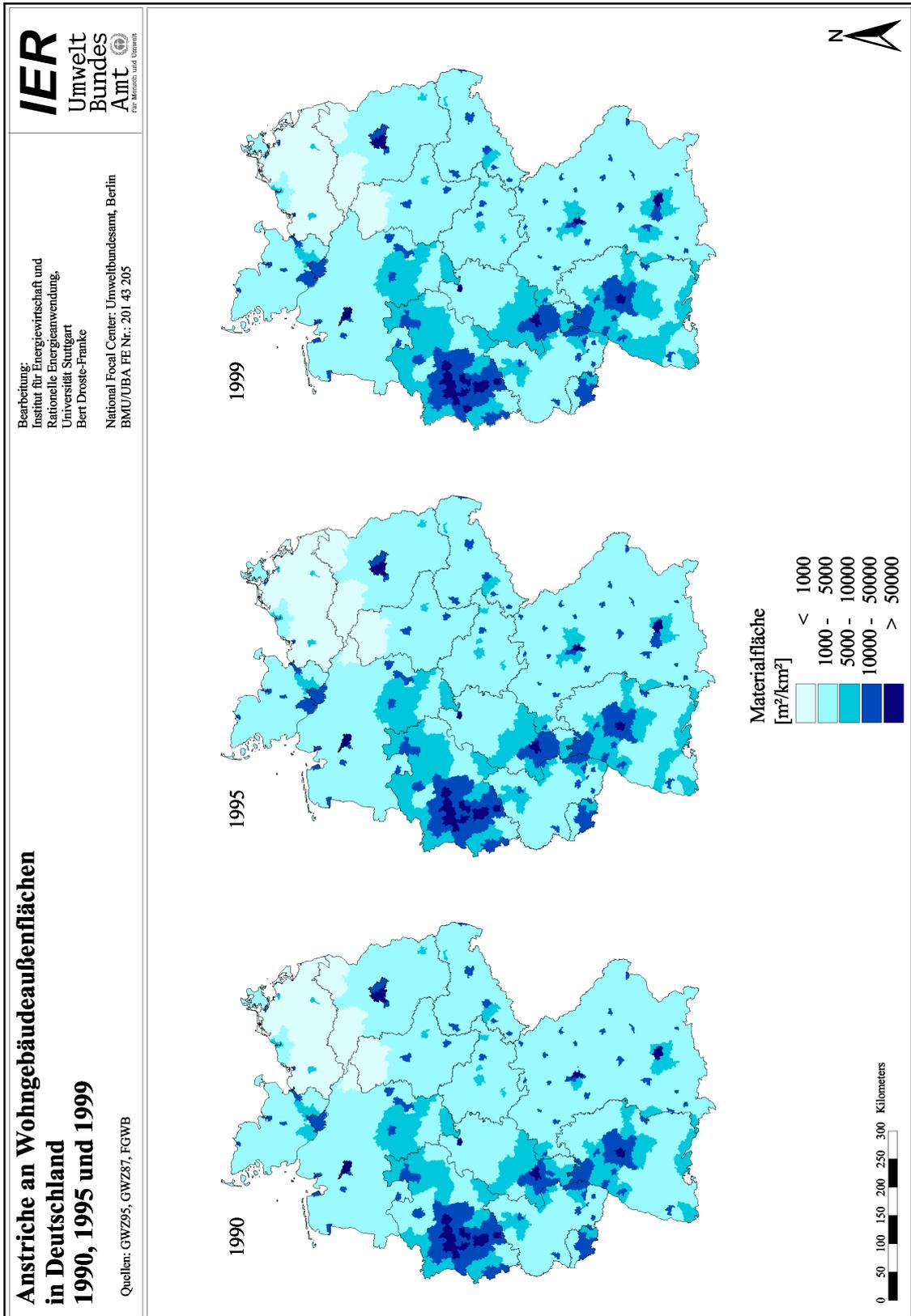
Karte 42: Kalkstein an Wohngebäudeaußenflächen in 1990, 1995 und 1999



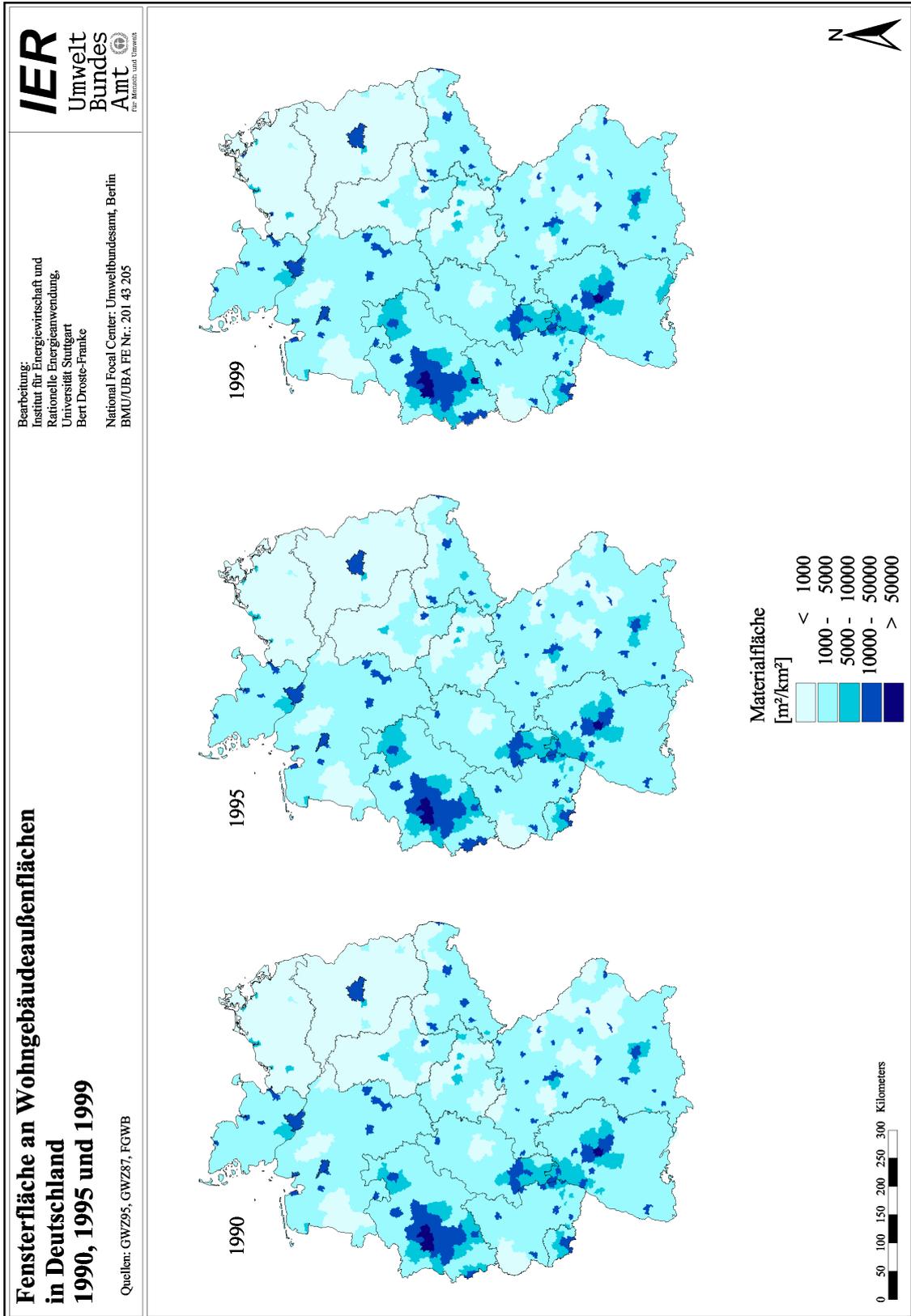
Karte 43: Anderer Naturstein an Wohngebäudeaußenflächen in 1990, 1995 und 1999



Karte 44: Putz an Wohngebäudeaußenflächen in 1990, 1995 und 1999



Karte 45: Anstriche an Wohngebäudeaußenflächen in 1990, 1995 und 1999



Karte 46: Fensterfläche an Wohngebäudeaußenflächen in 1990, 1995 und 1999

3.2.4 Dosis-Wirkungsbeziehungen

Betrachtet man den Verlauf der mit den Dosis-Wirkungsbeziehungen berechneten Korrosion mit der Zeit (s. Kapitel 2.2.2), so sieht man, dass die meisten Dosis-Wirkungsbeziehungen einen Exponenten kleiner als eins aufweisen. Somit werden die jährlichen Korrosionsraten mit dem Alter des Materials immer geringer. Der Durchschnittswert der jährlichen Korrosion wird daher nicht bereits zu Beginn der Exposition sondern zu einem späteren Zeitpunkt erreicht. Optimal wäre es die Alterung und Korrosion der Materialien über ihre gesamte Lebensdauer zu verfolgen. Die Expositionsversuche der UN ECE wurden allerdings nur über einen Zeitraum von acht Jahren durchgeführt. Somit steht keine Information über die Korrosion in späteren Jahren aus Beobachtungen zur Verfügung. Unter der Annahme dass die Korrosionsrate nach den acht Jahren weiter abnimmt, wird in den Rechnungen als beste Näherung für einen Durchschnittswert die Korrosionsrate im achten Jahr der Exposition verwendet.

Vergleicht man die Liste der berechneten Korrosionskarten mit den Materialien in Tabelle 17, so erkennt man, dass Korrosionskarten für Materialien berechnet wurden, für die kein Materialkataster abgeleitet werden kann und umgekehrt. Insbesondere sind für einige Materialien, die häufig an Außenfassaden verwendet werden, keine Dosis-Wirkungsbeziehungen vorhanden. Beispiele dafür sind die typische Fassadenanstriche und Beton. Für Putz existiert ebenfalls keine Dosis-Wirkungsbeziehung. Da aber Putz einen hohen Anteil an Kalzit beinhaltet und die Schadensmechanismen deshalb sehr ähnlich sind, kann hier ersatzweise die Beziehung für Sandstein verwendet werden (MAYERHOFER ET AL. 1998). Kosten die durch die Reinigung von verschmutzten Fassaden und Fensterfronten aufgrund von erhöhten Partikelkonzentrationen in der Atmosphäre entstehen, können aufgrund fehlender Dosis-Wirkungsbeziehungen ebenfalls nicht ermittelt werden.

Berücksichtigt werden in den Rechnungen:

- Galvanisierter Stahl und Zink unter Verwendung der Zink-Funktionen
- Aluminium unter Verwendung der Aluminium-Funktionen
- Kupfer unter Verwendung der Kupfer-Funktionen
- Sandstein, Putz und andere Natursteine unter der Verwendung der Funktionen für Mansfield Sandstein
- Kalkstein unter der Verwendung der Funktion für Portland Kalkstein

Außerdem gilt für die groben Abschätzungen:

- Die Kupferfunktionen wurden auf Kupfer angewandt, wobei das Materialinventar auf Zahlen aus (HULLMANN ET AL. 2001) beruht. Da Kupfer sehr ähnlich eingesetzt wird wie Zink, wurde für die geographische Verteilung der Kupferoberflächen das Zinkinventar verwendet.
- PVC-Funktionen wurden auf einen Drittel der Fensterfläche angewendet um die Schädigung von PVC-Fenstern zu ermitteln und
- die Farb-Funktionen für Alkyd-Melamin-Anstriche auf verzinktem Stahlblech und Silizium-Alkyd-Anstriche wurden auf Stahlplatten gemäß der Annahmen, die in den ExterneE Projekten getroffen wurden, auf 10 bzw. 25 Prozent der gesamten angestrichenen Fläche angewendet (FRIEDRICH UND BICKEL 2001, TIDBLAD 1999).

Die mit den Dosis-Wirkungsbeziehungen berechneten Einheiten sind je nach Effekt unterschiedlich. Meistens werden Schichtabträge in Mikrometer pro Jahr oder Materialverluste in Gramm pro Quadratmeter berechnet. Mit den Funktionen für die Anstriche werden sogenannte ASTM-Werte berechnet, die eine selbstdefinierte Skala auf der Basis von Expertenabschätzungen darstellt. Im instandgesetzten Zustand ist der Wert 10 im völlig abgenutzten Zustand 1.

3.2.5 Instandsetzungskriterien und Instandsetzungskosten

Zusätzlich zum Materialinventar und zu den ausgewerteten Dosiswirkungsbeziehungen werden Instandsetzungskriterien und -kosten benötigt. Studien in diesem Bereich sind sehr selten und neuere Werte konnten auch durch Expertenbefragungen nicht ermittelt werden. Für die bereits im Vorgängerprojekt berücksichtigten Materialien werden daher dieselben Instandsetzungskriterien verwendet. Für Kupfer wurden Abtragsraten aus der Literatur zusammen mit gefundenen Lebensdauern für Kupferoberflächen von etwa 80 bis 120 Jahren angenommen. Die Werte sind in Tabelle 14 zu finden.

Die verwendeten spezifischen Schadenskosten basieren zum einen auf den Kosten die im letzten Projekt angewendet wurden und zum anderen auf weiteren Studien und Umfragen (HMULF 2002, HULLMANN ET AL. 2001, KOHLBECKER 1999, REICHERT 2003, RUNDUMSHAUS 2003). Die Maximal- und Minimalwerte ergeben sich aus Schwankungen in den verschiedenen Angaben. Insbesondere sind in den Maximalwerten Gerüstkosten enthalten, während diese bei den Minimal- und Durchschnittswerten nicht berücksichtigt wurden. Eine generelle Berücksichtigung von Gerüstkosten würde eine Überschätzung des Schadens bedeuten, da Gerüste oft im Zusammenhang mit mehreren Renovierungsmaßnahmen genutzt werden. Dadurch ergibt sich die Schwierigkeit die Gerüstkosten bestimmten Instandsetzungsmaßnahmen zuzuordnen.

Tab. 14: Verwendete Instandsetzungskriterien. Minimal und Maximalwerte werden für die Sensitivitätsanalyse genutzt

Material	Durchschnitt	Minimalwert	Maximalwert	Einheit
Galvanisierter Stahl	25	15	35	µm
Zink	2000	1500	2500	µm
Aluminium	75	50	100	µm
Natursteine	4000	3000	5000	µm
Putz	4000	3000	5000	µm
Anstriche	5			ASTM
Kupfer	10	5	15	µm
Kupfer	100	30	150	g/m ²
PVC	20			µm

Tab. 15: Verwendete flächenspezifische Instandsetzungskosten

Material	Durchschnitt [€ ₂₀₀₀ /m ²] (ohne Gerüst)	Minimum [€ ₂₀₀₀ /m ²] (ohne Gerüst)	Maximum [€ ₂₀₀₀ /m ²] (mit Gerüst)
Galvanisierter Stahl	25	15	45
Zink	20	15	30
Aluminium	45	40	55
Natursteine	270	210	340
Putz	30	20	45
Anstriche	15	5	30
Kupfer	150	140	170

Für PVC-Fenster wird angenommen, dass sie wenn sie aufgrund der langen Lebensdauer unansehnlich werden nicht ersetzt, was etwa 150 €/m² kosten würde, sondern zunächst nur angestrichen werden. Die dafür verwendeten Anstrichkosten können Tabelle 15 entnommen werden. Die anzustreichende Fläche wird mit 30 Prozent der Fensterfläche angenommen. Das entspricht dem Anteil des Rahmens an einem sogenannten ‚Standardfenster‘ (s. z.B. MEYER UND WOLTER 2002).

3.2.6 Ableitung von Korrosionsraten ohne anthropogenen Einfluss im achten Jahr der Exposition

Um den anthropogenen Einfluss auf die Ergebnisse abschätzen zu können wird in diesem Kapitel versucht Korrosionsraten abzuleiten, die dem Umweltzustand ohne anthropogene Einflüsse entsprechen. Die Grundlage dafür ist die Annahme, dass die von der UN ECE offiziell festgelegten Hintergrundkorrosionsraten für die einjährige Exposition die Situation ohne anthropogene Einflüsse beschreiben (s. Tabelle 5). Im Gegensatz zu diesen Werten werden für die ökonomischen

mische Bewertung Korrosionsraten im achten Jahr der Exposition verwendet. Daher muss hier eine Abschätzung durchgeführt werden welcher Korrosion im achten Jahr die angegebenen offiziellen Hintergrundkorrosionsraten für das erste Jahr entsprechen.

Die von der UN ECE bereitgestellten Dosis-Wirkungsbeziehungen sind allgemein von der Form

$$\text{Zustandsänderung} = At^x + Bt^y$$

wobei

<i>A</i>	Vorfaktor für den Term der trockenen Exposition
<i>B</i>	Vorfaktor für den Term der nassen Exposition
<i>t</i>	Dauer der Exposition
<i>x, y</i>	Exponenten der Expositionsdauer

Um aus diesen Formeln die Hintergrundkorrosion im achten Jahr ableiten zu können wurde zunächst jeder der beiden Vorfaktoren Null gesetzt und angenommen, dass der übrige Term für das Jahr $t = 1$ den von der UN ECE abgeleiteten Hintergrundkorrosionsraten entspricht. Bei verschiedenen Exponenten x und y ergeben sich auf diese Weise Maximal- und Minimalwerte für die abgeschätzte Korrosionsrate ohne anthropogenen Einfluss im achten Jahr. Tabelle 16 zeigt eine Auflistung der Werte.

Tab. 16: Korrosionsraten veröffentlicht von der UN ECE und hochgerechnet für die Exposition im achten Jahr

Material	Einheit	Hintergrundkorrosionsrate im 1. Jahr	Abgeschätzte Korrosion ohne anthropogene Einflüsse im 8. Jahr der Exposition		
			Minimum	Maximum	Durchschnitt
Zink	g/m ²	3.3	2.07	3.30	2.69
Aluminium	g/m ²	0.09	0.09	0.16	0.13
Kupfer	g/m ²	3	1.55	2.14	1.85
Kalkstein	µm	3.2	2.83	2.83	2.83
Sandstein	µm	2.8	2.13	2.13	2.13

Um zu sehen welcher der Terme bei Situationen mit geringem anthropogenen Einfluss dominiert, wurden die Dosis-Wirkungsfunktionen die zwei verschiedene Exponenten ausweisen

(Zink, Aluminium und Kupfer) mit den Minimalwerten der gemessenen Konzentrationen für 1999 ausgewertet. Für die klimatischen Parameter wurden Durchschnittswerte angenommen. Es zeigte sich, dass mit diesen Werten jeweils der trockene Term der Funktionen für das erste Jahr der Exposition dominiert. Im Fall von Zink und Kupfer machte dieser über 99% und bei Aluminium knapp 90% des Wertes aus. Da selbst die niedrigsten gemessenen Werte in 1999 durch anthropogene Emissionen beeinflusst sind, können aus diesen Prozentwerten keine genauen Werte für die Anteile der einzelnen Terme im Fall der Situation ohne Einflüsse durch den Menschen abgeschätzt werden. Aus ihnen kann aber entnommen werden, dass bei geringen Konzentrationen der Anteil der trockenen Deposition klar dominiert.

Die fett gedruckten Werte in den Spalten „Minimum“ und „Maximum“ der Tabelle 16 stellen die Werte da, die man unter der Vernachlässigung des nassen Terms erhält. Diese wurden für die Abschätzung des anthropogenen Anteils der Schädigungen herangezogen.

Die Verwendung nur eines Wertes für die Korrosionsrate ohne anthropogenen Anteil ist eine grobe Vernachlässigung der geographischen Schwankung natürlicher Korrosionsraten aufgrund von Wetter und Schadstoffkonzentrationen. Diese Vorgehensweise stellt allerdings im Moment die beste Möglichkeit dar den Anteil von wirtschaftlichen und sozialen Aktivitäten an den Materialschäden abzuschätzen.

3.3 Ergebnisse der ökonomischen Abschätzung von Materialschäden in Deutschland

3.3.1 Quantifizierte Instandsetzungsflächen und Schadenskosten in 1990, 1995 und 1999

Basierend auf der oben beschriebenen Methodik und den abgeleiteten Eingangsdaten wurden zunächst die instandgesetzte Fläche und die Instandsetzungskosten für die Jahre 1990, 1995 und 1999 berechnet. Wie bereits erwähnt wurden dazu zwei Ansätze verfolgt. Zum einen wurden die Daten zu Materialoberflächen auf Kreisebene homogen über die gesamte Kreisfläche und zum zweiten zusätzlich innerhalb der Kreise homogen auf Siedlungsflächen verteilt.

Tabelle 17 zeigt die instandgesetzten Flächen für die betrachteten Jahre. Der rechte Teil der Tabelle gibt die Prozentanteile Instandsetzungsfläche an der jeweiligen gesamten Oberfläche des Materials an. Der obere Teil der Tabelle bezieht sich auf die Rechnung auf Kreisflächen und die untere auf die Rechnung auf Siedlungsflächen. Die meiste instand zu setzende Fläche wird mit

etwa 3.2 Quadratkilometern für galvanisierten Stahl in 1990 abgeschätzt. Dieser Wert nimmt in den Jahren 1995 und 1999 auf 2.9 und 2.6 km² ab. Ebenso nehmen auch die Prozentanteile von 4 auf 3.5 und 3.1 Prozent ab. Die zweitgrößte Fläche, die wieder instandgesetzt werden muss wird mit 1.8, 1.3 und 0.96 km² für Putz berechnet. Danach folgt Aluminium mit 1.2, 1.1 und 0.97 km² (Berechnungen auf Kreisfläche). Es ist zu erkennen, dass die Schädigung von Putz stärker von den besseren Bedingungen in 1999 profitiert als Aluminium. Trotz stärker anwachsender Materialoberfläche (s. Tabelle 13) wird in 1999 weniger an Putz- als an Aluminium-Oberfläche geschädigt. Der Prozentanteil der geschädigten Fläche liegt bei Aluminium durchweg über dem bei Putz und damit an zweiter Stelle nach galvanisiertem Stahl. Die Zahlen für die Abschätzung auf Siedlungsflächen weichen nur geringfügig von denen auf Kreisebene berechneten Werten ab. Zwischen den gerundeten Werten in Tabelle 17 sind kaum Unterschiede zu erkennen.

Tab. 17: Berechnete Instandsetzungsfläche für die Jahre 1990, 1995 und 1999

	Instandsetzungsfläche [km ² /a]			Instandsetzungsanteil [%/a]		
	1990	1995	1999	1990	1995	1999
Materialkataster auf Kreisfläche						
Galvanisierter Stahl	3.20	2.90	2.60	4.0	3.5	3.1
Zink	0.21	0.19	0.17	0.1	0.0	0.0
Aluminium	1.20	1.10	0.97	0.4	0.4	0.3
Sandstein	0.15	0.11	0.08	0.2	0.1	0.1
Kalkstein	0.18	0.14	0.11	0.2	0.2	0.1
Andere Natursteine	0.10	0.08	0.06	0.2	0.1	0.1
Putz	1.80	1.30	0.96	0.2	0.2	0.1
Materialkataster auf Siedlungsfläche						
Galvanisierter Stahl	3.20	2.90	2.60	3.9	3.5	3.0
Zink	0.21	0.19	0.17	0.1	0.0	0.0
Aluminium	1.20	1.10	0.95	0.4	0.4	0.3
Sandstein	0.15	0.11	0.08	0.2	0.1	0.1
Kalkstein	0.18	0.14	0.11	0.2	0.2	0.1
Andere Natursteine	0.10	0.08	0.06	0.2	0.1	0.1
Putz	1.80	1.30	0.94	0.2	0.1	0.1

Die berechneten instand zu setzenden Oberflächen bilden die Grundlage für die Abschätzung des ökonomischen Schadens indem die Flächen aus Tabelle 17 mit den spezifischen Kosten aus Tabelle 15 multipliziert werden. Zusätzlich zu den gesamten Kosten wurde der anthropogene Anteil abgeschätzt. Dazu wurde angenommen, dass die Hintergrundkorrosionsraten aus Tabelle 16 die Korrosion ohne anthropogene Beeinflussung wiedergeben (s. auch Kapitel 3.2.6). Die Berechnung erfolgte indem von der Korrosion im achten Jahr der Exposition an jedem Punkt

der Karten die entsprechenden Hintergrundkorrosionsraten aus Tabelle 16 abgezogen wurden. Die Ergebnisse sind in Tabelle 18 zu sehen. Wie in der Tabelle mit den Instandsetzungsflächen sind auch in dieser Tabelle im oberen Teil die Ergebnisse für die Berechnung auf Kreisflächen und im unteren die Ergebnisse für die Berechnung auf Siedlungsflächen dargestellt.

Tab. 18: Instandsetzungskosten und der aufgrund der Hintergrundkorrosionsraten abgeschätzte anthropogene Anteil der geschädigten Materialien in 1990, 1995 und 1999

Material	Kosten [Mio € ₂₀₀₀ /a]			Anthropogener Anteil [%]		
	1990	1995	1999	1990	1995	1999
Materialkataster auf Kreisfläche						
Galvanisierter Stahl	81	74	66	71	67	62
Zink	4	4	3	71	67	62
Aluminium	55	49	44	73	69	64
Sandstein	41	30	22	71	61	48
Kalkstein	48	37	29	66	56	44
Andere Natursteine	28	21	16	71	61	49
Putz	55	39	29	75	63	48
<i>Summe</i>	<i>310</i>	<i>250</i>	<i>210</i>			
Materialkataster auf Siedlungsfläche						
Galv. Stahl	79	72	64	71	67	62
Zink	4	4	3	71	67	62
Aluminium	54	48	43	73	69	64
Sandstein	40	29	22	71	61	48
Kalkstein	48	37	28	66	56	44
Andere Natursteine	28	21	16	71	61	49
Putz	54	38	28	75	63	48
<i>Summe</i>	<i>310</i>	<i>250</i>	<i>200</i>			

Die höchsten Instandsetzungskosten mit 81, 74 und 66 Millionen Euro wurden für galvanisierten Stahl abgeschätzt, gefolgt von Aluminium (55, 49, 44 Millionen Euro), Putz (55, 39 und 29 Millionen Euro) und den Natursteinen. Die Gesamtkosten ergeben sich zu 310, 250 und 210 (bzw. 200) Millionen Euro in 1990, 1995 und 1999. Ein Vergleich mit der vorherigen Studie, die eine etwas andere Datenbasis und methodische Vorgehensweise aufwies, zeigt dass die Ergebnisse sehr ähnlich sind. Unter Verwendung der von der UN ECE abgeleiteten Funktionen wurden damals Gesamtkosten von 430 Millionen DM/a für die Luftbelastung in den Jahren 1993 bis 1995 ermittelt (MAYERHOFER ET AL. 1998).

Der abgeschätzte anthropogene Einfluss nimmt von etwa 70 Prozent in 1990 für einige Materialien auf bis zu etwa 50 Prozent in 1999 ab. Diese Abnahme ist für die betrachteten metallischen Oberflächen wesentlich geringer. Die geringen Unterschiede zwischen der Berechnung

auf Kreisflächen und der Berechnung auf Siedlungsflächen übertragen sich von den Instandsetzungsflächen auf die Kostenabschätzungen.

Tab. 19: Abgeschätzte jährliche Instandsetzungsfläche und jährlicher Instandsetzungsanteil für die grob quantifizierbaren Materialoberflächen in den Jahren 1990, 1995 und 1999

	Instandsetzungsfläche [km ² /a]			Instandsetzungsanteil [%/a]		
	1990	1995	1999	1990	1995	1999
Materialkataster auf Kreisfläche						
Alkyd-Melamin-Anstrich	10	10	10	0.5	0.5	0.5
Slizium-Alkyd-Anstrich	32	29	28	1.6	1.4	1.3
PVC-Fenster	19	18	19	1.7	1.6	1.6
Kupfer	1.9	2.2	2.4	5.3	4.5	3.8
Materialkataster auf Siedlungsfläche						
Alkyd-Melamin-Anstrich	9	10	10	0.5	0.5	0.5
Slizium-Alkyd-Anstrich	31	28	27	1.6	1.4	1.3
PVC-Fenster	19	18	18	1.6	1.6	1.5
Kupfer	1.8	2.2	2.3	5.1	4.4	3.7

Tab. 20: Abgeschätzte jährliche Instandsetzungskosten im Bezug auf die grob quantifizierbaren zusätzlichen Materialoberflächen

Material	Kosten [Mio € ₂₀₀₀ /a]		
	1990	1995	1999
Materialkataster auf Kreisfläche			
Alkyd-Melamin-Anstrich	150	150	150
Slizium-Alkyd-Anstrich	480	440	420
PVC-Fenster	85	82	84
Kupfer ¹	280	340	360
Materialkataster auf Siedlungsfläche			
Alkyd-Melamin-Anstrich	140	140	140
Slizium-Alkyd-Anstrich	460	420	400
PVC-Fenster	84	81	83
Kupfer ¹	270	330	350

¹ unkorrigierte Werte, zur Diskussion siehe Text

Die berechneten Werte der Gesamtkosten entsprechen eher unteren Abschätzungen, da wichtige Materialoberflächen wie Beton und Fassadenanstriche nicht berücksichtigt werden konnten, weil für sie keine Dosis-Wirkungsfunktionen vorlagen oder die Abschätzungen mit hohen Ungenauigkeiten verbunden waren. Für einen Teil der Anstriche an Wohngebäuden konnte eine grobe Abschätzung durchgeführt werden, indem der Anteil der angestrichenen Oberfläche auf den die berechneten Funktionen anwendbar sind mit 10% für Alkyd-Melamin und 25% für Silizium-Alkyd-Anstrich angenommen wurde. Das entspricht den Annahmen die in dem EU Pro-

jekt ExternE Core Transport für Oberflächenanteile gestrichenen Stahls und gestrichenen galvanisierten Stahls in Europa getroffen wurden (FRIEDRICH UND BICKEL 2001, TIDBLAD 1999). Außerdem konnten grobe Abschätzungen für PVC-Fenster und Kupfer durchgeführt werden. Die Ergebnisse der Berechnungen sind in Tabelle 19 und Tabelle 20 dargestellt.

Die errechneten Instandsetzungsflächen für die Anstriche und PVC-Fenster betragen mit um die 10 und um die 30, bzw. 19 Quadratkilometer wesentlich mehr als bei den anderen Materialien. Für die Anstriche entsprechen diese Zahlen nur etwa 0.5 bzw. ca. 1.5 % der gesamten Anstrichfläche. Allerdings konnten aufgrund der Funktionen nur 35% der gesamten Fläche berücksichtigt werden. Rechnet man die Prozentanteile hoch, so wird bei den Alkyd-Melamin-Anstrichen mit 0.5 von 10 Prozentpunkten 5% des berücksichtigten Materials geschädigt, bei den Silizium-Alkyd-Anstrichen mit ca. 1.5 von 25 Prozentpunkten etwa 6%. Bei den PVC-Fenstern errechnet sich auf die Weise eine Schadensquote von etwa 5% der Materialoberfläche, die pro Jahr instandgesetzt werden muss. Die Abschätzung für Kupfer ergibt ca. 2 Quadratkilometer. Die geschädigten Anteile liegen bei 5 bis 4 Prozent. Diese hohen Anteile ergeben umgerechnet eine Lebensdauer von nur etwa 20 bis 25 Jahren unter den Umweltbedingungen von 1990 bis 1999. Das widerspricht der tatsächlichen Lebensdauer von Kupfer, die mit 80 bis ca. 120 Jahren anzunehmen ist. Als Grund für diese Diskrepanz wird die relativ starke Abhängigkeit der Kupferfunktion mit der Zeit zusammen mit der sehr langen Lebensdauer von Kupfer vermutet. Diese führen dazu dass die Korrosionsrate im achten Jahr für Kupfer keine gute Näherung für einen durchschnittliche Korrosionsrate darstellt. Die tatsächlichen Instandsetzungskosten für Kupfer werden unter Berücksichtigung der typischen Lebensdauer schätzungsweise etwa um einen Faktor 3 bis 4 niedriger liegen.

In Tabelle 20 ist zu sehen, dass die Summe der grob abgeschätzten Kosten für Anstriche, PVC-Fenster und Kupfer die Höhe der berechneten Kosten für die restlichen Materialien übertrifft. Wendet man zur Korrektur der Kupferergebnisse einen Faktor von 3-4 an, so dominieren die abgeschätzten Werte für die Anstriche das Ergebnis deutlich.

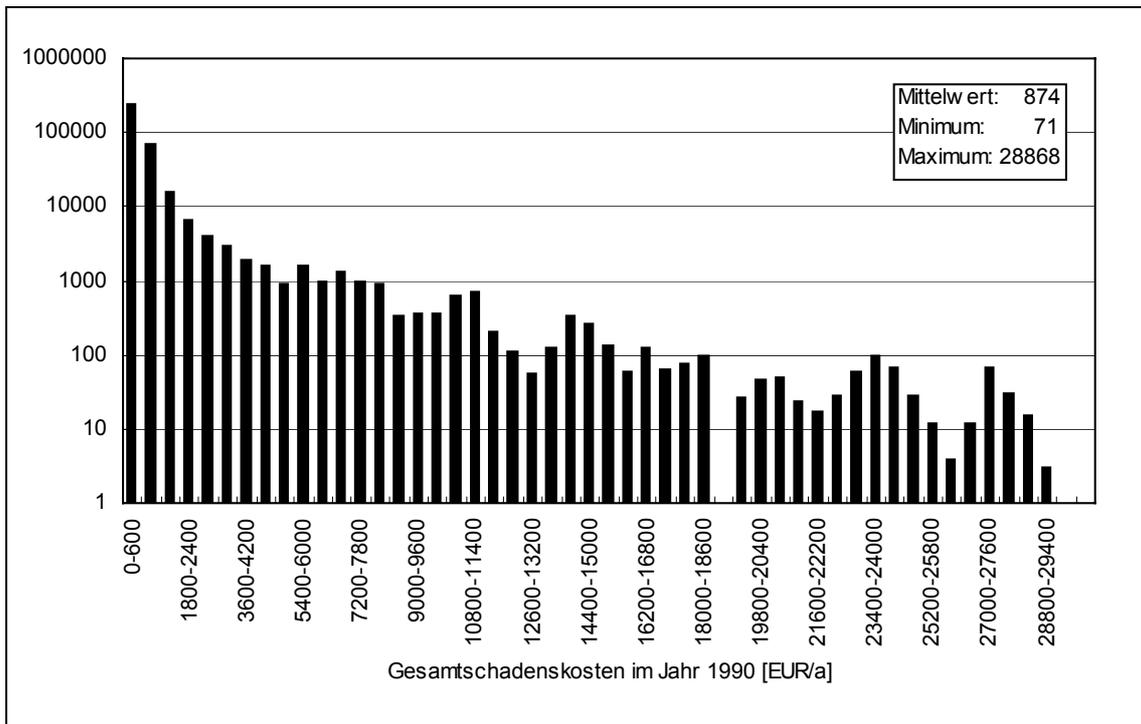


Abb. 20: Histogramm der Gesamtschadenskosten in 1990

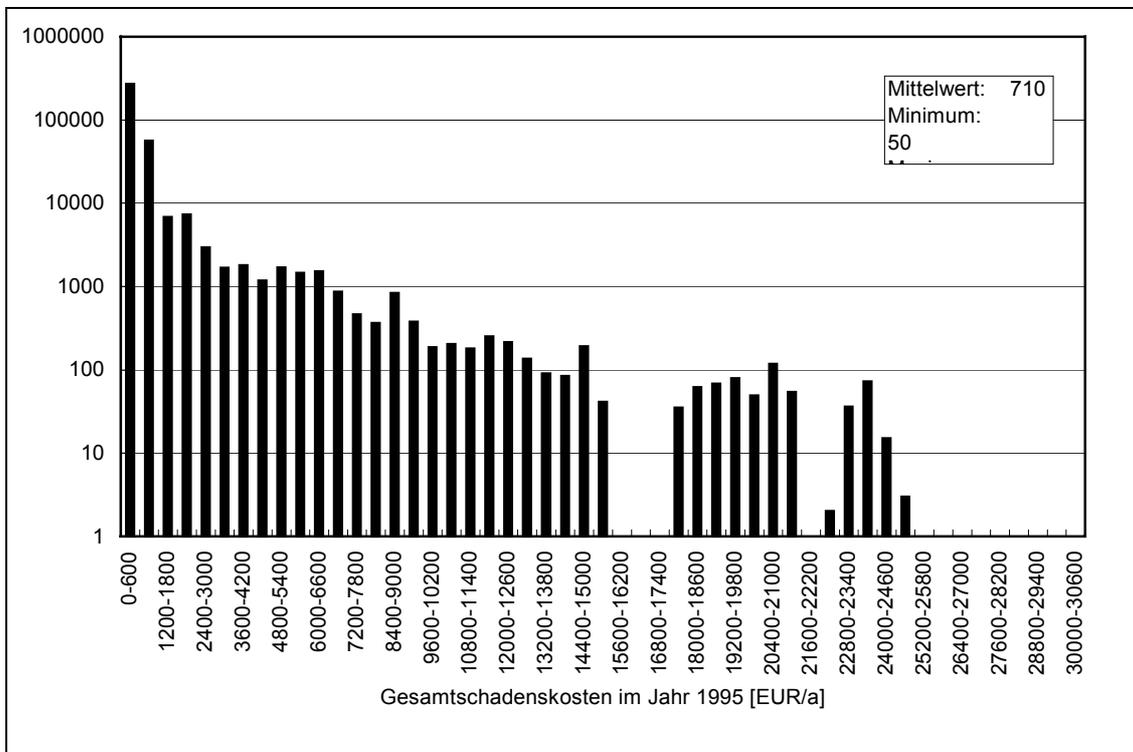


Abb. 21 Histogramm der Gesamtschadenskosten in 1995

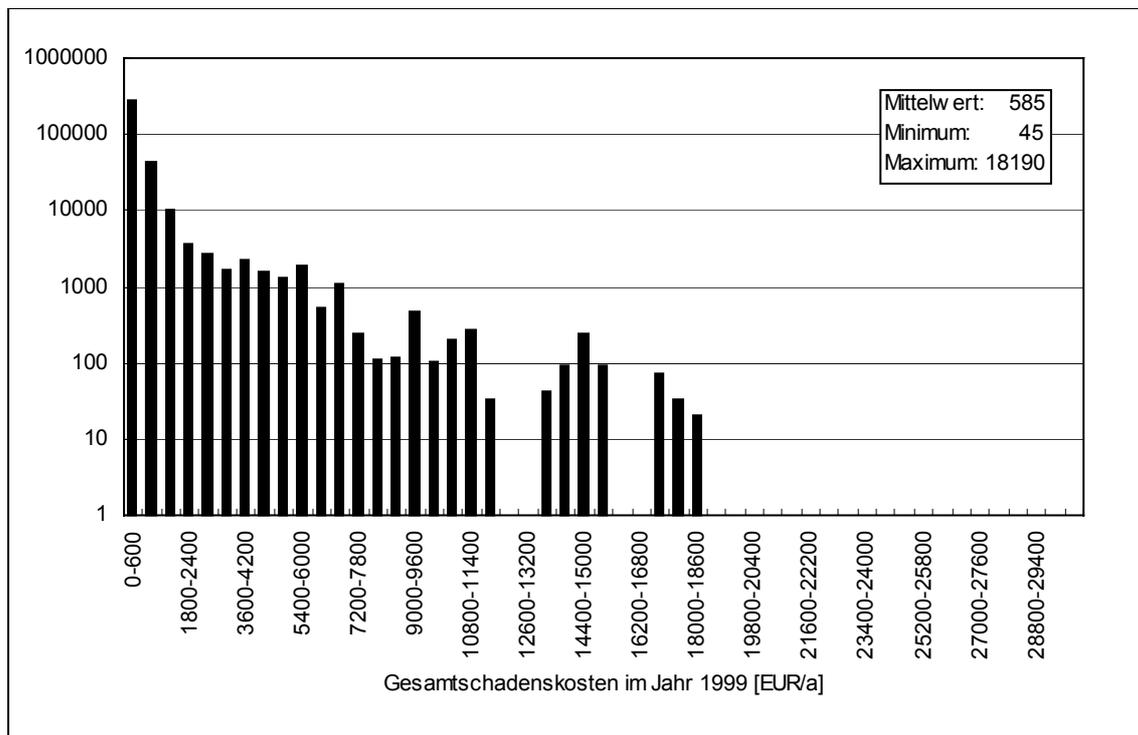


Abb. 22 Histogramm der Gesamtschadenskosten in 1999

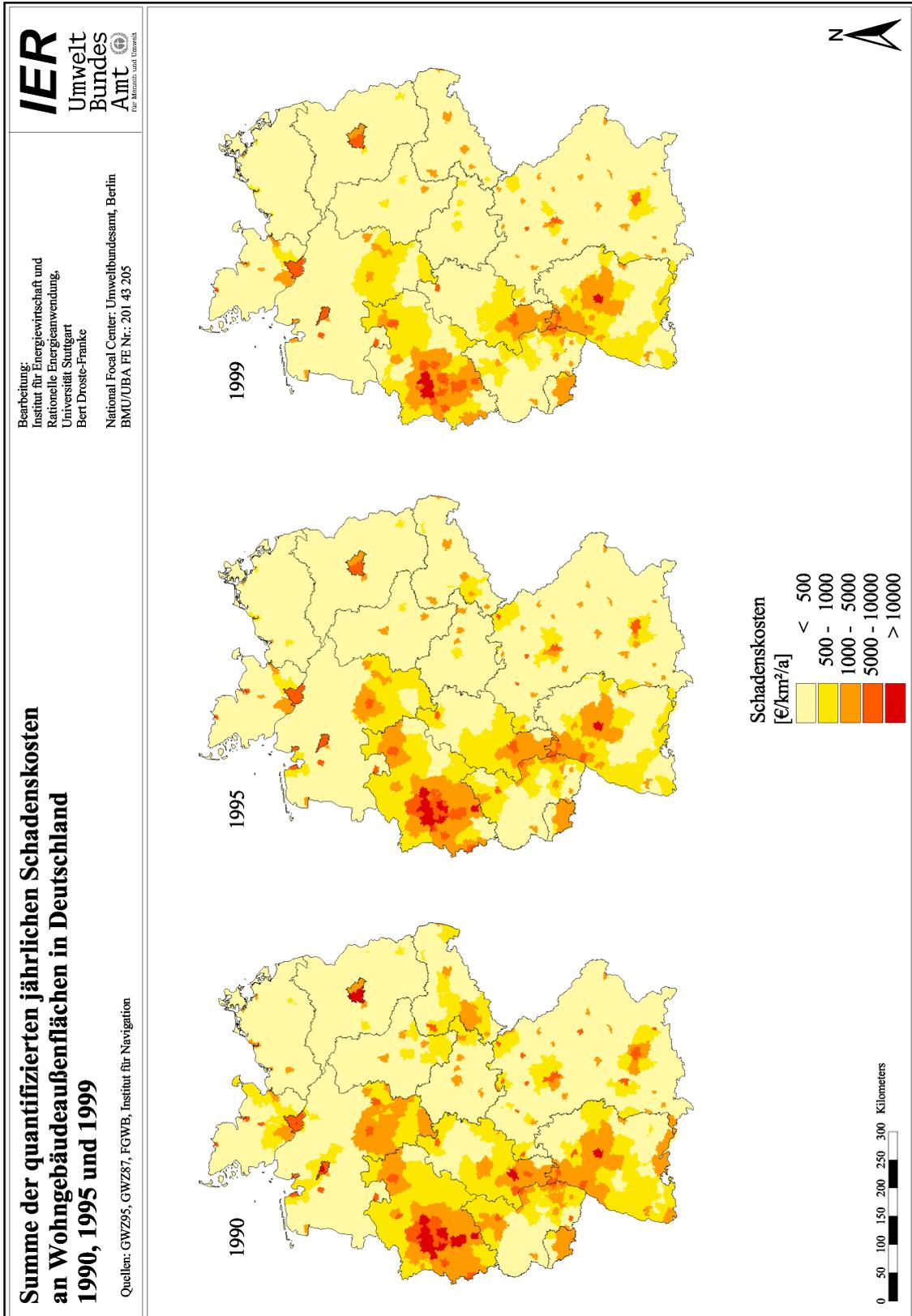
Abbildung 20 bis 22 zeigen die Häufigkeitsverteilungen der Schadenskosten in den einzelnen Jahren. Betrachtet werden hier nur die relativ sicher quantifizierbaren Materialenschäden, die in Tabelle 17 und Tabelle 18 aufgelistet sind. Während sich der Mittelwert der Verteilungen zwischen den Jahren von 71 auf 50 und 45 €/a ändert, reduziert sich der Maximalwert von 29000 über 25000 zu 18000, was deutlich in den Verteilungen zu erkennen ist. Zudem nimmt wie zu erwarten der Anteil der niedrigen Klassen zu. Lücken in den Verteilungen sind darauf zurückzuführen, dass die Materialoberflächen jeweils gleichmäßig über gesamte Kreisflächen verteilt sind und damit an der Kreisgrenze Sprünge auftreten. So werden in Gegenden hoher Konzentrationen für eine gewisse Zahl der Zellen bei in etwa gleicher Konzentration fast dieselben Werte berechnet. Für die Nachbarzellen aus einem anderen Kreis ergeben sich aber selbst bei gleicher Konzentration bereits völlig andere Werte.

Die Karten 47 bis 56 zeigen die räumliche Verteilung der Schäden in Deutschland. Karte 47 zeigt die Summe der Instandsetzungskosten ohne die nur unsicher quantifizierbaren Schäden an gestrichenen Oberflächen und PVC-Fenstern. Es ist zu erkennen, dass die meisten der abgeschätzten Materialschäden im westlichen Teil Deutschlands auftreten. Insbesondere in Nordrhein-Westfalen, im südlichen Niedersachsen, im südlichen Hessen und in Teilen Baden-Württembergs. Verbesserungen zwischen den Jahren sind über ganz Deutschland zu erkennen.

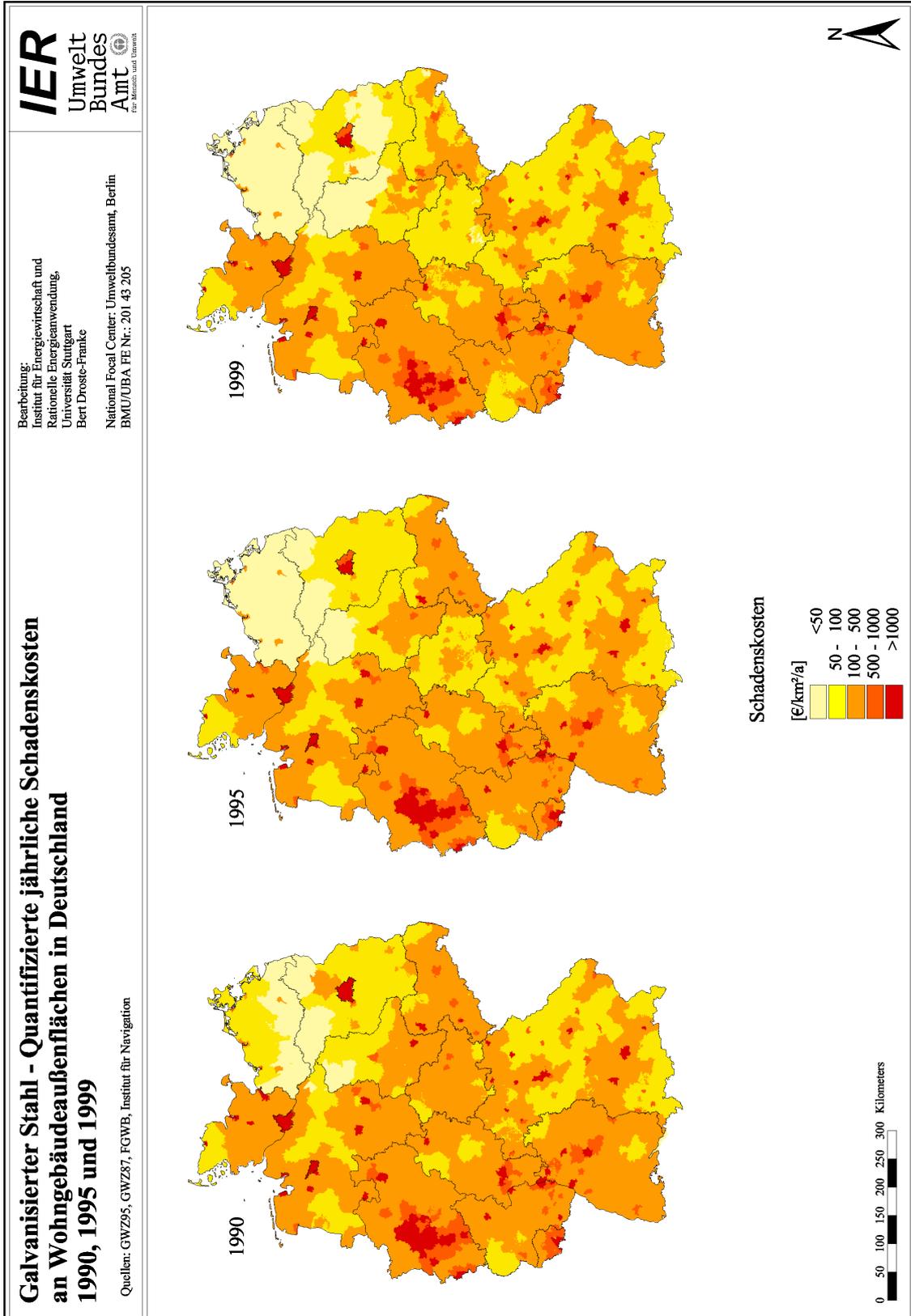
Insbesondere in der Gegend um Zwickau und Chemnitz, sind große Verringerungen in den Instandsetzungskosten zu sehen. Der höchste Wert für Schadenskosten wurde mit etwa 29000 €/km²/a für das Ruhrgebiet abgeschätzt. Weitere Gebiete hoher Kosten in 1990 sind mit um 10000 bis 15000 €/km²/a Köln-Bonn, der Westteil Berlins, Frankfurt, Bremen und Hamburg. In 1999 werden Kosten über 10000 €/km²/a nur noch für das Ruhrgebiet (bis etwa 18000 €/km²/a) und für Stuttgart (ca. 11000 €/km²/a) errechnet.

Die in Karte 47 zusammengefassten Gesamtkosten sind zusätzlich noch einmal einzeln für jedes Material in den Karten 48 bis 56 dargestellt. Außer für Zink wurde für alle Materialien dieselbe Skala (50 bis 1000 €/m²/Jahr) verwendet. Die Werte in der Zinkkarte sind so gering, dass sie bei dieser Skala kaum gesehen werden können. Die quantifizierten Instandsetzungskosten für galvanisierten Stahl weisen die größte Verteilung in Deutschland auf. Bei den meisten anderen Materialien konzentrieren sich die Schäden auf städtische Zentren und etwas ländlichere Gebiete in den bereits oben erwähnten Gegenden. Ein weiterer Vergleich der Karten zeigt, dass Schäden in der Gegend um Zwickau und Chemnitz vor allem auf Schäden an Oberflächen mit galvanisiertem Stahl, Putz und Aluminium zurückzuführen sind. Schaut man sich die Dosiswirkungsbeziehungen und die starke Veränderung in den Korrosionsraten zwischen 1990 und 1999 an, so sind für die quantifizierten Schäden insbesondere die hohen SO₂ Konzentrationen in 1990 in der Region verantwortlich zu machen. In 1999 hat sich die Situation wesentlich verbessert.

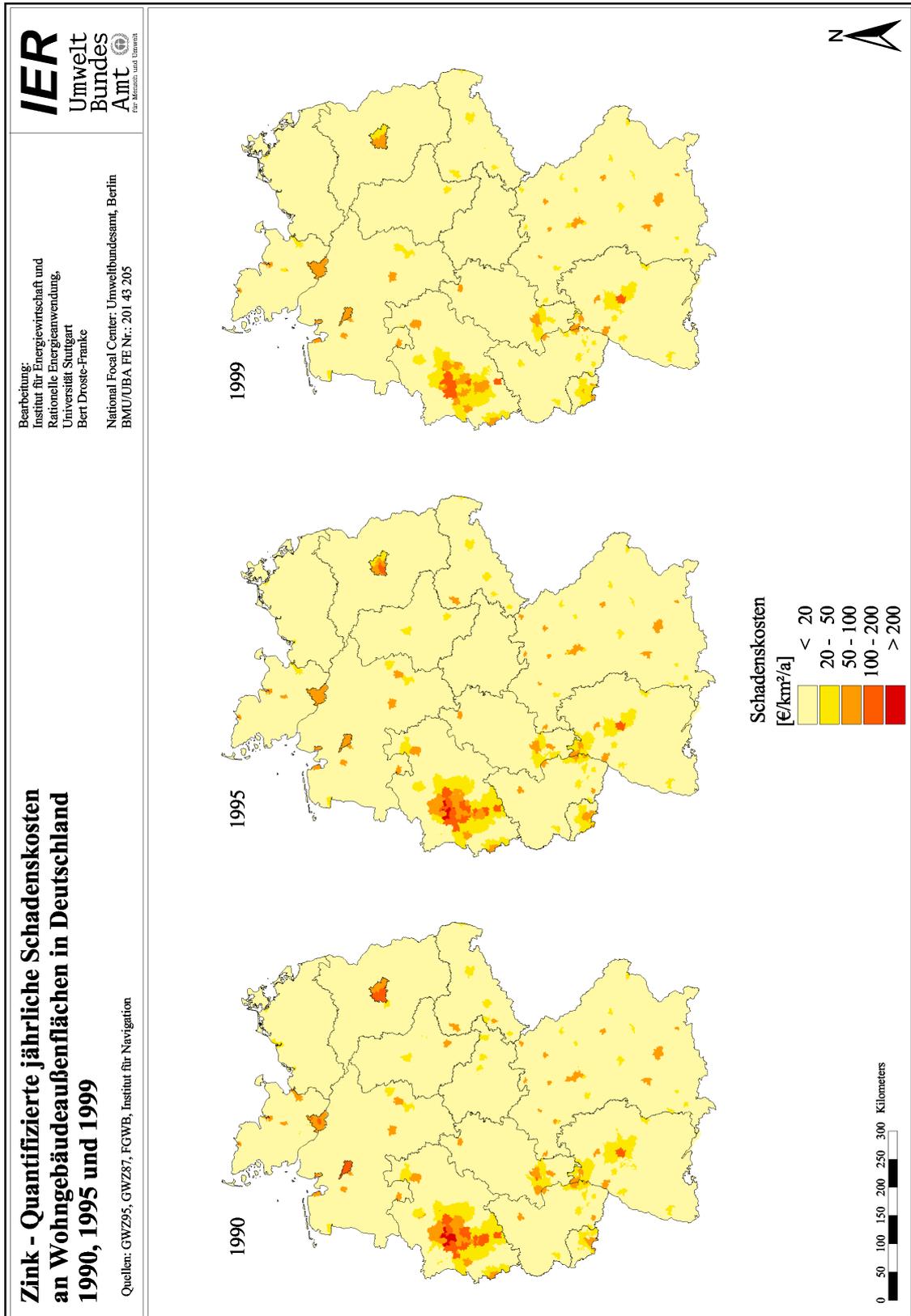
Zusätzlich zu den relativ sicher quantifizierbaren Schäden sind auch die Karten der Schäden an Anstrichflächen dargestellt. Schon an der gewählten Skala, die um einen Faktor zehn höher liegt und damit der Skala für die Summe der relativ sicher quantifizierten Kosten entspricht, ist zu erkennen, dass die Schäden wesentlich höher sind. Für Silizium-Alkyd-Anstriche werden Werte mit bis über 31000 €/km²/a beobachtet. Diese höchsten Maximalwerte treten ebenfalls in 1990 im Ruhrgebiet auf. Die Werte für Alkyd-Melamin-Anstriche sind durchweg niedriger. Auch bei den Anstrichen ist zwischen den Jahren ein Rückgang der Schäden insbesondere für die Region um Zwickau und Chemnitz zu beobachten.



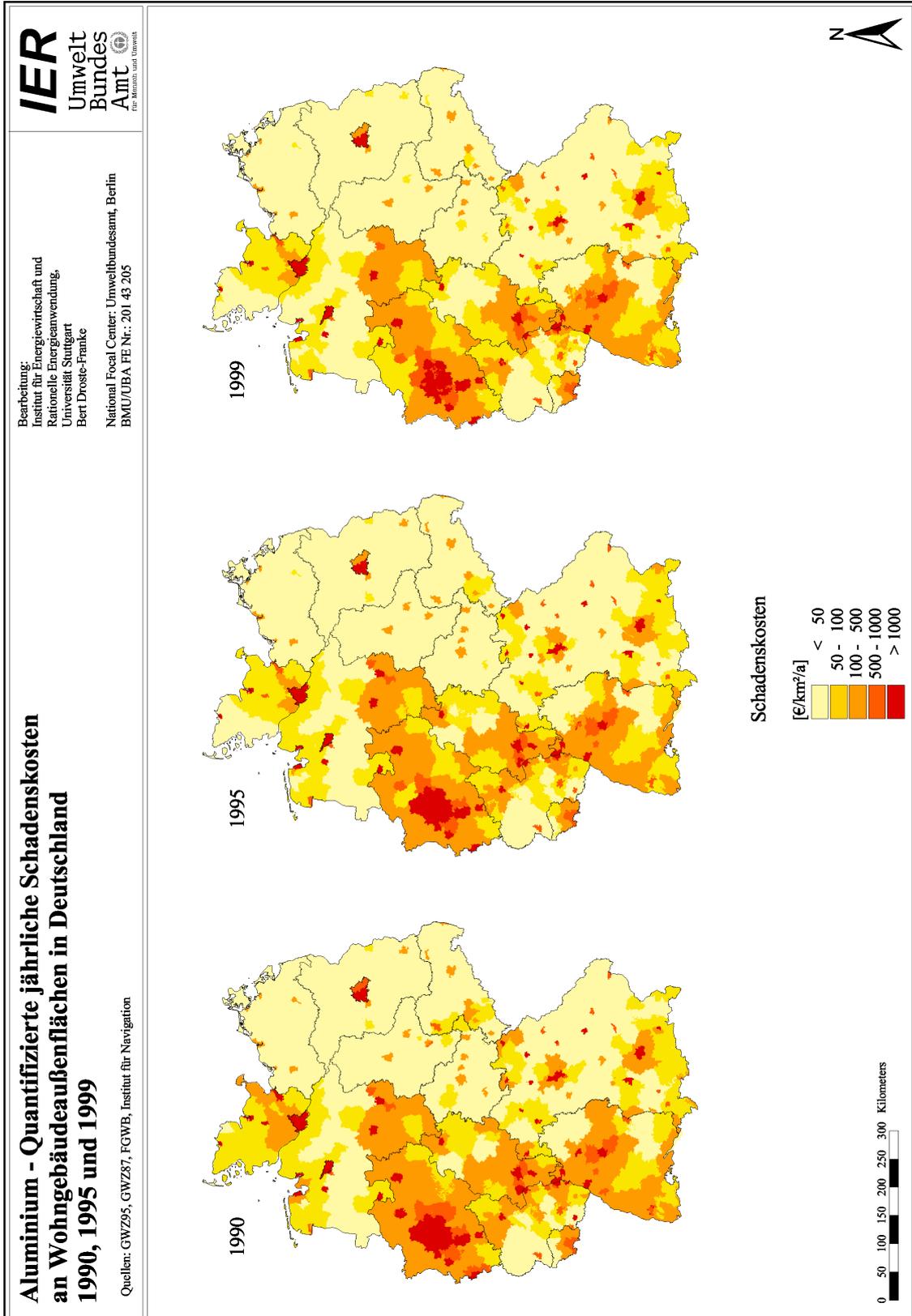
Karte 47: Quantifizierte Schadenskosten ohne Anstriche, PVC-Fenster und Kupfer



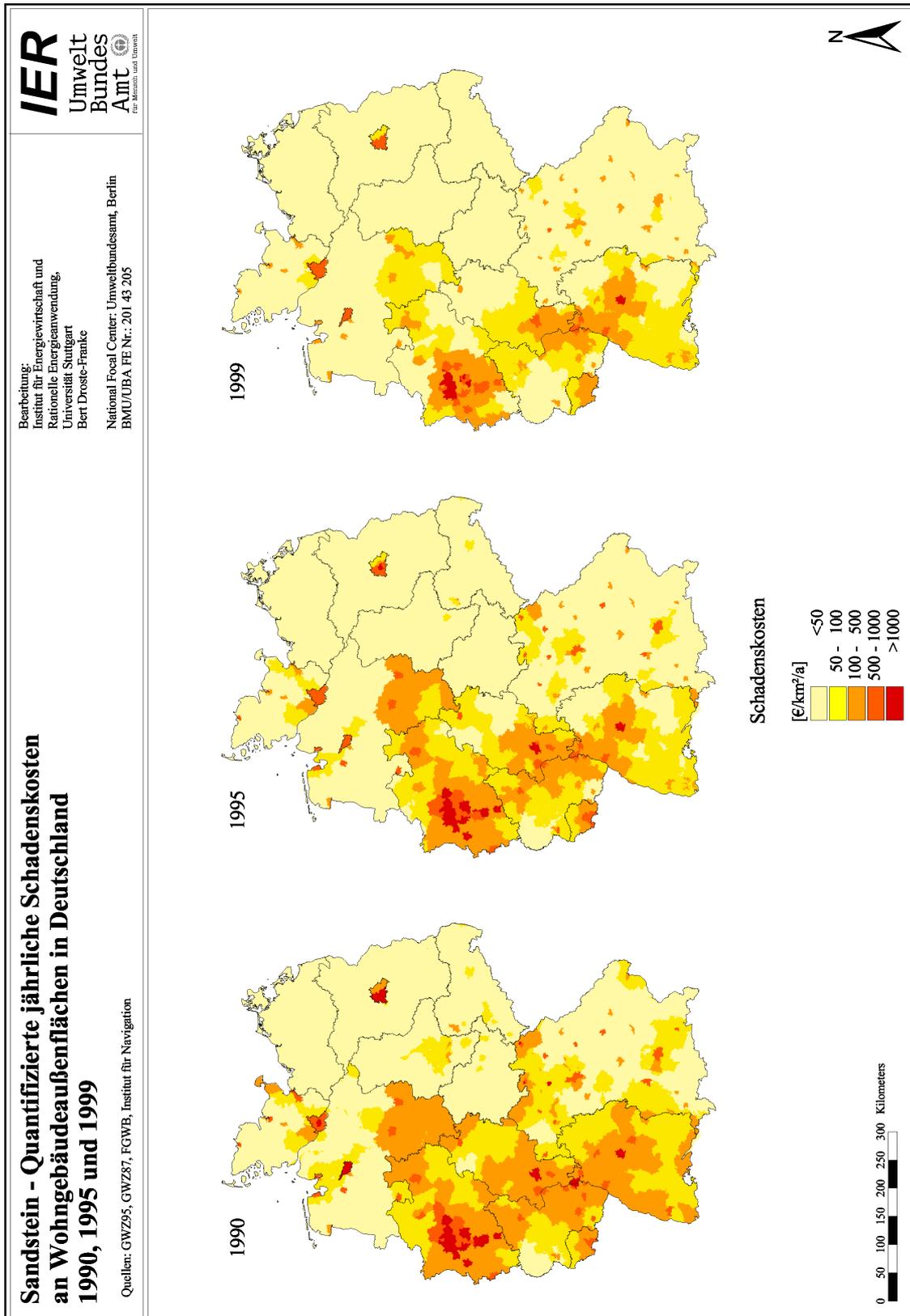
Karte 48: Galvanisierter Stahl - Quantifizierte Schadenskosten in 1990, 1995 und 1999



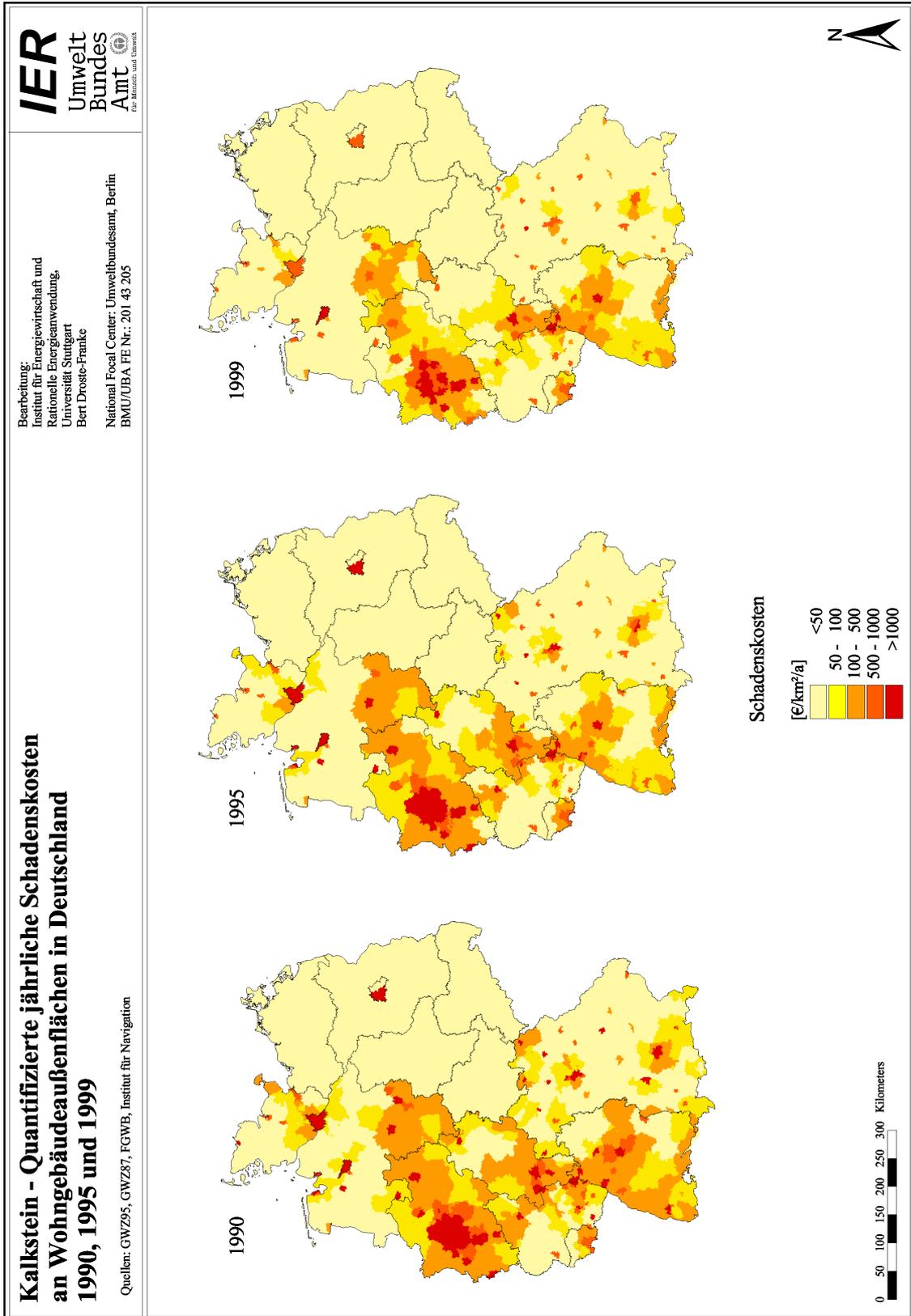
Karte 49: Zink - Quantifizierte Schadenskosten in 1990, 1995 und 1999



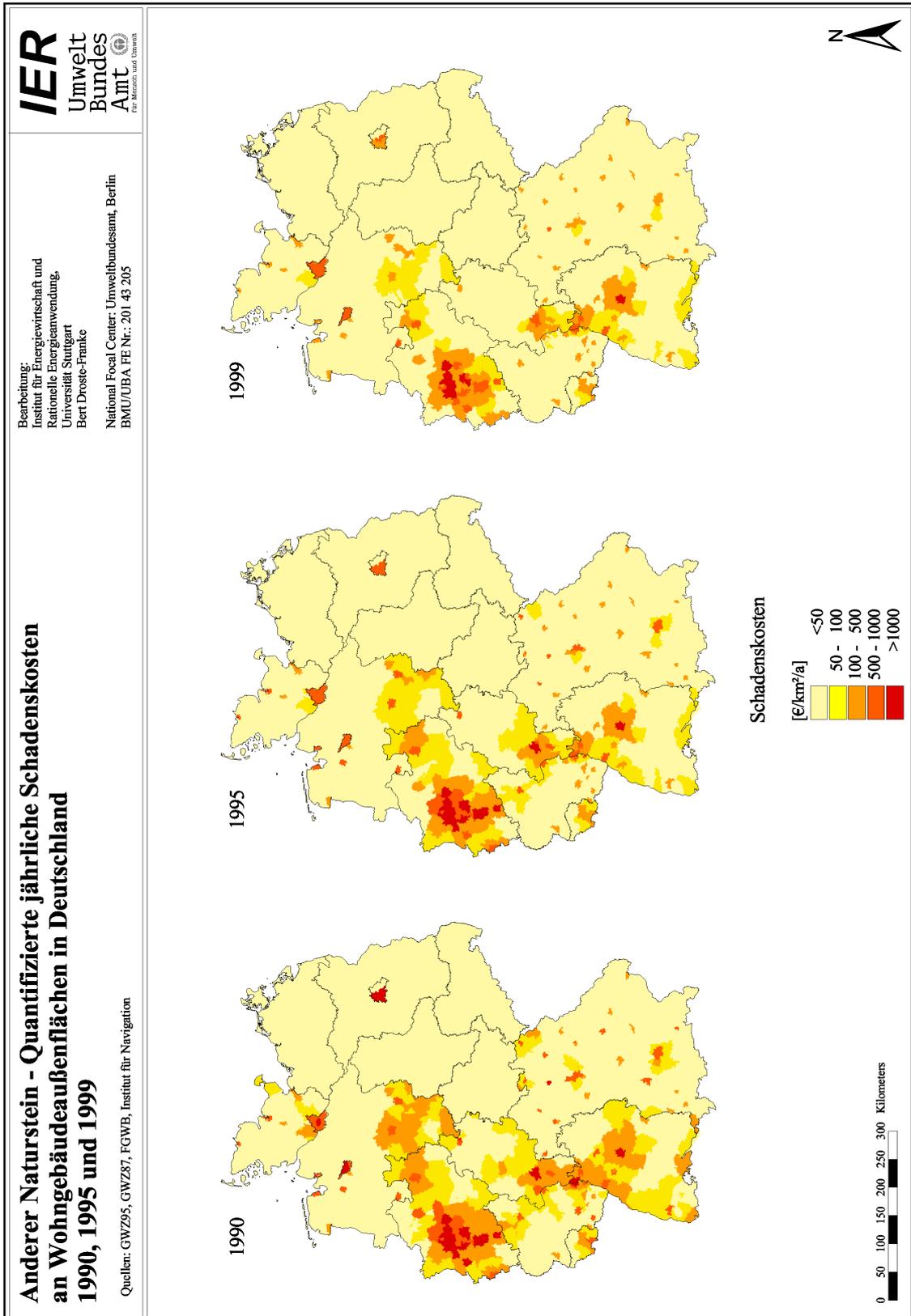
Karte 50: Aluminium - Quantifizierte Schadenskosten in 1990, 1995 und 1999



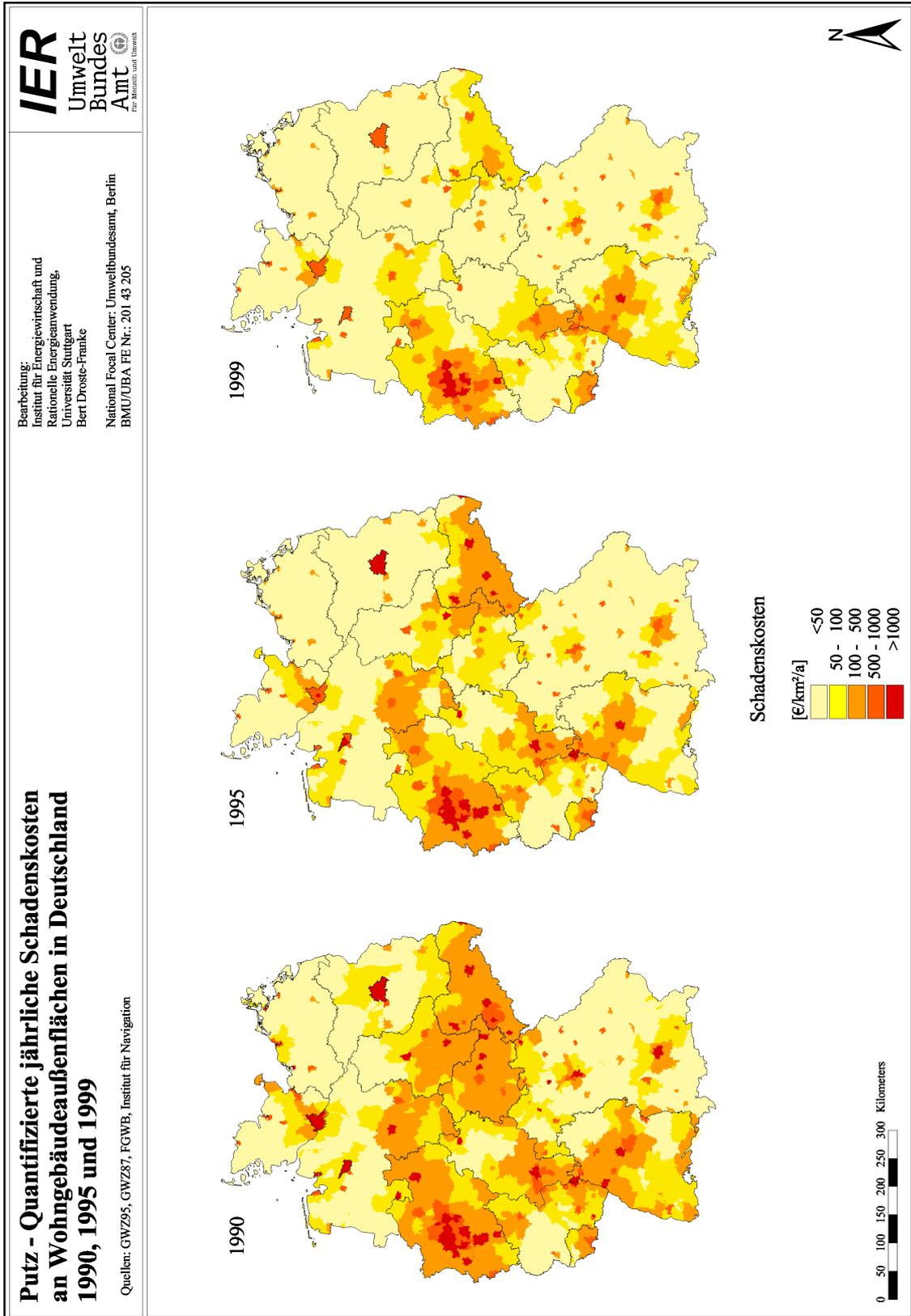
Karte 51: Sandstein - Quantifizierte Schadenskosten in 1990, 1995 und 1999



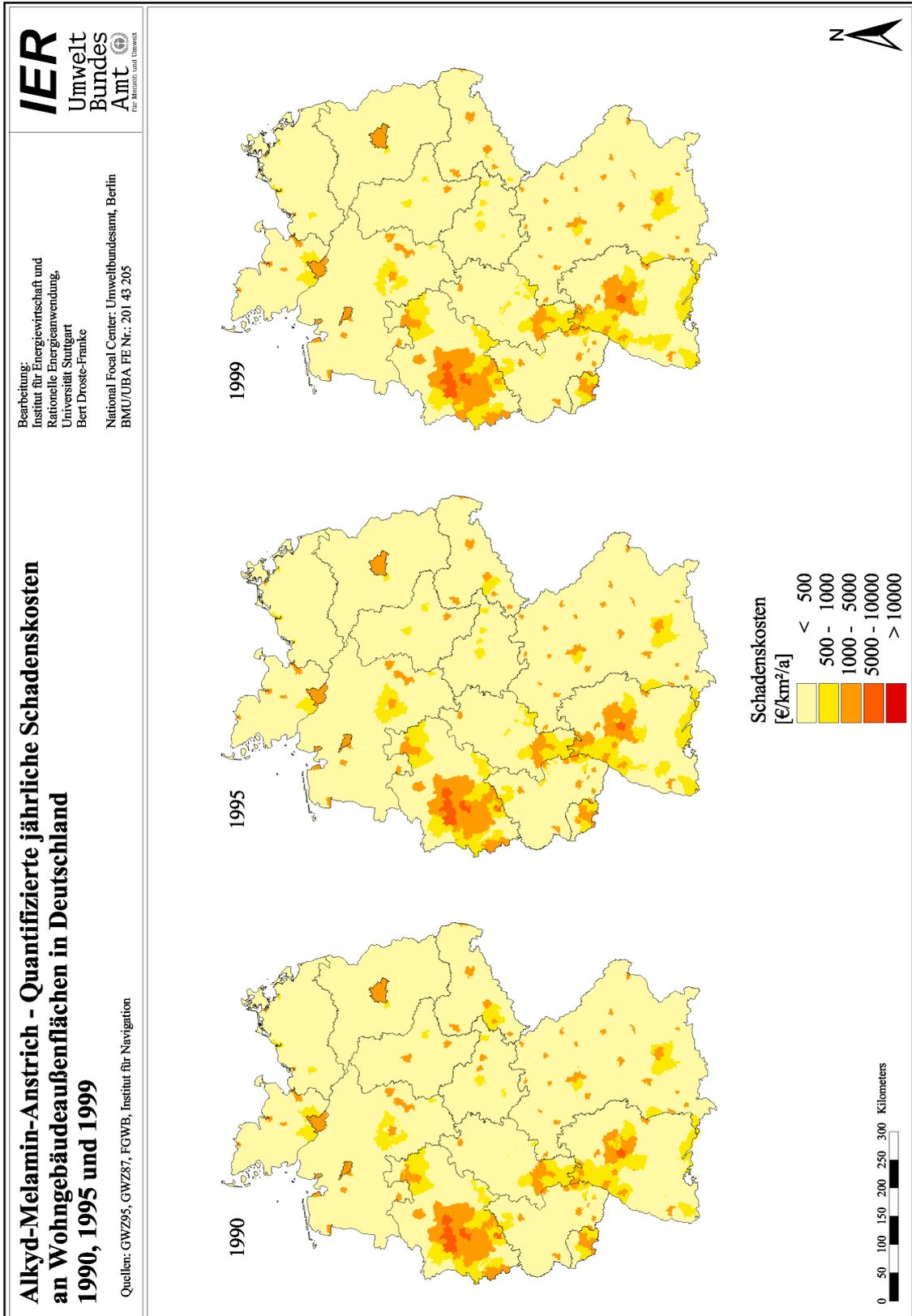
Karte 52: Kalkstein - Quantifizierte Schadenskosten in 1990, 1995 und 1999



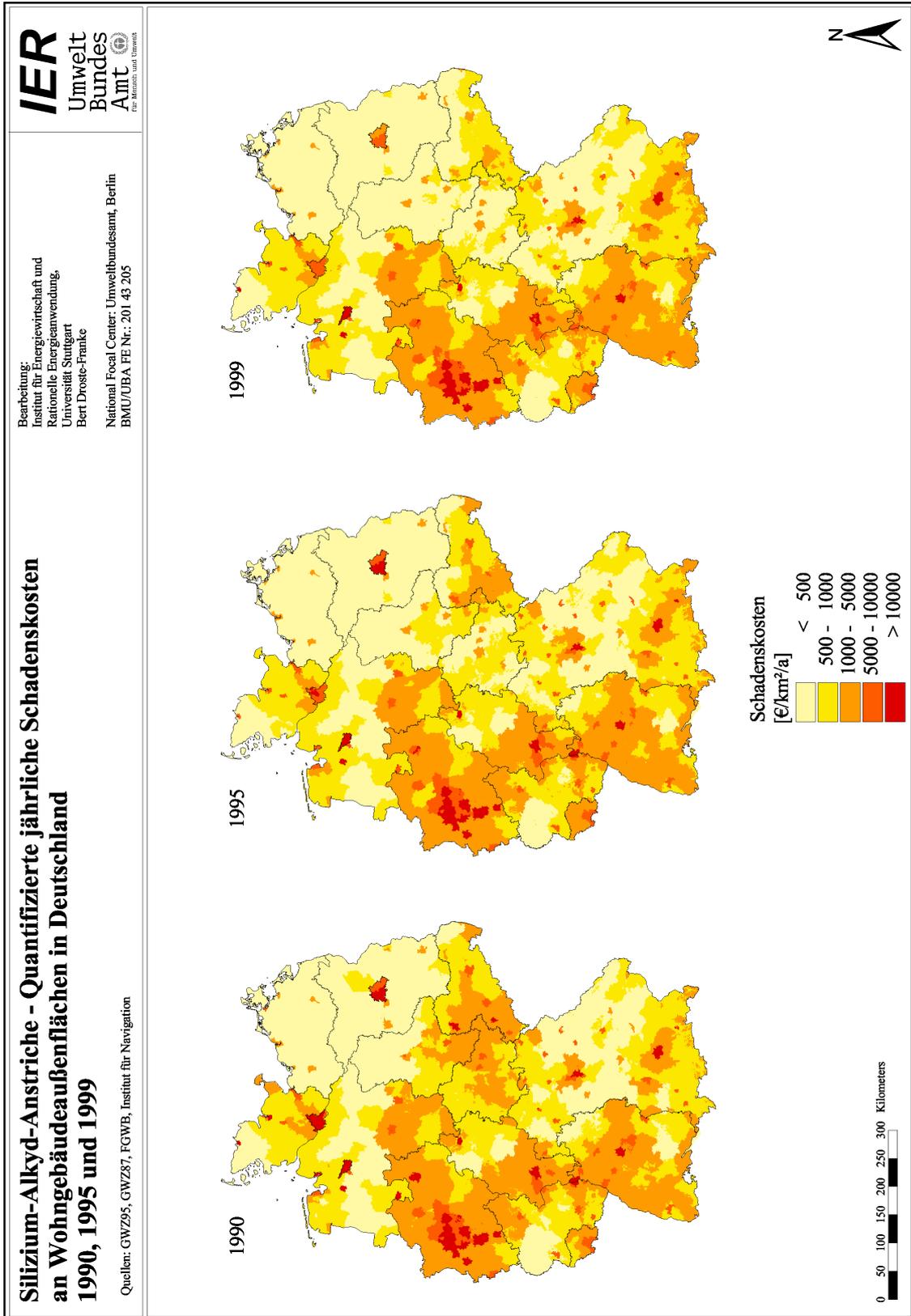
Karte 53: Andere Natursteine - Quantifizierte Schadenskosten in 1990, 1995 und 1999



Karte 54: Putz - Quantifizierte Schadenskosten in 1990, 1995 und 1999



Karte 55: Alkyd-Melamin-Anstriche - Quantifizierte Schadenskosten in 1990, 1995 und 1999



Karte 56: Silizium-Alkyd-Anstriche - Quantifizierte Schadenskosten in 1990, 1995 und 1999

3.3.2 Sensitivitätsanalyse der quantifizierten Schadenskosten

In diesem Abschnitt werden einzelne bekannte Unsicherheiten in der angewandten Methodik und den Eingangsgrößen auf ihre Auswirkung auf die Ergebnisse hin ausgewertet. Im Mittelpunkt der Untersuchung stehen der Einfluss der Berücksichtigung verschiedener Diskontraten, Variationen im abgeleiteten Materialinventar und Variationen in den kritischen Werten und den spezifischen Instandsetzungskosten. Somit werden ausgewählte Parameter mit großen Unsicherheiten und starkem Einfluss auf die Ergebnisse untersucht. Es wird keine vollständige systematische Sensitivitätsanalyse durchgeführt, vielmehr erfolgt auf diese Weise eine Diskussion der größten bekannten Unsicherheiten in der Berechnung der Instandsetzungskosten. Auswirkungen von Unsicherheiten in anderen Eingangsdaten wie z.B. Schadstoffkonzentrationen und Klimaparametern werden nicht berücksichtigt. Die Analyse beschränkt sich auf die Berechnung der relativ sicher quantifizierbaren Schadenskosten.

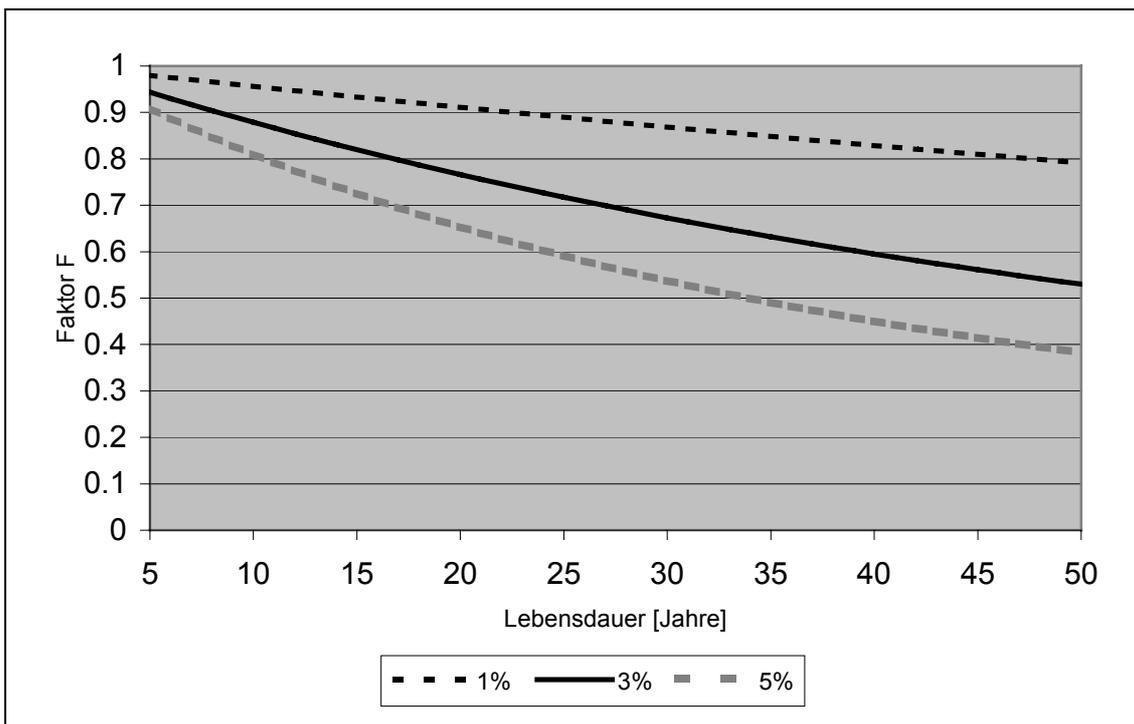


Abb. 23: Einfluss der Annahme verschiedener Zinssätze auf das Ergebnis

Abbildung 23 zeigt den Verlauf des Korrekturfaktors F in Abhängigkeit von der Lebensdauer und dem angenommenen Zinssatz (s. auch Kapitel 3.1.2). Die Berücksichtigung einer Diskontrate ungleich Null hat je nach Lebensdauer der Materialien einen unterschiedlichen Einfluss auf die Ergebnisse. Bei mittleren Lebensdauern von 10 bis zwanzig Jahren erhält man etwa 75 bis

knapp 90 Prozent des Ergebnisses bei einer typischen Diskontrate von 3%. Bei längeren Lebensdauern nimmt der Einfluss der Diskontrate stark zu.

Die im Materialkataster angegebenen Materialoberflächen gehen linear in die Berechnung der Ergebnisse ein. Die damit verbundenen Unsicherheiten werden in der Summe mit etwa 20-30% abgeschätzt. Sie entstehen insbesondere durch die Weiterverarbeitung der Daten aus den Wohnungs- und Gebäudezählungen des statistischen Bundesamtes und deren Zuordnung zu Gebäude- und Siedlungstypen. Regional können durchaus höhere oder geringere Abweichungen entstehen. Allerdings sind die Einflüsse durch eine lokale Variation der Verteilung des Materialkatasters als nicht sehr hoch einzuschätzen wie sich durch der genaueren Berechnung der Schadenskosten auf Siedlungsflächen erwiesen hat. Bei dem geringen Unterschied der Werte von maximal etwa 2% ist zu berücksichtigen, dass für die beiden Berechnungsvarianten zusätzlich etwas unterschiedliche Raterverfahren angewandt wurden, die bereits zu einer geringen systematischen Abweichung der Ergebnisse führen kann. Die Ableitung des Materialkatasters stützt sich auf einer Erhebung von Materialoberflächen an repräsentativen Gebäuden in Dortmund und Köln. Diese wird auf ganz Deutschland extrapoliert. Durch regionale Unterschiede in den verwendeten Baumaterialien können weitere Ungenauigkeiten entstehen. Allerdings war zu sehen, dass gerade für das Ruhrgebiet und Köln die höchsten Materialschäden berechnet wurden.

Die Schwankungsbreite der Ergebnisse im Rahmen der in Tabelle 14 und Tabelle 15 angegebenen Minimal- bzw. Maximalwerte für kritische Änderungen und spezifische Instandsetzungskosten ist in Abbildung 24 bis Abbildung 28 zu sehen. Der stärkste Einfluss zeigt sich bei galvanisiertem Stahl. Unter der Annahme der Minimalangabe des kritischen Wertes und der Maximalangabe der Kosten ergibt sich in etwa das dreifache der Kosten. Unter der Annahme des Maximums bei den kritischen Werten und des Minimums in den Kosten erhält man ca. 40% des berechneten Schadens. Bei Naturstein ergeben sich entsprechend lediglich Faktoren von 1.8 und 0.7. In den Ergebnissen konnte man sehen, dass galvanisierter Stahl und Putz dominieren, jedoch auch die anderen Funktionen großen Einfluss auf die Gesamtergebnisse haben. Im Durchschnitt erhält man für die Gesamtkosten unter der Annahme, dass jeweils der maximale Fehler entsteht eine Abweichung nach oben um etwa 110 Prozent und nach unten von 44 Prozent. Da die Schwankungen in den Annahmen für die verschiedenen Materialien voneinander unabhängig sind, kann allerdings mit einer deutlich geringeren Abweichung gerechnet werden.

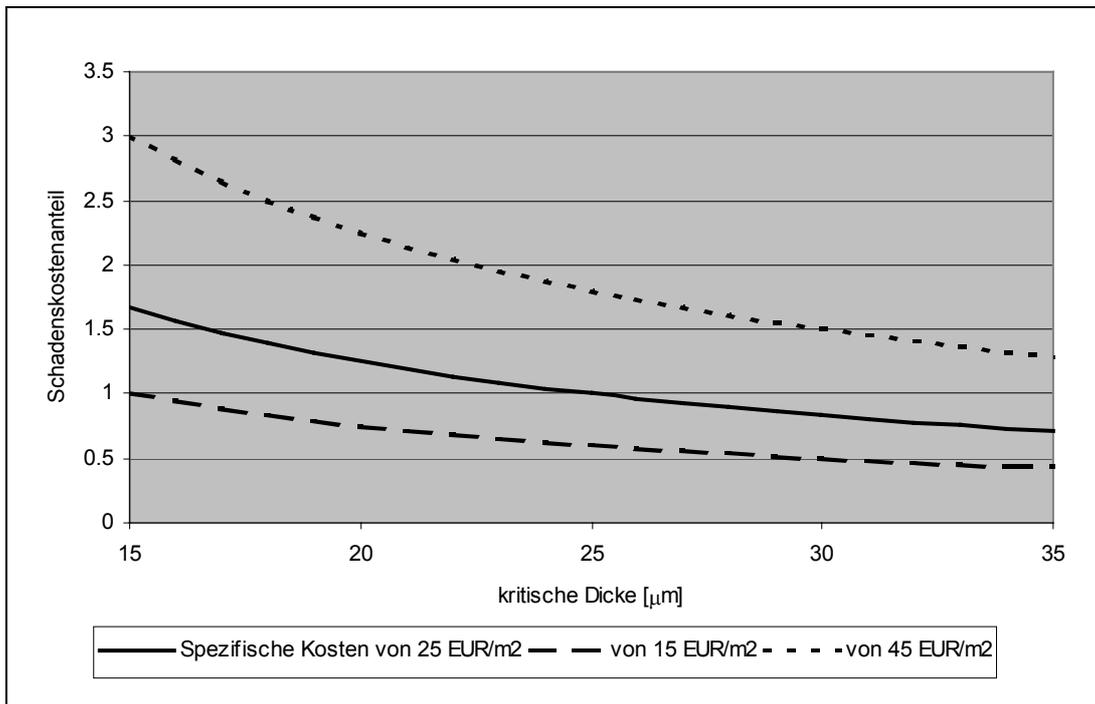


Abb. 24: Variation der Schadenskosten von galvanisiertem Stahl mit der Annahme verschiedener Werte für Kosten und kritische Dicke

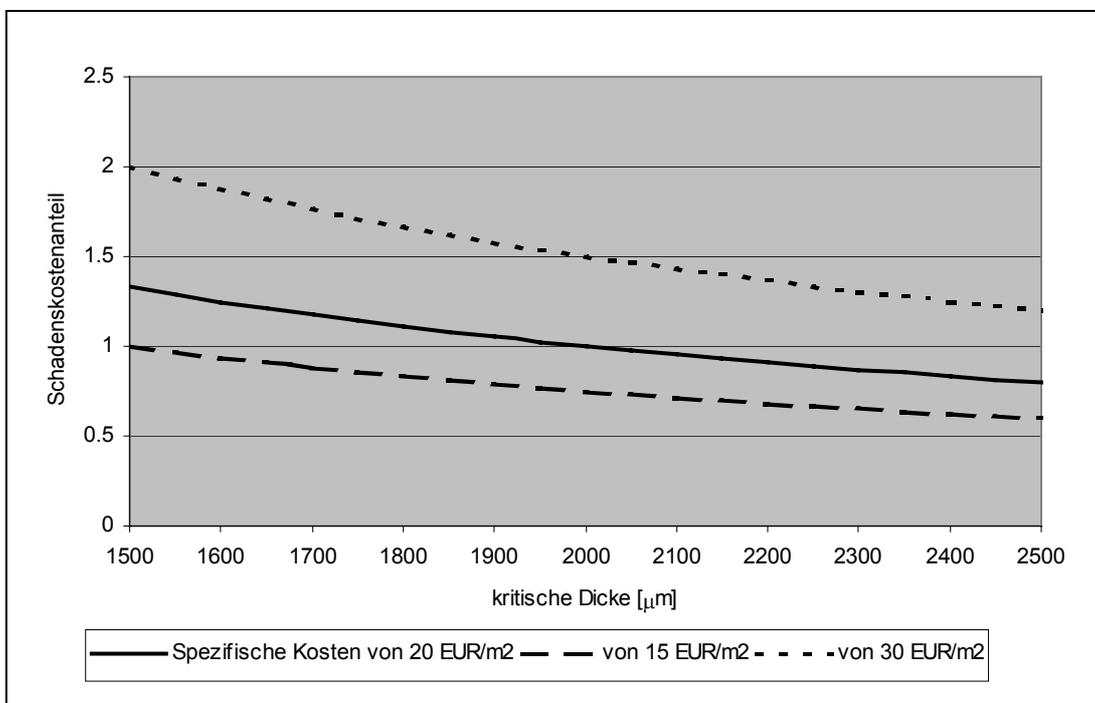


Abb. 25: Variation der Schadenskosten von Zink mit der Annahme verschiedener Werte für Kosten und kritische Dicke

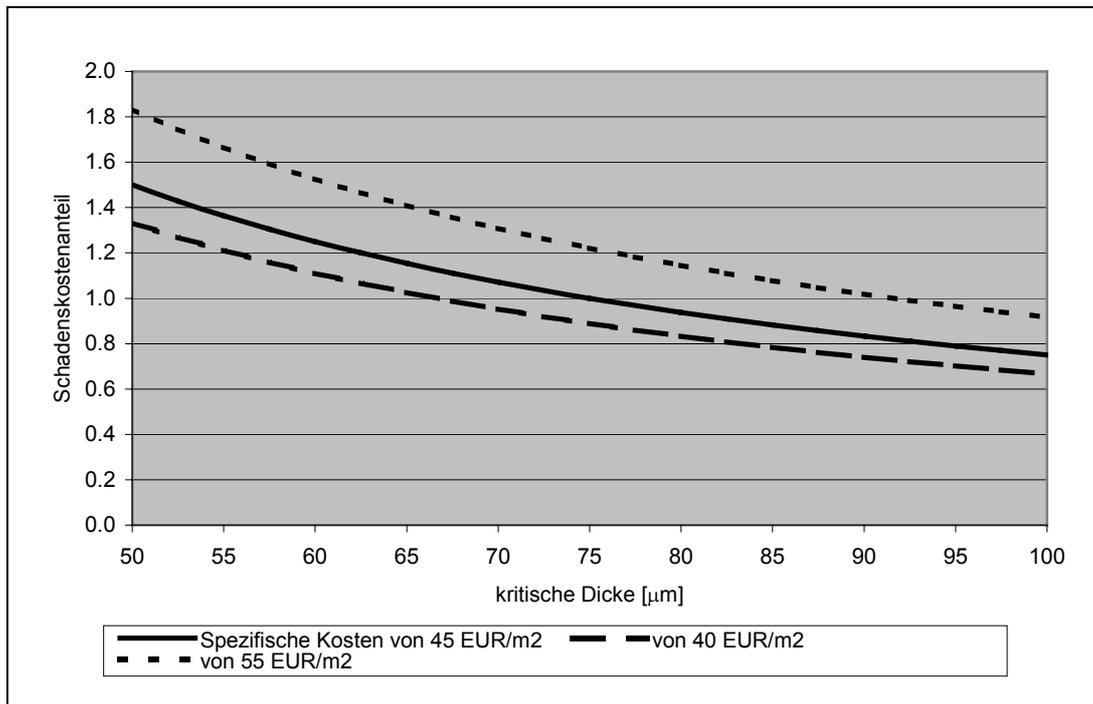


Abb. 26: Variation der Schadenskosten von Aluminium mit der Annahme verschiedener Werte für Kosten und kritische Dicke

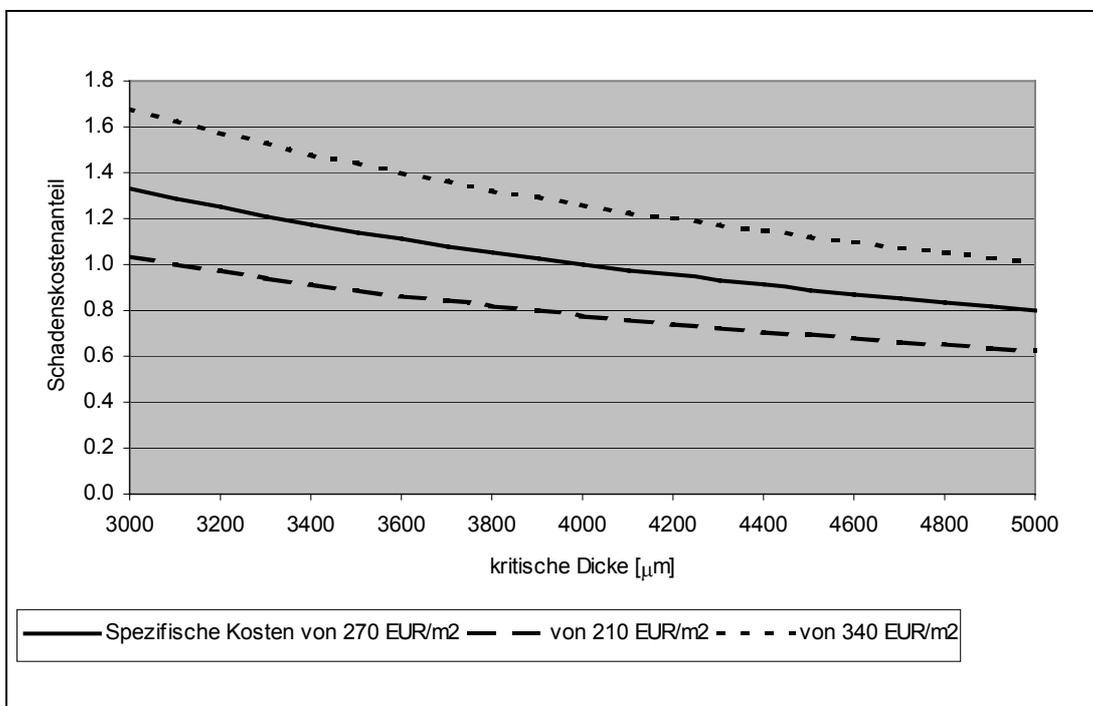


Abb. 27: Variation der Schadenskosten von Natursteinen mit der Annahme verschiedener Werte für Kosten und kritische Dicke

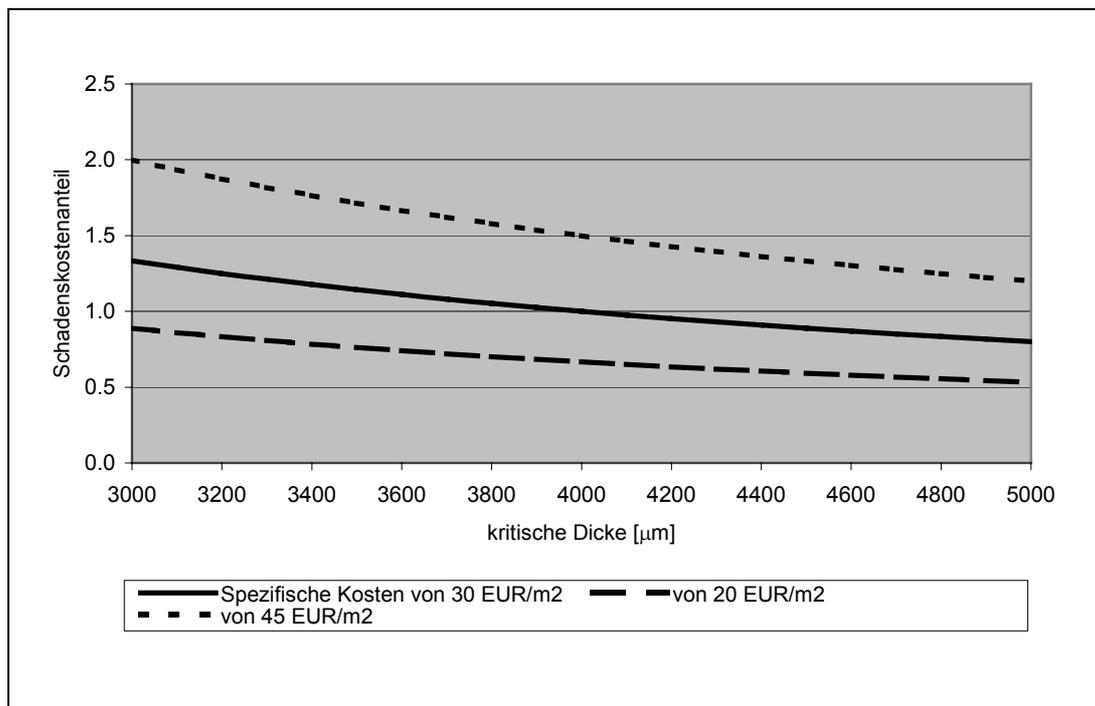


Abb. 28: Variation der Schadenskosten von Putz mit der Annahme verschiedener Werte für Kosten und kritische Dicke

3.4 Zusammenfassung und Ausblick zur ökonomischen Abschätzung der Materialschäden

In dieser Studie wurde die im vorhergehenden Projekt entwickelte Methodik zur Abschätzung ökonomischer Schäden an Wohngebäuden in Deutschland auf der Basis von gemessenen Daten weiter ausgebaut und verbessert. Insbesondere wurden Materialkataster für die Jahre 1990, 1995 und 1999 abgeschätzt und zur Quantifizierung der Materialschäden in den einzelnen Jahren verwendet.

Betrachtet man die relativ sicher ableitbaren Schadenskosten, so ergibt sich eine Summe von jährlichen Instandsetzungskosten von 310, 250 und 200 Millionen Euro in 1990, 1995 und 1999. Bezogen auf die Bevölkerung von etwa 80 Millionen in Deutschland errechnen sich Kosten von ca. 4.9, 3.2 und 2.6 Euro pro Person. Die Schäden an galvanisiertem Stahl stellen in den einzelnen Jahren den größten Beitrag dar. Im Ruhrgebiet sind die höchsten Kosten von bis zu 29000 €/km²/a in 1990 zu beobachten. Weitere Gebiete hoher Kosten in 1990 sind mit um 10000 bis 15000 €/km²/a Köln-Bonn, der Westteil Berlins, Frankfurt, Bremen und Hamburg. Für 1999 wurden Kosten über 10000 €/km²/a nur noch für das Ruhrgebiet (bis etwa 18000 €/km²/a) und für Stuttgart (ca. 11000 €/km²/a) errechnet.

Die Abschätzung der Schadenskosten für einen Teil der angestrichenen Flächen und PVC-Fenster hat gezeigt, dass diese noch einen erheblichen Beitrag darstellen können. Leider sind sie derzeit nur mit großen Unsicherheiten abschätzbar, geben jedoch in etwa die Größenordnung dieser zusätzlichen Schäden wieder. Weitere hohe Beiträge sind durch die zusätzliche Berücksichtigung von typischen Fassadenanstrichen, Betonaußenfassaden und Verschmutzungen z.B. an Fenstern zu erwarten. Für diese Effekte stehen bislang keine Dosiswirkungsbeziehungen zur Verfügung. Zusätzlich sind für die betrachteten Oberflächenmaterialien in den Berechnungen lediglich Instandsetzungskosten für Wohngebäudeaußenfassaden abgeschätzt worden. Weitere ökonomische Güter und andere Kostenanteile wie z.B. ästhetische Kosten und der Verlust kulturellen Wertes sind in den Ergebnissen nicht enthalten. Somit stellt die Summe der relativ sicher abschätzbaren Instandsetzungskosten eine untere Abschätzung für die tatsächlichen Materialschäden durch Luftschadstoffe in Deutschland dar.

Zusammenfassung

Das Forschungsvorhaben „Kartierung von Materialschäden in Deutschland“ (BMU/UBA FE-Nr. 201 43 205) ist eingebunden in die vom Umweltbundesamt koordinierten deutschen Aktivitäten unter dem Dach des UN/ECE-Übereinkommens über weitreichende, grenzüberschreitende Luftschadstoffe (CLRTAP 1979). In diesem Rahmen ist das Forschungsvorhaben auf der Schnittstelle zwischen dem Kooperativprogramm zur Kartierung von Critical Loads und Critical Levels (ICP Modelling & Mapping) und dem Kooperativprogramm zur Erforschung der Wirkung von Luftschadstoffen auf Materialien, einschließlich historischer und kultureller Denkmäler (ICP Materials) angesiedelt.

Die Ergebnisse des Forschungsvorhabens wurden in enger Zusammenarbeit des Instituts für Navigation der Universität Stuttgart (INS), des Fraunhofer-Instituts für Chemische Technologie ICT und des Instituts für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung der Universität Stuttgart (IER) erarbeitet. Die Teilaufgaben der drei beteiligten Institutionen sowie die jeweils erzielten Resultate werden im folgenden in ihren wesentlichen Punkten zusammenfassend dargestellt.

Der Aufgabenbereich des Fraunhofer-Instituts für Chemische Technologie ICT beinhaltete unter anderem die Entwicklung von Dosis-Wirkungsfunktionen für die Wirkung von Luftschadstoffen auf Polymere und andere Materialien, die auch von anderen, nicht direkt im Projekt beteiligten Instituten und Firmen exponiert wurden. Aus den Resultaten ICT-eigener Expositionsversuche im Rahmen von Vorläuferprojekten wurden Dosis-Wirkungsbeziehungen für Polymere entwickelt, die bis zu 8 Jahre an unterschiedlichen Stellen in Deutschland bewittert wurden. Durch physikalische und chemische Modelle ableitbare Dosis-Wirkungsbeziehungen wurden für die Tiefenschädigung von Polyurethanlack (PUR), die Tiefenschädigung von Polyvinylchlorid (PVC), die Farbveränderungen von Polyester (PES) und Polyurethanlack (PUR) und den Schichtdickenabtrag von Alkydharzlack auf Stahlblechen ermittelt. Im Vergleich zu den Dosis-Wirkungsbeziehungen aus dem UN-ECE-Programm, konnte bei den ICT Modellen die Globalstrahlung als wichtiger Umweltparameter bei der Polymeralterung in die Dosis-Wirkungsfunktionen integriert werden. Die wesentliche mathematische Abhängigkeit der betrachteten Materialeigenschaft von den Umweltparametern lässt sich dabei durch einen quadratwurzelähnlichen Ansatz beschreiben, der die abnehmenden Zerstörungsraten mit zunehmender Expositionszeit durch erschwerte Transportraten der Schadgase und Feuchtigkeit und den verringerten Einfluss der Globalstrahlung in Richtung Probeninneres widerspiegelt.

Des Weiteren wurde vom Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie ICT eine bundesweite Abfrage von Daten zu Expositionsversuchen durchgeführt, um einen Überblick über die bisher in Deutschland durchgeführten Bewitterungsprogramme zu erhalten und um zu prüfen, ob die dabei gewonnenen Daten zur Ableitung von Dosis-Wirkungsfunktionen für weitere Materialien geeignet und verfügbar sind. Vor dem Hintergrund der angestrebten ökonomischen Bewertung der Materialschäden waren hierbei folgende Materialien von besonderem Interesse: Hausfassadenfarben und Lacke, Beton, Dachziegel sowie Putze und Mörtel. Die meisten geförderten, öffentlichen Expositionsprogramme betrachten jedoch oft nur kurze Expositionszeiten, machen häufig nur visuelle, nicht numerisch quantifizierbare Bewertungen und die Anzahl der ermittelten Datenpunkte sind für eine Modellierung nicht ausreichend. Von den Herstellerfirmen sind praktisch keine relevanten Daten zu bekommen aus Gründen der Produktzuverlässigkeit und Geheimhaltung. Begleitend zu diesen Umfragen ermittelte das ICT die Kosten für die Renovierung und Erneuerung von Bausubstanz wie Dachziegel und Fassadenanstriche.

Dem Institut für Navigation der Universität Stuttgart (INS) oblag die Aufgabe der Durchführung der eigentlichen Kartierungsarbeiten. Dies umfasst die Akquisition von Daten zu verschiedenen Luftschadstoff- und Klimaparametern, die Erstellung von Grundlagenkarten zu Klima (Temperatur, Niederschlag, Luftfeuchtigkeit, Bestrahlungsstärke), Immission (SO_2 , O_3 , NO_2) und Deposition (H^+ , Cl^-) sowie die Durchführung der Kartierung der aktuellen Korrosion durch Umsetzung der Dosis-Wirkungsfunktionen im GIS (Geographischen Informationssystem). Darüber hinaus wurde eine Kartierung der Überschreitung akzeptabler Korrosionsraten durchgeführt, indem die Kartierungsergebnisse der aktuellen Korrosion den aus den ICP Materials Hintergrundkorrosionsraten abgeleiteten akzeptablen Korrosionsraten gegenübergestellt wurden.

Für die Kartierungsarbeiten standen sechzehn Dosis-Wirkungsbeziehungen für vierzehn verschiedene Materialien zur Verfügung. Das Spektrum der kartierten Materialien reicht von Metallen und Legierungen (verwitterungsbeständiger Stahl, Aluminium, Zink, Kupfer, Bronze), über Natursteine (Portland Kalkstein, Mansfield Sandstein), Anstrichsysteme auf Stahl (Alkyd-Melamin-Anstrich auf verzinktem Stahlblech, Alkyd-Anstrich auf Stahlplatten) und eine für mittelalterliche Glasfenster typische Glasart, bis zu Polymeren (PVC, PUR, Polyester, Alkydharzlack). Verwendet wurden Dosis-Wirkungsbeziehungen, die für ungeschützt exponierte Materialien entwickelt wurden. Für mittelalterliches Glas kam darüber hinaus eine Dosis-Wirkungsfunktion für regengeschützt exponiertes Material zum Einsatz. Die Dosis-Wirkungsfunktionen für Polymere wurden im Rahmen dieses Forschungsvorhabens am Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie ICT entwickelt. Alle anderen Dosis-

Wirkungsbeziehungen gehen auf Ergebnisse des zwischen 1987 und 1995 durchgeführten ICP Materials Expositionsversuchs zurück. Sie wurden unter Federführung des Swedish Corrosion Institute (Stockholm) entwickelt und werden Bestandteil des ICP Modelling & Mapping Kartierungshandbuches sein, das noch in diesem Jahr veröffentlicht werden soll (UN/ECE 2003).

Die Kartierungsarbeiten setzen die Verfügbarkeit eines umfangreichen Pools räumlich hochaufgelöster Daten zu verschiedenen Klima- und Luftschadstoff-Parametern voraus. Daten zu folgenden Klima- und Luftschadstoffparametern wurden verwendet:

- Klimaparameter:
 - Relative Luftfeuchte in %
 - Jahressumme der Niederschläge in mm
 - Jahresmitteltemperatur in °C
 - Bestrahlungsstärke in W/m²
- Schadstoffparameter (Jahresmittelwerte bzw. Jahressummen):
 - SO₂-Immission in µg/m³
 - O₃-Immission in µg/m³
 - NO₂-Immission in µg/m³
 - Chloridfracht (wet only) in mg/l
 - Protonenfracht (wet only) in mg/l

Bei der Datenbeschaffung und Datenaufbereitung konnte auf eine umfangreiche Datensammlung zurückgegriffen werden, die am Institut für Navigation der Universität Stuttgart (INS) im Zusammenhang mit weiteren vom Umweltbundesamt geförderten Projekten ähnlicher Fragestellung aufgebaut worden ist (ANSHELM ET AL. 1998, GAUGER ET AL. 1997, GAUGER ET AL. 1999, GAUGER ET AL. 2002). Diese Datensammlung wurde im Berichtszeitraum fortlaufend aktualisiert und erweitert. Die Daten zur relativen Luftfeuchte, zu Temperatur und Niederschlagssummen wurden beim Deutschen Wetterdienst (DWD) in Form von Rasterdatensätzen mit einer räumlichen Auflösung von 1 km · 1 km akquiriert. Die Rasterdatensätze zur mittleren Bestrahlungsstärke wurden vom Energy Research Center of The Netherlands (ECN) zur Verfügung gestellt. Die Daten zur Immission von SO₂, O₃ und NO₂ entstammen der Datenbank des Umweltbundesamtes (UBA). Hierbei handelt es sich um die Jahresmittelwerte von mehreren Hundert Immissionsmessstationen in Deutschland. Durch räumliche Interpolation (Kriging-Technik) wurden aus den Punktdaten Rasterkarten für das Bundesgebiet in einer räumlichen Auflösung von 1 km · 1 km erstellt. Die Karten zur Chlorid- und Protonenfracht haben ebenfalls eine

räumliche Auflösung von 1 km · 1 km. Sie wurden aus Daten von Messstationen berechnet, die von den Umweltbehörden der Länder, den Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalten, vom Umweltbundesamt und anderen Forschungseinrichtungen zur Verfügung gestellt wurden.

Diese umfangreiche Datensammlung sowie die Dosis-Wirkungsbeziehungen bilden die Basis der Kartierungsarbeiten. Die Kartierung der Materialschäden in Deutschland und die Kartierung der Überschreitung akzeptabler Korrosionsraten wurde für die Jahre 1990, 1995 und 1999 durchgeführt. Für die Kartierung der Überschreitung akzeptabler Korrosionsraten wurden die Materialschäden im ersten Jahr der Exposition ($t = 1$) berechnet, weil sich die den akzeptablen Korrosionsraten zugrunde liegenden ICP Materials Hintergrundkorrosionsraten auf das erste Jahr der Exposition beziehen. Für die ökonomische Betrachtung der durch Luftschadstoffe verursachten Materialschäden hingegen ist die Verwendung eines längeren Bezugszeitraumes besser geeignet. Daher wurden für diesen Zweck die Materialschäden im achten Jahr der Exposition ($t = 8$) berechnet. Als Eingangsdaten wurden jeweils die Jahresmittelwerte bzw. Jahressummen der Klima- und Luftschadstoffparameter des betreffenden Jahres (1990, 1995, 1999) verwendet.

Das Ausmaß der Schädigung eines Materials wird anhand materialspezifischer Kriterien bemessen. Bei den Metallen und Legierungen wird der jährliche Massenverlust in g/m^2 als Maß verwendet, bei Gläsern die Tiefe der ausgelaugten oberflächennahen Schicht in nm, bei den Natursteinen hingegen die Oberflächenrückweichung in μm . Die Schäden an Anstrichsystemen auf Stahl werden anhand von Skalen der American Society for Testing and Materials (ASTM) bewertet. Diese Skalen beruhen auf einer visuellen Begutachtung der Materialien. Die Eindringtiefe von Acridinorange dient der Beurteilung der Tiefenschädigung von Polyvinylchlorid (PVC). Die Tiefenschädigung von Polyurethan (PUR) wird anhand der Eindringtiefe von Lugolscher Lösung bemessen. Die Schäden an Polyester (PES) werden anhand der Farbveränderung des Materials bewertet. Die zweite Dosis-Wirkungsbeziehung für Polyurethanlack benutzt ebenfalls die Farbveränderung des Materials als Schadenskriterium. Die Schäden an Alkydharzlack-Anstrichen schließlich werden anhand des Schichtdickenabtrags bemessen.

Die Kartierungsergebnisse zeigen, dass die im Laufe der 90er Jahre aufgetretenen Veränderungen bezüglich der Konzentration und Deposition von Luftschadstoffen wirkungsseitig nicht ohne Folgen geblieben sind. Die Materialschäden sind im Zeitraum 1990 bis 1999 bei der Mehrzahl der betrachteten Materialien merklich zurückgegangen. Dies trifft insbesondere für die Materialien zu, für deren Schädigung die SO_2 -Konzentration der Luft von besonderer Bedeu-

tung ist. Klare Trends hin zu einer Verbesserung zeigen sich insbesondere bei den Materialien verwitterungsbeständiger Stahl, Zink, Aluminium, Kupfer, Bronze, Portland Kalkstein, Mansfield Sandstein, Alkyd-Anstrich auf Stahlplatten, Alkyd-Melamin-Anstrich auf verzinktem Stahlblech und Glas M1. Von diesem Trend ausgenommen sind die Schäden an Glas M3 (regengeschützte Exposition), da für die Schädigung dieses Materials nicht die SO_2 -Immission, sondern NO_2 -Immission von entscheidender Bedeutung ist. Die Jahresmittel der NO_2 -Immission zeigen zwischen 1990 und 1999 keine gerichtete Entwicklung. In der Folge ergeben sich auch für die Schäden an Glas M3 keine Trends.

Die Entwicklung der Schäden an Polymeren wird an dieser Stelle ausführlicher behandelt, weil diese im Rahmen dieses Forschungsvorhabens erstmals kartiert wurden. Für die Ermittlung der Schäden an Polyurethanlack standen zwei Dosis-Wirkungsbeziehungen zur Verfügung. Einmal wird die Tiefenschädigung – gemessen anhand der Eindringtiefe Lugolscher Lösung - als Schadenskriterium herangezogen, die zweite Dosis-Wirkungsbeziehung verwendet die Farbveränderung des Materials als Schadenskriterium. Im ersten Fall lässt sich über die 90er Jahre hinweg keine gerichtete Entwicklung feststellen. Hohe Schäden treten vornehmlich da auf, wo die Jahresmitteltemperatur hohe Werte aufweist. Der Rückgang der SO_2 -Immission scheint auf die Tiefenschädigung von PUR-Lack keinen Einfluss zu haben. Anders verhält es sich beim Schadenskriterium Farbveränderung. Hier lässt sich aus den Kartierungsergebnissen ein klare Abhängigkeit von der SO_2 -Immission erkennen. Hohe SO_2 -Konzentrationen korrelieren mit niedrigen Delta-E Werten der Farbveränderung, was einer Aufhellung des Materials entspricht. Auch bei der Tiefenschädigung von PVC – gemessen an der Eindringtiefe von Acridinorange – lässt sich eine Abhängigkeit der Schädigung des Materials von der SO_2 -Immission erkennen. 1990 und 1995 verursachen die hohen SO_2 -Konzentrationen im Süden der neuen Bundesländer eine starke Tiefenschädigung des Materials. 1999 sind die SO_2 -Konzentrationen bundesweit auf ein so niedriges Niveau gesunken, dass sich anhand der Kartierungsergebnisse keine Abhängigkeit der Tiefenschädigung von PVC von der Höhe der SO_2 -Immission erkennen lässt. Hohe Eindringtiefen korrelieren aber nach wie vor mit hohen Werten der Jahresmitteltemperatur. Auch bei der Farbveränderung von Polyester wird anhand hoher Delta-E Werte im Süden der neuen Bundesländer zu Beginn der 90er Jahre eine Abhängigkeit von der SO_2 -Immission deutlich. Mit dem Rückgang der SO_2 -Konzentrationen im Verlauf der 90er Jahre sinken die Delta-E Werte vor allem im Bereich der Gebiete ehemals höchster SO_2 -Immission. Das Flächenmittel über die Gesamtfläche der Bundesrepublik Deutschland verändert sich hingegen kaum. Hohe Delta-E Werte treten nun in anderen Bereichen auf. Diese starken Farbveränderungen können in einigen

Regionen mit hohen Ozon-Konzentrationen in Verbindung gebracht werden. Die Kartierungsergebnisse zu den Schäden an Alkydharzlacken (Schichtdickenabtrag) zeigen ein eher unstetes Bild. Es lassen sich keine gerichteten Entwicklungen erkennen. Die Zuordnung von Gebieten mit hohen Schäden zur räumlichen Verteilung bestimmter Schadstoff- oder Klimaparameter ist nicht eindeutig.

Eine Kartierung der Überschreitung akzeptabler Korrosionsraten (K_{acc}) war nur für die Materialien verwitterungsbeständiger Stahl, Zink, Aluminium, Kupfer, Bronze, Portland Kalkstein und Mansfield Sandstein möglich, da nur für diese sieben Materialien ICP Materials Hintergrundkorrosionsraten (K_{10}) vorliegen. Akzeptable Korrosionsraten (K_{acc}) sind als Vielfache der ICP Materials Hintergrundkorrosionsraten definiert ($K_{acc} = K_{10} \cdot n$) und dienen der Kennzeichnung der Grenze zwischen der unter technischen und ökonomischen Gesichtspunkten gerade noch akzeptablen und der nicht mehr zu tolerierenden Schädigung eines Materials durch Luftverunreinigungen. Hintergrundkorrosionsraten wiederum kennzeichnen das Ausmaß der Korrosion an Materialien unter quasinatürlichen Bedingungen, das heißt unter Ausschluss anthropogener Einflüsse. Zur Berechnung der Überschreitung akzeptabler Korrosionsraten werden die in der revidierten Fassung des ICP Modelling & Mapping Kartierungshandbuchs (UN/ECE 2003) für n die Werte 1.5, 2 und 2.5 empfohlen. Diesen Empfehlungen wurde entsprochen. Kartiert wurde somit die Überschreitung der akzeptablen Korrosionsraten ($n = 1.5$, $n = 2$, $n = 2.5$) in den Jahren 1990, 1995 und 1999. Für den Zeitraum 1990 bis 1999 konnte ein Rückgang der Überschreitung akzeptabler Korrosionsraten bei allen Materialien festgestellt werden, für die ICP Materials Hintergrundkorrosionsraten vorliegen. Es sind dies die Materialien verwitterungsbeständiger Stahl, Zink, Aluminium, Kupfer, Bronze, Mansfield Sandstein und Portland Kalkstein. Sowohl die Höhe der festgestellten Überschreitungen als auch der Flächenanteil der Gebiete mit Überschreitung akzeptabler Korrosionsraten haben abgenommen. Die Verbesserung der Schadenssituation ist auf den Rückgang der SO_2 -Immission in Deutschland zwischen 1990 und 1999 zurückzuführen. Anzumerken bleibt jedoch, dass bei allen Materialien nach wie vor Überschreitungen akzeptabler Korrosionsraten auftreten. Die ICP Materials Hintergrundkorrosionsraten (K_{10}) wurden 1999 nach wie vor flächendeckend überschritten. Das heißt, dass auch Ende der 90er Jahre nirgendwo in Deutschland die Belastung auf ein Niveau gesunken ist, das nach Definition des ICP Materials dem natürlichen Hintergrund entspricht.

Die Aufgabenstellung des Instituts für Energiewirtschaft und die Rationelle Energieanwendung (IER) der Universität Stuttgart umfasste die ökonomische Bewertung der durch die Wirkung von Luftschadstoffen verursachten Schäden an Gebäuden in Deutschland. Die Arbeit beinhaltet

tete den Ausbau und die Verbesserung der im vorhergehenden Projekt entwickelten Methodik zur Abschätzung ökonomischer Schäden an Wohngebäuden in Deutschland auf der Basis von gemessenen Daten. Insbesondere wurden Materialkataster für die Jahre 1990, 1995 und 1999 abgeschätzt und zur Quantifizierung der Materialschäden in den einzelnen Jahren verwendet.

Um die Berechnungen für ein so großes Gebiet wie Deutschland durchführen zu können, wurde der sogenannte Schadensfunktions-Ansatz verfolgt. Neben seiner Anwendbarkeit auf große Untersuchungsgebiete ist ein weiterer Vorteil, dass die Ergebnisse fortschreibbar sind. Die Studie beschränkt sich aufgrund der Datenlage auf die Ermittlung von Instandsetzungskosten an Wohngebäuden. Der Verlust an Kulturgütern und die Schädigung anderer ökonomischer Güter konnten nicht berücksichtigt werden. Außerdem konnten für die betrachteten Wohngebäude weitere Kostenkomponenten wie z.B. der kulturelle oder ästhetische Wertverlust nicht ermittelt werden.

Ausgehend von den flächenspezifischen Korrosionsraten, die vom Institut für Navigation berechnet wurden, wurden zunächst unter Verwendung der abgeleiteten Materialkataster und Instandsetzungskriterien das aufgrund der Schädigung in verschiedenen Jahren wieder instandgesetzte Material berechnet. Mit Hilfe von flächenspezifischen Instandsetzungskosten wurden dann die entstandenen Instandsetzungskosten durch die Luftverschmutzung in den Jahren 1990, 1995 und 1999 ermittelt. Betrachtet wurden galvanisierter Stahl, Zink, Aluminium, Sandstein, Kalkstein, andere Natursteine und Putz. Grobe Abschätzungen wurden außerdem für Alkyd-Melamin-Anstriche, Silizium-Alkyd-Anstriche, Fenster aus PVC und Kupfer durchgeführt.

Einen wesentlichen Teil der Arbeiten stellte die Ableitung der Materialkataster für die betrachteten Jahre dar. Eine weitere Aufgabe war die Überarbeitung und Erweiterung der Instandsetzungskriterien und spezifischen Instandsetzungskosten durch Literaturstudien und Expertenbefragungen. Im ersten Schritt der Berechnung der Materialkataster wurden mit Hilfe der Fortschreibungen des Statistischen Bundesamtes aus den Gebäudezählungen von 1987 für die alten Bundesländer und von 1995 für die neuen Bundesländer, sowie deren Fortschreibungen und weiteren Wohnungszahlen für 1990 in den neuen Ländern, der Gebäudebestand in 1990, 1995 und 1999 ermittelt. Dabei erfolgte eine Aufteilung des Bestandes nach Baualtersklassen, Geschosshöhe, Wohnungszahl und Bauweise. Die berechneten Zahlen wurden in einem weiteren Schritt Gebäudetypen zugeordnet. In den alten Bundesländern wurden dazu Wohnungszahl und Alter, in den neuen Bundesländern Geschosshöhe, Bauweise und Alter verwendet. Die so erhaltenen Gebäudetypen konnten wiederum Siedlungstypen zugeordnet werden. Für die verwendete

ten Siedlungstypen ist eine Erhebung von Materialoberflächen für repräsentative Gebäude in Köln und Dortmund veröffentlicht. Auf Basis dieser Daten konnten schließlich Karten der Materialoberflächen auf Kreisebene für die Jahre 1990, 1995 und 1999 erstellt werden. Für eine genauere Berechnung wurden die Daten auf Kreisebene zusätzlich innerhalb der Kreise nach Siedlungsflächen verteilt. Zum Vergleich wurden die Berechnungen der ökonomischen Kosten jeweils für beide Kataster durchgeführt.

Die Berechnungen der Instandsetzungsfläche ergaben den höchsten Wert mit etwa 3.2 Quadratkilometern für galvanisierten Stahl in 1990. Dieser Wert nimmt in den Jahren 1995 und 1999 auf 2.9 und 2.6 km² ab. Genauso nehmen auch die Anteile des geschädigten Materials an der Gesamtfläche von 4 auf 3.5 und 3.1 Prozent ab. Die zweitgrößte Fläche, die wieder instandgesetzt werden muss wird mit 1.8, 1.3 und 0.96 km² für Putz berechnet. Danach folgt Aluminium mit 1.2, 1.1 und 0.97 km² (Berechnungen auf Kreisfläche). Die Zahlen für die Abschätzung auf Siedlungsflächen weichen nur wenig von den auf Kreisebenen berechneten Werten ab.

Bei der Berechnung der Instandsetzungskosten für die relativ sicher quantifizierbaren Materialoberflächen ergaben sich die höchsten Werte mit 81, 74 und 66 Millionen Euro für galvanisierten Stahl, gefolgt von Aluminium (55, 49, 44 Millionen Euro), Putz (55, 39 und 29 Millionen Euro) und den Natursteinen. Die Gesamtkosten ergaben sich zu 310, 250 und 210 (bzw. 200) Millionen Euro in 1990, 1995 und 1999. Bezogen auf die Bevölkerung von etwa 80 Millionen in Deutschland errechnen sich Kosten von ca. 4.9, 3.2 und 2.6 Euro pro Person. Die Schäden an galvanisiertem Stahl stellen in den einzelnen Jahren den größten Beitrag dar. Im Ruhrgebiet sind die höchsten Kosten von bis zu 29000 €/km²/a in 1990 zu beobachten. Weitere Gebiete hoher Kosten in 1990 sind mit um 10000 bis 15000 €/km²/a Köln-Bonn, der Westteil Berlins, Frankfurt, Bremen und Hamburg. Für 1999 wurden Kosten über 10000 €/km²/a nur noch für das Ruhrgebiet (bis etwa 18000 €/km²/a) und für Stuttgart (ca. 11000 €/km²/a) errechnet.

Wichtige Materialoberflächen wie Beton und Fassadenanstriche konnten in den Abschätzungen nicht berücksichtigt werden, weil für sie keine Dosis-Wirkungsfunktionen vorlagen. Für einen Teil der Anstriche konnte zumindest eine grobe Abschätzung durchgeführt werden, indem Annahmen über den Anteil der angestrichenen Oberfläche auf den die Funktionen für Alkyd-Melamin und Silizium-Alkyd-Anstrich anwendbar sind getroffen wurden. Außerdem konnten grobe Abschätzungen für PVC-Fenster und Kupfer durchgeführt werden.

Die errechneten Instandsetzungsflächen für die Anstriche und PVC-Fenster betragen mit um die 10 und um die 30, bzw. 19 Quadratkilometer wesentlich mehr als bei den anderen Materialien. Die Abschätzung für Kupfer ergibt ca. 2 Quadratkilometer. Die Summe der grob abgeschätzten Kosten für Anstriche, PVC-Fenster und Kupfer übertrifft die Höhe der abgeschätzten Kosten für die restlichen Materialien. Damit ist zu erkennen, dass diese noch einen erheblichen zusätzlichen Beitrag darstellen können. Leider sind sie derzeit nur mit großen Unsicherheiten abschätzbar, geben jedoch in etwa die Größenordnung dieser zusätzlichen Schäden wieder. Weitere hohe Beiträge sind durch die Berücksichtigung von typischen Fassadenanstrichen, Betonaußenfassaden und Verschmutzungen z.B. an Fenstern zu erwarten. Für diese Effekte stehen bislang keine Dosiswirkungsbeziehungen zur Verfügung.

Zusätzlich zu der Tatsache, dass Schäden an einigen wichtigen Materialoberflächen nicht oder nur grob abschätzbar sind, sind für die betrachteten Oberflächenmaterialien in den Berechnungen lediglich Instandsetzungskosten für Wohngebäudeaußenfassaden abgeschätzt worden. Weitere ökonomische Güter und andere Kostenanteile wie z.B. ästhetische Kosten und der Verlust kulturellen Wertes sind ebenfalls in den Ergebnissen nicht enthalten. Somit stellt die Summe der relativ sicher abschätzbaren Instandsetzungskosten eine untere Abschätzung für die tatsächlichen Materialschäden durch Luftschadstoffe in Deutschland dar.

Summary

The research project „Mapping material damages in Germany“ (UBA/BMU FE-No. 201 43 205) is integrated into German research activities under the UN/ECE Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution (LRTAP), which are coordinated by the German Federal Environmental Agency. Within the scope of these research activities the project is connected to two UN/ECE International Cooperative Programmes (ICP's) – the ICP on Modelling and Mapping of Critical Loads and Levels and their Air Pollution Effects, Risks and Trends (ICP Modelling and Mapping) and the ICP on Effects of Air Pollution on Materials, Including Historic and Cultural Monuments (ICP Materials). The results of this project have been worked out in close co-operation of Institute of Navigation, Stuttgart University (INS), the Fraunhofer Institute for Chemical Technology (ICT) and the Institute of Energy Economics and the Rational Use of Energy, Stuttgart University (IER). Main aspects and results of the research project will be summarized below.

The main task for the Fraunhofer Institute for Chemical Technology ICT was the development of dose-response-functions for air pollution effects on polymers and other materials exposed in Germany by institutes or companies not directly involved in the project. From former projects of ICT it was possible to use material degradation results of polymers, natural weathered for up to eight years at different locations in Germany. For these materials ICT developed dose-response-functions for the deterioration depth of a polyurethane lacquer system (PUR), the deterioration depth of polyvinylchloride (PVC), the colour change of a polyester (PES) and polyurethane lacquer system (PUR) and the decrease of the layer thickness of an alkyd resin based polymer on steel sheets. Additional for these dose-response-functions the global radiation was used as an environmental parameter compared to the dose-response-functions estimated in the UN-ECE programme. The main mathematical correlation between changed material property and environmental parameters like the global radiation show a square-root dependency which describes the decreasing damage rate with increasing exposition time belonging to the heavier transportation rates for the ambient gases and humidity and the decreasing influence of the radiation to the interior of the materials.

On the other hand the Fraunhofer-ICT started an inquiry in Germany for natural weathering exposition programs, able to deliver enough data for a modelling of dose-response-functions for environmental effects on other materials like concrete, plaster, mortar, paint and lacquer, wood,

and glass. These materials are from the economical point of view from interest, because of their large application and well distribution in the urban environment.

Unfortunately most of the partly governmental exposition projects investigate only short exposition times, make often only visual and not quantified evaluations of the deterioration and the amount of data and results are to less for modelling dose-response-functions. Also it was not possible to get exploitable data from exposition programs of the industrial companies, because of confidential and insurance aspects (product reliability). In a second inquiry the ICT has estimated the costs for renovation and refurbishment of materials like roof materials and paints.

The tasks of Institute of Navigation, Stuttgart University (INS) include data provision and the preparation of auxiliary maps on temperature, rainfall, relative humidity, concentration of SO₂, concentration of O₃, concentration of NO₂, deposition loads of protons and deposition loads of chloride. Calculating these auxiliary maps is a precondition for mapping material damages in Germany. Furthermore, mapping material damages demands implementing dose-response-functions into GIS (Geographical Information System). These dose-response functions describe the causal relationship between climate and air pollutants on the one hand and damages to materials on the other hand. This has been the main task of Institute of Navigation, Stuttgart University. Finally, calculating and mapping of the exceedance of acceptable corrosion rates has been an important duty of Institute of Navigation.

Sixteen dose-response-functions of fourteen materials have been available to map material damages in Germany. There are dose-response-functions of metals and alloys (weathering steel, aluminium, zinc, copper cast bronze), natural stones (Portland Limestone, Mansfield Sandstone), paint coatings (coil coated galvanised steel with alkyd melamine, steel panels with alkyd), a sort of glass typical for medieval windows and, finally, for some kinds of polymers (polyvinyl chloride, polyurethane, polyester, alkyd resin lacquer). Except for medieval glass, only dose-response-functions developed for unsheltered exposures have been used. For medieval glass there also has been a dose-response-function available for exposure under a sheltering roof. The dose-response-functions for polymers have been developed within the scope of this research project. All other dose-response-functions derive from results of an ICP Materials exposure programme (1987-1995). They have been developed within ICP Materials lead-managed by the Swedish Corrosion Institute (Stockholm). These dose-response-functions will be part of the revised version of the ICP Modelling & Mapping mapping manual (UN/ECE 2003).

Mapping material damages implies availability of high resolution raster data on climate and air pollutants. The following data on climate and air pollutants have used for mapping:

- climate (annual mean or annual sum):
 - relative humidity (%)
 - rain fall (mm)
 - temperature (°C)
 - irradiance (W/m²)
- air pollutants (annual mean or annual sum):
 - concentration of SO₂ (µg/m³)
 - concentration of O₃ (µg/m³)
 - concentration of NO₂ (µg/m³)
 - deposition loads of chloride (wet only, mg/l)
 - deposition loads of protons (wet only, mg/l)

In previous research projects at Institute of Navigation, Stuttgart University (INS) a database on air pollutant concentrations and deposition loads has been established (ANSHELM ET AL. 1998, GAUGER ET AL. 1997, GAUGER ET AL. 1999, GAUGER ET AL. 2002). This database has been updated and extended during this research project. This data pool and the dose-response-functions are the basis mapping of material damages in Germany is based upon. Mapping of material damages has been carried out for 1990, 1995 and 1999. For the economic assessment of material damages a longer exposure period is more suitable. It has been decided within the group to use an eight year exposure period ($t = 8$) to calculate the maps, which are intended to be used for economic assessment of material damages. For mapping exceedances of acceptable corrosion rates material damages after one year of exposure have been used, because ICP Materials background corrosion rates, which are the basis of acceptable corrosion rates, have been developed for one year exposures.

The magnitude of the material damages are assessed by using material specific criteria. To assess damages to metals and alloys the yearly mass loss (g/m²) of the metals/alloys has been used. Damage to glass, representative for medieval stained glass windows, is measured by the depth of the bleached layer (nm). Surface recession (µm) is the criteria to assess damages to natural stones. Damages to paint coatings are examined visually using standards of the American Society for Testing and Materials (ASTM). Infiltration depth (µm) of acridinorange staining is used as a means to describe damage depth to polyvinyl chloride (PVC). Infiltration depth

(μm) of Lugol's solution is used to describe damage depth to polyurethane lacquer (PUR). Change in colour (Δe) helps to assess damages to polyester. Damages to alkyd resin lacquer are assessed by measuring layer thickness reduction (μm).

Mapping results indicate, that the changes in deposition loads and concentrations of air pollutants, which happened during the 1990ies had some effects on material damages. The majority of materials shows, that material damages due to air pollutants have receded during the 1990ies. In particular, this is the case for those materials, whose damages are caused predominantly by the concentration of SO_2 (weathering steel, zinc, aluminium, copper, bronze, Portland Limestone, Mansfield Sandstone, paint coatings, glass M1). Damages to glass M3 (sheltered exposure) is excluded from this trend, because for materials in sheltered position the concentration of SO_2 is less important. Mapping results of the damages to polymers is described more detailed, because damages to polymers are included into the mapping process for the first time. To assess damages to polyurethane lacquer (PUR) two dose-response-functions have been available. The first function uses the infiltration depth of Lugol's solution to describe damage depth, the second one uses changes in colour as a criteria for damage. Looking at the infiltration depth of Lugol's solution no trend is detectable. The decline of SO_2 seems to have no effect on damage depth of polyurethane. Whereas, change in colour seems to be influenced by SO_2 concentration. High concentration of SO_2 correlates with low Δe values, which is equivalent to a whitening of the material. Damage depth of polyvinyl chloride (PVC), too, is influenced by the concentration of SO_2 . In Saxony, Thuringia and Saxony-Anhalt there have been high air concentrations of SO_2 in the beginning of the 1990ies, which entailed high infiltration depths of acridinorange staining into PVC. In 1999 SO_2 concentration has diminished to very low concentrations all over Germany. Highest damage depth of PVC is no longer bound to regions of highest SO_2 concentrations, but to region with high values of annual mean temperature. In 1990, changes in colour of polyester have been very intensive in those regions with exceptionally high concentrations of SO_2 . At the end of the 1990ies SO_2 concentrations have declined. Most intensive changes in colour, now occur in some regions with high ozone concentrations and high values of relative humidity. Mapping results for damages to alkyd resin lacquer cannot be assigned to spatial patterns of any air pollutant or climatic parameter.

Mapping exceedance of acceptable corrosion rates has been possible for those materials only, for whom ICP Materials background corrosion rates (K_{10}) have been available (weathering steel, aluminium, zinc, copper, cast bronze, Portland limestone, Mansfield sandstone). Background corrosion rates describe the dimension of material damages under "natural conditions", which

means without any human influence. Acceptable corrosion rates (K_{acc}) are defined as multiples of the ICP Materials background corrosion rates ($K_{acc} = n \cdot K_{10}$) and serve as a means to describe the limit of material damages, which is decided to be acceptable in consideration of technical and economic facts. Exceedance of acceptable corrosion rates have been calculated and mapped for the years 1990, 1995 and 1999. A decline of the exceedance of acceptable corrosion rates can be stated for all materials named above. The extent of exceedances as well as the amount of area with exceedance of acceptable corrosion rates has declined between 1990 and 1999. This improvement is caused by the decline of SO_2 concentration within the 1990ies. But it has to be pointed out, that in 1999 there are still some areas with exceedance of acceptable corrosion rates in Germany and that background corrosion rates are still exceeded in the whole area of Germany.

The tasks of Institute of Energy Economics and the Rational Use of Energy (IER) Stuttgart University include the assessment of the economic costs of the deterioration of building materials due to effects of air pollutants. The work contained the extension and update of the methodology for the assessment of economic damages at residential buildings in Germany on the basis of measured data, developed within the previous project. Particularly, material inventories were derived for the years 1990, 1995, and 1999 and used for the calculations of material damages. In order to carry out calculations for such a large area like Germany, the so-called damage function approach was used. Beside its applicability on large areas of investigation, a further advantage is that the results can easily be updated. Because of the availability of data, the study is restricted to the estimation of maintenance costs of residential buildings. The loss of cultural heritage and the damage on further economic goods could not be considered. Furthermore, other cost components like e.g. the loss of cultural and aesthetical value were not taken into account.

Starting from the area specific corrosion rates calculated by the Institute of Navigation, first, the material surface which had to be repaired because of the damage in the different years was calculated by applying the derived material inventories and maintenance criteria. Afterwards, using the area specific maintenance costs the invested maintenance costs due to damages caused by air pollution in the years 1990, 1995, and 1999 were assessed. Galvanised steel, zinc, aluminium, sandstone, limestone, other natural stones, and rendering were considered. Additionally, rough estimates were assessed for alkyd melamine and alkyd paintings, windows made of PVC and copper.

A major part of the work contained the calculation of material inventories for the years in focus. Updating and extending the maintenance criteria and specific maintenance costs by literature review and expert questioning was a further task. In the first step of the calculations a stock of residential buildings was derived from the data of the building censuses of 1987 and 1995 derived by the Federal Statistical Office of Germany and respective updates together with data for the new Laender in 1990. Simultaneously, the data were categorised by age, number of floors, number of apartments, and type of construction. The calculated values were in a next step attributed to specific types of buildings before they were assigned to specific settlement types. For the used settlement types, a census of material surfaces at representative buildings had been published for Cologne and Dortmund. Thus, by using those data finally maps of material surfaces on the level of districts for the years 1990, 1995, and 1999 were estimated. Furthermore, within the district areas, the data on material surfaces were distributed to areas of settlement. For comparison, both sets of maps were used in the calculations of economic costs.

The estimation of the maintained surface area resulted in the highest estimates at about 3.2 km² for galvanised steel in 1990. It could be seen that the estimates become smaller for 1995 and 1999 with 2.9 and 2.6 km². Similarly the shares of damaged materials compared to the total surface area decreased from 4 to 3.5 to 3.1 percent. The second largest material surface area which is to be maintained was calculated for rendering with 1.8, 1.3, and 0.96 km². Aluminium is following at 1.2, 1.1, and 0.97 km² (calculations on district area). The results of the estimations on the settlement areas show only a small discrepancy to those results.

For the calculation of maintenance costs considering the material surfaces which can be calculated with a comparable low uncertainty, the largest values were estimated at 81, 74, and 66 million Euro for galvanised steel, followed by aluminium (55, 49, 44 million Euro), rendering (55, 39, and 29 million Euro), and the natural stones. The total costs were estimated to 310, 250, and 210 million Euro in 1990, 1995, and 1999 respectively. Referred to the population of Germany, per capita costs of 4.9, 3.2, and 2.6 Euro per person were derived. The largest contribution was assessed for galvanised steel. The highest cost values with about 29000 €/km²/a were observed for 1990 in the Ruhr area. Further high costs were calculated at about 10000 to 15000 €/km²/a for the regions Cologne-Bonn, Berlin, Frankfurt, Bremen, and Hamburg. For 1999, estimates higher than 10000 €/km²/a were only assessed for the Ruhr area (up to about 18000 €/km²/a) and for Stuttgart (about 11000 €/km²/a).

Important surface materials like concrete and typical facade paintings could not be considered in the analysis due to a lack of dose-response functions. At least for a part of the painted surface area, a rough estimation could be carried out by making assumptions about the share of the painted area which represents paintings on which the UN ECE functions on alkyd-melamine and alkyd paintings for steel can be applied. Furthermore, rough estimates were derived for windows of PVC and copper surfaces.

The calculated repaired surface areas for paintings and windows of PVC are with about 10 and 30, and 19 km² much larger than for the other materials. For copper the value represents 2 km². The total sum of the roughly estimated costs for the paintings, windows of PVC, and copper exceeds the assessed values for the remaining materials. Thus, although the estimates are uncertain they show that damage estimates for those materials could represent a large share of the total damage costs. Further high contributions are to be expected from the consideration of typical facade paintings, concrete, and soiling effects. Damages in those areas can still not be assessed, because no dose-response functions are available.

Additionally to the fact that damages of some important material surfaces are not or only roughly assessable, for the quantifiable material surfaces only maintenance costs for residential buildings were taken into account. Furthermore, other economic goods and cost components like e.g. aesthetical costs and the loss of the cultural value are not included in the results. Thus, the sum of the relatively certain assessable maintenance costs represents a lower estimate for the real material damage caused by air pollution in Germany.

Literatur

- ANSHELM, F., DROSTE-FRANKE, B., GAUGER, TH., KÖBLE, R., MAYERHOFER, P. & FRIEDRICH, R. (1998): Kartierung von Toleranzgrenzwerten der Wirkung von Luftverunreinigungen auf Materialien in Deutschland. *Final Report FKZ 108 07 034. On behalf of Federal Environmental Agency (UBA). Berlin.*
- ANSHELM, F., GAUGER, TH. & KÖBLE, R. (1999): Mapping Acceptable Levels/Loads for Effects of Air Pollutants on Materials in Germany. *In: Quantification of Effects of Air Pollutants on Materials. UBA-Texte 24/99. PP 191-199.*
- ANSHELM, F., DROSTE-FRANKE, B., GAUGER, TH., REICHERT, TH., SCHUSTER, H. & FRIEDRICH, R. (2002a): Kartierung von Materialschäden in Deutschland. 1. Zwischenbericht FKZ 201 43 205. Im Auftrag des Umweltbundesamtes (UBA), Berlin.
- ANSHELM, F., DROSTE-FRANKE, B., GAUGER, TH., REICHERT, TH., SCHUSTER, H. & FRIEDRICH, R. (2002b): Kartierung von Materialschäden in Deutschland. 2. Zwischenbericht FKZ 201 43 205. Im Auftrag des Umweltbundesamtes (UBA), Berlin.
- ANSHELM, F., DROSTE-FRANKE, B., GAUGER, TH., REICHERT, TH., SCHUSTER, H. & FRIEDRICH, R. (2003): Kartierung von Materialschäden in Deutschland. 3. Zwischenbericht FKZ 201 43 205. Im Auftrag des Umweltbundesamtes (UBA), Berlin.
- BAUMBACH, G., BAUMANN, G. BAUMANN, K., DRÖSCHER, F., GROSS, H., STEISSLINGER, B. (1993): Luftreinhaltung. 461 p.
- CLRTAP (1979): UN/ECE Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution. Published by the United Nations Economic Commission for Europe (UN ECE). <http://www.unece.org/env/lrtap>.
- DOMININGHAUS, H. (1992): Die Kunststoffe und ihre Eigenschaften, VDI Verlag, ISBN 3-18-401186-0.
- EBEL, W., EICKE, W. AND FEIST, W. (1990): Energiesparpotentiale im Gebäudebestand. *Institut Wohnen und Umwelt (IWU), Darmstadt.*
- EMEP/MSCW (2000): Analysis of UNECE/EMEP Emission Data – MSC-W Status-Report 2000.
- FRICKE, W. & UHSE, K. (1994): Anteile von Witterung und Emissionsminderung am SO₂ – Rückgang in Deutschland. *In: Staub – Reinhaltung der Luft. Vol. 54. PP 289-296.*
- GAUGER, TH., KÖBLE, R., SMIA TEK, G. (1997): Kartierung kritischer Belastungskonzentrationen und -raten für empfindliche Ökosysteme in der Bundesrepublik Deutschland und anderen ECE-Ländern. Part 1: Deposition Loads and Part 2: Critical levels. *Final Report 106 01 061. On behalf of Federal Environmental Agency (UBA). Berlin. 126 p. and 75 p.*
- GAUGER, TH. & ANSHELM, F. (1999): Kartierung kritischer Luftschadstoffbelastungen unter ARC/INFO. *In: Schriftenreihe der Institute des Fachbereichs Vermessungswesen 1999/1. PP 21-26.*
- GAUGER, TH., KÖBLE, R. & ANSHELM, F. (1999): Kritische Luftschadstoff-Konzentrationen und Eintragsraten sowie ihre Überschreitung für Wald- und Agrarökosysteme sowie naturnahe waldfreie Ökosysteme. *Final Report FKZ 108 03 079. On behalf of Federal Environmental Agency (UBA). Berlin.*

- GAUGER, TH., Anshelm, F., Schuster, H., Erisman, J.W., Vermeulen, A. T., Draaijers, G., Bleeker, A. & Nagel, H.-P. (2002): Mapping of ecosystem specific long-term trends in deposition loads and concentrations of air pollutants in Germany and their comparison with Critical Loads and Critical Levels. Part 1 & Part 2. *Final Report FKZ 299 42 210. On behalf of Federal Environmental Agency, Berlin.*
- GÜLEC, T., KOLMETZ, S. & ROUVEL, L. (1994): Nutzenergiebedarf für Raumwärme in der Bundesrepublik Deutschland (alte und neue Bundesländer, 1989). *Forschungszentrum Jülich. IKARUS-Teilprojekt 5 "Haushalte und Kleinverbraucher". Bd. 5-11. Jülich.*
- HMULF (2002). Wärmedämmung von Außenwänden mit der hinterlüfteten Fassade, Wissenswertes über die Außendämmung bei Alt- und Neubauten. *Hessisches Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft und Forsten, Energieinformationen, Nr. 10, Wiesbaden.*
- HOOS, D., JANSEN, R., KEHL, J., NOEKE, J. AND POPAL, K. (1987): Gebäudeschäden durch Luftverunreinigung - Entwurf eines Erhebungsmodells und Zusammenfassung von Projektergebnissen. *Institut für Umweltschutz, Dortmund.*
- HULLMANN, H., KRAFT, U. AND LICHTNECKER, H. (2001). Einsatz von Kupfer und Zink bei Dächern, Dachrinnen und Fallrohren. *Wirtschaftsvereinigung Metalle, Sachstandsbericht, Düsseldorf.*
- KOHLBECKER, G. (1999). Bauherren-Handbuch Sanierung: Wirtschaftliche Gebäudesanierung und Optimierung der Unterhaltskosten.. *1. Auflage, Verlag Bauwesen, Berlin.*
- KUCERA, V., HENRIKSEN, J., KNOTKOVA, D. AND SJÖSTRÖM, C. (1993): Model for Calculations of Corrosion Cost Caused by Air Pollution and Its Application in Three Cities. *Swedish Corrosion Institute, Report, No. 084, Roslagsvägen..*
- KUCERA, V., TIDBLAD, J., HENRIKSEN, J. ET AL. (1995): Statistical analysis of 4 year materials exposure and acceptable deterioration and pollution levels - *UN-ECE ICP on Effects on Materials, Including Historic and Cultural Monuments. Report No. 18, Swedish Corrosion Institute, Stockholm.*
- KUCERA, V. & GREGOR, H.-D. (HRSG.) (2000): Mapping Air Pollution Effects on Materials Including Stock at Risk. *Proceedings of a UN ECE Workshop. Stockholm, June 14-16, 2000.*
- LEHMANN, J., (2001): Der Einfluss von Benässungszyklen und von mechanischer Spannung auf Ergebnisse der natürlichen und künstlichen Bewitterung; Beitrag zum Seminar der Technischen Akademie Wuppertal, *Bestrahlen und Bewittern von Polymeren 2001.*
- LEISEN, P. (1992): Abschätzung verkehrsbedingter Luftbelastungen durch Modelluntersuchungen und anhand praktischer Beispiele. *VDI-Bericht Vol. 952. PP 253-275.*
- MEYER, B. UND WOLTER, M. I. (2002). Aufschwung schaffen, Gesamtwirtschaftliche und ökologische Wirkungen der Förderung von Investitionen zur Verbesserung der Wärmedämmung von Fenstern. *Gesellschaft für Wirtschaftliche Strukturforchung (GWS) mbH, Gutachten im Auftrag der Initiative fenstermarkt-plus.de, Osnabrück*
- MAYERHOFER, P., DROSTE-FRANKE, B. & FRIEDRICH, R. (1998): Ökonomische Abschätzung der Materialschäden in Deutschland. *In F. Anshelm, T. Gauger, and R. Köble: Kartierung von Toleranzgrenzwerten der Wirkung von Luftverunreinigungen auf Materialien in Deutschland. Endbericht (FKZ 108 07 034), Umweltbundesamt, Berlin.*

- NAGEL, H.-D. & GREGOR, H.-D. (1999): Ökologische Belastungsgrenzen – Critical Loads & Levels: Ein internationales Konzept für die Luftreinhaltepolitik. *Springer publishing*. 320 p.
- RABEK, J. F.,: (1995) Polymerphotodegradation- Mechanics and Experimental Methods, 1995 Chapman & Hall, ISBN 0 412 58480 8. Page 596.
- REICHERT, T., POHSNER UTE (2002) Wirkungen von Luftverunreinigungen auf Polymere: Teil II: Freibewitterung, *Abschlussbericht zum Vorhaben Förderkennzeichen UBA FB 108 07 022, 134 Seiten, Pfinztal und Berlin*.
- REICHERT, T. (2003). Beitrag des Fraunhofer-Instituts für Chemische Technologie (ICT) zum 3. Zwischenbericht des zum Forschungsvorhaben Kartierung von Materialschäden in Deutschland, *BMU/UBA FE Nr.: 201 43 205. Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie, Pfinztal*.
- RICHTLINIE DES RATES VOM 15. JULI 1980 ÜBER GRENZWERTE UND LEITWERTE DER LUFTQUALITÄT FÜR SCHWEFELDIOXID UND SCHWEBSTAUB (80/779/EWG), *Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaft Nr. L229/30*
- RICHTLINIE DES RATES VOM 21. JUNI 1989 ZUR ÄNDERUNG DER RICHTLINIE 80/779/EWG ÜBER GRENZWERTE UND LEITWERTE DER LUFTQUALITÄT FÜR SCHWEFELDIOXID UND SCHWEBSTAUB (89/427/EWG), *Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaft Nr. L201/53*
- RICHTLINIE DES RATES VOM 07. MÄRZ 1985 BETREFFEND LUFTQUALITÄTSNORMEN FÜR STICKSTOFFDIOXID (85/203/EWG), *Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaft Nr. L87/1*
- RICHTLINIE DES RATES VOM 21. SEPTEMBER 1992 ÜBER DIE LUFTVERSCHMUTZUNG DURCH OZON (92/72/EWG), *Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaft Nr. L297/1*
- RICHTLINIE DES RATES VOM 27. SEPTEMBER 1996 ÜBER DIE BEURTEILUNG UND KONTROLLE DER LUFTQUALITÄT (96/62/EG; EU-Rahmenrichtlinie, EU-RRL)
- RICHTLINIE 1999/30/EG DES RATES VOM 22. APRIL 1999 ÜBER GRENZWERTE FÜR SCHWEFELDIOXID, STICKSTOFFDIOXID UND STICKSTOFFOXIDE, PARTIKEL UND BLEI IN DER LUFT (1. Tochterrichtlinie, EU-1.-TRL).
- ROSIN, R., GLITZ, P., BORGES, H. & LORENZ, G. (1994): Gebäudetypologie und spezifischer Energiebedarf für den Wohnungsbestand in den neuen Bundesländern. *Forschungszentrum Jülich. IKARUS-Teilprojekt 5 "Haushalte und Kleinverbraucher". Bd. 5-06. Jülich*.
- ROTH, U., HÄUBI, F., ALBRECHT, J., BISCHOFF, M., DEUCHER, A., HARDER, L., LANGRAF, B. AND PAPE, G. (1980): Wechselwirkungen zwischen der Siedlungsstruktur und Wärmeversorgungssystemen. *Forschungsprojekt BMBau RS II 4 - 70 41 02 - 77.10 (1980). B. u. S. Bundesminister für Raumordnung, Schriftenreihe 'Raumordnung', Bonn*.
- RUNDUMSHAUS (2003). Baupreise, Grundpreise für die Renovierung und Modernisierung von Einfamilienhäusern. <http://www.rundumshaus.com/>, Status: 02/2003.
- SAECHTLING, H.-J., & ZEBROWSKI, W., (1998) Kunststoff-Taschenbuch, ISBN 3-446-19054-6. Seite 157.
- STAATLICHES UMWELTAMT ITZEHOE (HRSG.) (2000): Messbericht 1999 – Immissionsüberwachung der Luft in Schleswig-Holstein.
- STATISTISCHES BUNDESAMT (1990): Bautätigkeit und Wohnungen, Gebäude und Wohnungszählung vom 25. Mai 1987. *Fachserie 5, Statistisches Bundesamt, Wiesbaden*.

- STATISTISCHES BUNDESAMT (1991-2001): Bautätigkeit und Wohnungen. *Fachserie 5, Reihe 3: Bestand an Wohnungen, Statistisches Bundesamt, Wiesbaden.*
- STATISTISCHES BUNDESAMT (1997): Bautätigkeit und Wohnungen, Gebäude und Wohnungszählung vom 30. September 1995 in den neuen Ländern und Berlin-Ost. *Fachserie 5, Statistisches Bundesamt, Wiesbaden.*
- STATISTISCHES BUNDESAMT (2000): Gebäude und Wohnungen, Bestand an Wohnungen und Wohngebäuden, Abgang von Wohnungen und Wohngebäuden, Lange Reihen ab 1968. *Statistisches Bundesamt, Wiesbaden.*
- TECHNISCHE ANLEITUNG ZUR REINHALTUNG DER LUFT 1986 VOM 27. FEBRUAR 1986 (TALUFT) (GMBL. S. 95).
- TIDBLAD, J. (1999): Annahmen für den Anteil an angestrichenem Stahl und angestrichenen, galvanisiertem Stahl für die Berechnungen in dem EU-Projekt ExternE Core Transport, *Persönliche Mitteilung.*
- ULLRICH, J., RAPP, J. & FUCHS, T. (2000): Gibt es in Deutschland nur noch zu warme Monate? [HTTP://www.dwd.de/research/kli/produkte/monitoring/t0500/folgen.html](http://www.dwd.de/research/kli/produkte/monitoring/t0500/folgen.html)
- UMWELTBUNDESAMT (2000): Jahresbericht 1999 aus dem Messnetz des Umweltbundesamtes.- *UBA-Texte 58/00.*
- UN ECE (1996): Manual on methodologies for Mapping Critical Loads/Levels and geographical areas where they are exceeded. *Umweltbundesamt Texte 71/96. Berlin.*
- UN ECE (1998): Statistical analysis of 8 year materials exposure and acceptable deterioration and pollution levels (outline version). Stockholm, 45 S..
- UN ECE (2003): Manual on methodologies for Mapping Critical Loads/Levels and geographical areas where they are exceeded (2003, revised version).
- VDI (1974): VDI-Richtlinie 2310.- Maximale Immissionswerte.
- VDI (1984): VDI-Richtlinie 2310, Blatt 11.- Maximale Immissions-Werte zum Schutze des Menschen, Maximale Immissions-Konzentration für Schwefeldioxid.
- VDI (1985): VDI-Richtlinie 2310, Blatt 12.- Maximale Immissions-Werte zum Schutze des Menschen, Maximale Immissions-Konzentration für Stickstoffdioxid.
- VDI (1987): VDI-Richtlinie 2310, Blatt 15.- Maximale Immissions-Werte zum Schutze des Menschen, Maximale Immissions-Konzentration für Ozon (und photochemische Oxidantien).
- VDI (1989): VDI-Richtlinie 2310, Blatt 6.- Maximale Immissions-Werte zum Schutz der Vegetation, Maximale Immissions-Konzentration für Ozon.
- VDI (2001): VDI-Richtlinie 3789, Blatt 3.- Umweltmeteorologie, Wechselwirkungen zwischen Atmosphäre und Oberflächen, Berechnung der spektralen Bestrahlungsstärke im solaren Wellenlängenbereich, Beuth Verlag, Berlin.

Liste der Autoren

Dipl.-Geogr. Frank Anshelm	tel.: ++49-711-121-3412 fax: ++49-711-121-2755 anshelm@nav.uni-stuttgart.de http://www.nav.uni-stuttgart.de	Institut für Navigation Universität Stuttgart (INS) Breitscheidstraße 2 D-70174 Stuttgart
Dipl.-Phys. Bert Droste-Franke	tel.: ++49-711-78061-69 fax: ++49-711-780-3953 bert.droste-franke@ier.uni-stuttgart.de http://www.ier.uni-stuttgart.de	Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER) Universität Stuttgart Hessbrühlstraße 49a D-70565 Stuttgart
Prof. Dr.-Ing. habil Rainer Friedrich	tel.: ++49-711-78061-12 fax: ++49-711-780-3953 rainer.friedrich@ier.uni-stuttgart.de http://www.ier.uni-stuttgart.de	Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER) Universität Stuttgart Hessbrühlstraße 49a D-70565 Stuttgart
Dipl.-Geogr. Thomas Gauger	tel.: ++49-711-121-4177 fax: ++49-711-121-2755 gauger@nav.uni-stuttgart.de http://www.nav.uni-stuttgart.de	Institut für Navigation Universität Stuttgart (INS) Breitscheidstraße 2 D-70174 Stuttgart
Dr.-Ing. Thomas Reichert	tel.: ++49-721-4640-462 fax: ++49-721-4640-562 rei@ict.fhg.de http://www.ict.fhg.de	Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie ICT Joseph-von-Fraunhofer-Straße 7 D-76327 Pfinztal (Berghausen)
Dipl.-Geogr. Hartmut Schuster	tel.: ++49-711- 121-4177 fax: ++49-711-121-2755 schuster@nav.uni-stuttgart.de http://www.nav.uni-stuttgart.de	Institut für Navigation Universität Stuttgart (INS) Breitscheidstraße 2 D-70174 Stuttgart