

Kartierung kritischer Luftbelastungen unter ARC/INFO

Thomas Gauger und Frank Anshelm

Detaillierte Forschungen im Hinblick auf die Auswirkungen anthropogener Schadstoffbelastungen in der Atmosphäre haben in den letzten Jahren zur Entwicklung des Critical Levels & Loads Konzeptes geführt. Dieses Konzept basiert auf Belastungs-Wirkungs-Beziehungen, ökologische Grenzen der Belastbarkeit werden formuliert. Seine Anwendung auf nationaler und internationaler Ebene beinhaltet umfangreiche Kartierungsprogramme, mit deren Hilfe die Belastungen durch und Wirkungen von Luftverunreinigungen räumlich beschrieben werden. Das GIS ARC/INFO wird als wesentliches Werkzeug bei der Kartierung der Critical Levels & Loads zur Datenhaltung, -verarbeitung und Präsentation der Ergebnisse genutzt.

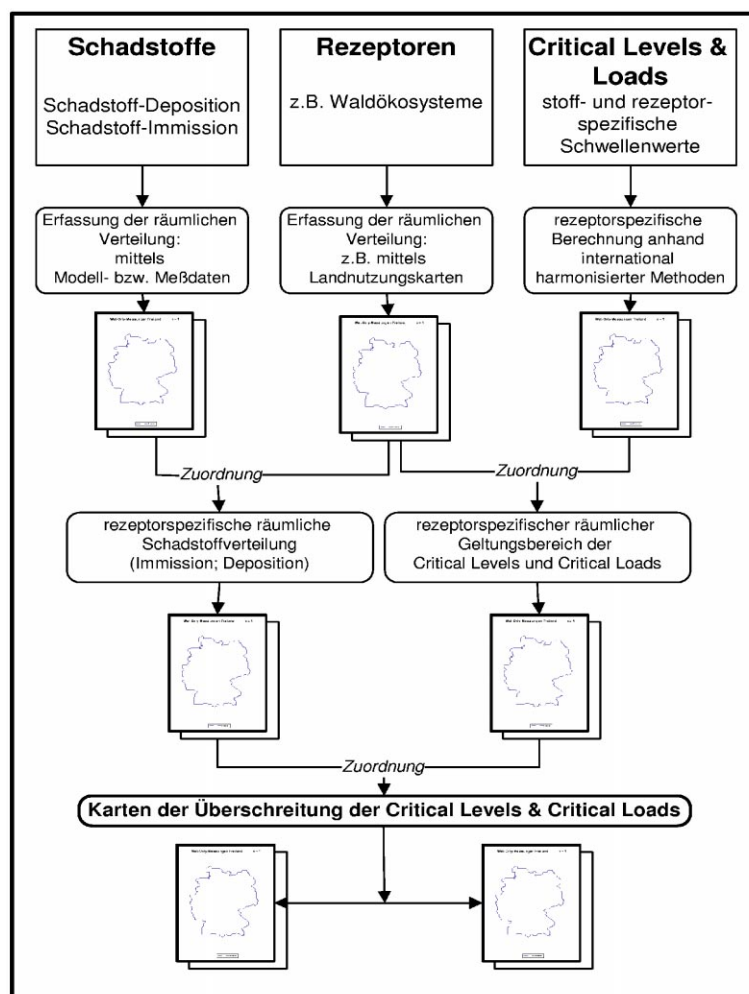
Rahmen und Inhalte des Forschungsvorhabens

Am Institut für Navigation wird im Auftrag des Umweltbundesamtes das Forschungsvorhaben „Kritische Luftschadstoff-Konzentrationen und Eintragsraten sowie ihre Überschreitung für Wald und Agrarökosysteme sowie naturnahe waldfreie Ökosysteme“ (UFOPLAN Nr. 108 03 079) bearbeitet. Projektinhalte sind die bundesweite Datenerfassung, -aufbereitung und kartographische Darstellung der Immissionsbelastung und die Berechnung der Überschreitung der kritischen Luftschadstoff-Konzentrationen - **Critical Levels** - sowie die Erfassung der Depositionsfrachten atmosphärischer Schadstoffe in verschiedene Ökosysteme. Letztere dienen als Input zur Berechnung der Überschreitung der kritischen Eintragsraten - **Critical Loads** - in Deutschland. Die Ergebnisse dieses Forschungsvorhabens werden in enger Kooperation mit der Gesellschaft für Ökosystemanalyse und Umweltdatenmanagement mbH (ÖKO-DATA) in Strausberg und dem National Institute of Public Health and the Environment (RIVM) in Bilthoven, Holland, erarbeitet und fließen als nationaler Beitrag in die gesamteuropäische Kartierung von Critical Levels & Loads ein (Details hierzu in Nagel und Gregor (1998a)).

Das Konzept der Critical Levels und Critical Loads wurde für das europäische Luftreinhalteabkommen der UN-Wirtschaftskommission (UN-ECE) entwickelt. Sowohl das nationale als auch das gesamteuropäische Kartierungsprogramm gemäß dem Critical Levels und Critical Loads Konzept dient als ökologisch begründetes Instrument der Steuerung und Erfolgskontrolle von Emissionsminderungsmaßnahmen (Gregor 1998, Smiatek et al. 1995). Die Erarbeitung der Kartierungsverfahren und die Festlegung der Belastungsgrenzen wird innerhalb des Rahmens des Genfer Luftreinhalteübereinkommens (UN-ECE Convention on Long Range Transboundary Air Pollution, Genf 1979) von der Arbeitsgruppe „Wirkungen“ (Working Group on Effects) wahrgenommen und der UN-ECE Sonderarbeitsgruppe „Kartierung“ (Task Force on Mapping), der die Bundesrepublik Deutschland, vertreten durch das Umweltbundesamt, vorsitzt (Nagel und Gregor 1998a). Das international abgestimmte Kartierungsverfahren ist in der zur Zeit gültigen Fassung als Methodenleitfaden veröffentlicht (Umweltbundesamt 1996). Eine Fortschreibung der eingesetzten Methodik entsprechend neuer wissenschaftlicher Erkenntnisse, iterativer Neubewertung des Wissens sowie durch Fortschritte innerhalb des praktisch erprobten Kartierungsverfahrens selbst, ist wesentlicher Bestandteil der Vorgehensweise innerhalb des Critical Levels und Critical Loads Ansatzes (Gregor 1998).

Von vielen in die Atmosphäre abgegebenen (emittierten) Substanzen gehen schädigende Wirkungen aus, wenn sie über einen längeren Zeitraum einwirken, oder wenn Luftschadstoffe eine bestimmte Konzentration überschreiten, und das Rezeptorsystem (Organismus, Ökosystem, etc.) die Einwirkung nicht mehr ausgleichen kann. Diese Wirkungsschwelle kann prin-

ziell für jeden Schadstoff und jeden Rezeptor bestimmt werden, wenn Wirkungsmechanismen des Schadstoffes und Kompensationsvermögen des Rezeptors hinreichend bekannt sind. **Critical Levels** sind die quantitative Abschätzung der Konzentration von Schadstoffen in der Atmosphäre (Immission), oberhalb derer direkte Schadeffekte an Rezeptoren (Menschen, Pflanzen, Tiere, Ökosysteme, Materialien) nach derzeitigem Wissen zu erwarten sind. **Critical Loads** sind die quantitative Abschätzung der Deposition eines oder mehrerer Schadstoffe, unterhalb derer nach bisherigem Wissen keine schädigenden Wirkungen an spezifizierten Rezeptoren nachweisbar sind (Nagel und Gregor 1998b, Umweltbundesamt 1996). Diese ökologischen Wirkungsschwellen von Luftschadstoffen (Critical Loads und Critical Levels) liegen u.a. für Waldökosysteme vor (Umweltbundesamt 1996). Entstehung (Emission), Verfrachtung, Umwandlung in der Atmosphäre und Verbleib der Luftschadstoffe als Schadstoffgehalt in der Atmosphäre (Immission) sowie Entfernen der Stofffracht aus der Atmosphäre (Gesamtdeposition) durch Auswaschen mit dem Regenniederschlag (nasse Deposition), oder durch trockene Ablagerung von Partikeln und Gasen auf Pflanzen und anderen Oberflächen (trockene Deposition) sind direkt meßbare Größen. In umfangreichen Meßnetzen in Deutschland werden sie routinemäßig ermittelt oder indirekt, mit Hilfe von Schadstoffausbreitungsmodellen, berechnet. Innerhalb des genannten Forschungsprojektes werden auf der Datengrundlage von Meß- und Modelldaten flächendeckende Karten der wirkungsrelevanten Luftschadstoffe in Deutschland erstellen Spranger und Köble (1998) Die Kartierung dient der Ermittlung der regional differenzierten jährlichen Schadstoffdosis, der die verschiedenen Ökosysteme ausgesetzt sind, und der Bestimmung der Überschreitung der Critical Loads und Critical Levels der betrachteten Ökosysteme (s. Abb. 1).



Für die komplexen Aufgaben, die für die wirkungsorientierte Kartierung von Luftschadstoffen zu bewältigen sind, die große Sachdatenmenge (verschiedene Schadstoffe), die geforderte zeitliche (mehrere Jahre) und hohe räumliche Auflösung (z.B. $1 \times 1 \text{ km}^2$) der Kartierungsergebnisse im nationalen Maßstab, ist der Einsatz eines leistungsfähigen Geographischen Informationssystems (GIS) unerlässlich. Im folgenden wird weniger auf die Sachinhalte der Kartierung eingegangen, sondern wesentlich auf die Kartierungsprozeduren unter ARC/INFO und die graphische Darstellung der Kartierungsergebnisse.

Datenbasis, Datenverarbeitung mit ARC/INFO und Datenpräsentation mit ArcView und ArcPlot

Die Datenbasis der Kartierung bilden einerseits **Punktmeßdaten** der Luftqualität, die in den verschiedenen lokalen, regionalen und überregionalen Meßnetzen von Niederschlagsbeschaffenheit (nasse Deposition) und Immission ermittelt werden. Andererseits ist die Einbindung **flächenhafter Modelldaten** (z.B. Niederschlagskarten des DWD; mittels Schadstoffausbreitungsmodellen erzeugte Karten der trockenen Deposition etc.) und weiterer **flächenhafter Grunddaten** (z.B. CORINE Land Cover Landnutzungskarte) erforderlich (Gauger et al. 1997).

Als Ergebnis der Kartierung erhält man für jeden der betrachteten Schadstoffe Karten, die die Belastung (Depositionsfrachten; Immissionskonzentrationen), die Belastbarkeit (Critical Levels; Critical Loads) des betrachteten Rezeptors, und – als Differenz zwischen Belastung und Belastbarkeit – die Höhe der Überschreitung der Critical Levels und Critical Loads räumlich differenziert darstellen (Spranger und Köble 1998). Primäre Ziele der aktuellen Kartierungsarbeiten unter ARC/INFO sind im einzelnen:

- die Berechnung und graphische Darstellung der Critical Levels für Ozon (O_3), reduzierten (NH_3) und oxydierten Stickstoff (NO_x) und Schwefeldioxid (SO_2) in Agrar- und Waldökosystemen
- die Berechnung und graphische Darstellung der Konzentrationen der Luftschadstoffe (Immission)
- die Berechnung und graphische Darstellung der Depositionsfrachten (Deposition Loads) von Sulfatschwefel (SO_4^{2-}), Ammonium- (NH_4^+) und Nitratstickstoff (NO_3^-), Kalzium (Ca^{2+}), Magnesium (Mg^{2+}), Kalium (K^+), Chlorid (Cl^-), Natrium (Na^+), Protonen (H^+) und der Schwermetalle Cadmium (Cd^{2+}) und Blei (Pb^{2+})
- die Berechnung und graphische Darstellung der Critical Loads für versauernd wirkende Schadstoffe und eutrophierenden Stickstoff in (Wald-) Ökosystemen
- die Berechnung und graphische Darstellung der Überschreitung der Critical Loads durch die aktuellen Depositionsfrachten für versauernd wirkende Schadstoffe und eutrophierenden Stickstoff in Waldökosystemen
- graphische Darstellung anderer Daten (Landnutzungskarte, Niederschlagskarte), die in der Berechnung der Critical Levels und Deposition Loads eingesetzt werden
- Bereitstellung topographischer Grunddaten und kartographischer Elemente; Speicherung der Sachdaten, Geometriedaten und Projektionen

Der graphische Output der erstellten Karten am Bildschirm oder als Postscript-Datei wird realisiert unter ArcView oder mit Hilfe des Critical Levels and Deposition Loads Information System (Informationssystem CANDIS) unter ArcPlot. CANDIS wurde zur kartographischen Bearbeitung und Präsentation der Karten vollständig unter der ARC/INFO-AML-Makrosprache aufgebaut erforderlich (Gauger et al. 1997).

Kartierungsbeispiel: Nasse Deposition von Luftschadstoffen

Aus den oben genannten Kartierungsarbeiten sei als Beispiel die Kartierung der nassen Deposition ausgewählt erforderlich (Gauger et al. 1997, 1998). In Abbildung 2 ist der Ablauf der Kartierung der nassen Deposition von Luftschadstoffen in Deutschland dargestellt und in Ab-

bildung 3 (Karten A bis E) sind einzelne Zwischenergebnisse illustriert. Alle Arbeiten der Kartenerstellung unter ARC/INFO sind in der AML-Makrosprache formuliert. Damit sind große Vorteile in Anbetracht der Fülle von Einzelschritten bei der Berechnung der zahlreichen Karten verbunden.

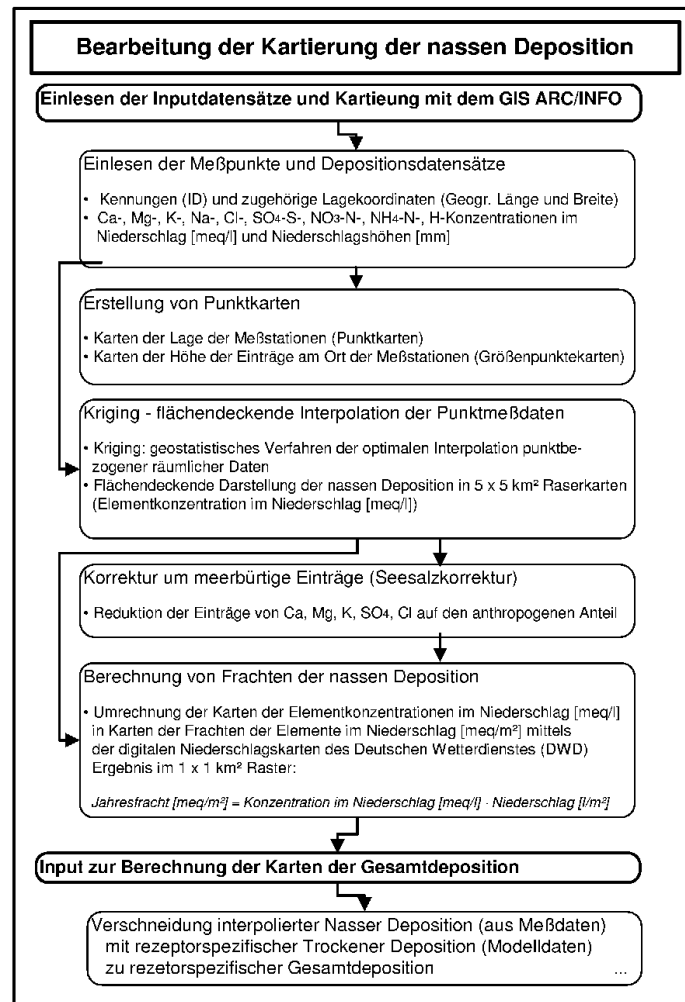


Abb. 2: Ablauf der Bearbeitung der Kartierung der nassen Deposition

Als Basisdaten der nassen Deposition dienen ausschließlich Meßdaten, die in den bestehenden Meßnetzen mittels im Freiland aufgestellter Niederschlagssammlergefäße kontinuierlich ermittelt werden (Gauger et al. 1997, 1998). Die Analysendaten der mit dem Niederschlag aus der Atmosphäre ausgewaschenen Luftschadstoffe liegen als Jahressumme der jeweiligen Stoffkonzentration im Niederschlag vor (Depositionsdatensatz). Die Lage jedes einzelnen Meßpunktes ist in geographischen Koordinaten erfaßt. Nach dem Einlesen der Datensätze können Größenpunktekarten (s. Abb. 3, A) erstellt werden. Sie geben einen Überblick der Lage und Eintragungshöhe an den einzelnen Meßstationen. Gemeinsam mit einer statistischen Analyse lassen sich mit Hilfe dieser Karte z.B. „Ausreißer“ (unverhältnismäßig hohe oder niedrige Meßwerte) in ihrem regionalen Kontext analysieren und gegebenenfalls aus dem Datensatz eliminieren.

Die Interpolation der Meßdaten erfolgt mittels Kriging, einem geostatistischen Verfahren der optimalen flächenhaften Schätzung aus punktbezogenen räumlichen Daten. Das Ergebnis ist

die flächendeckende Darstellung der nassen Deposition in einer Rasterkarte mit 5×5km² Auflösung (Abb. 3, B).

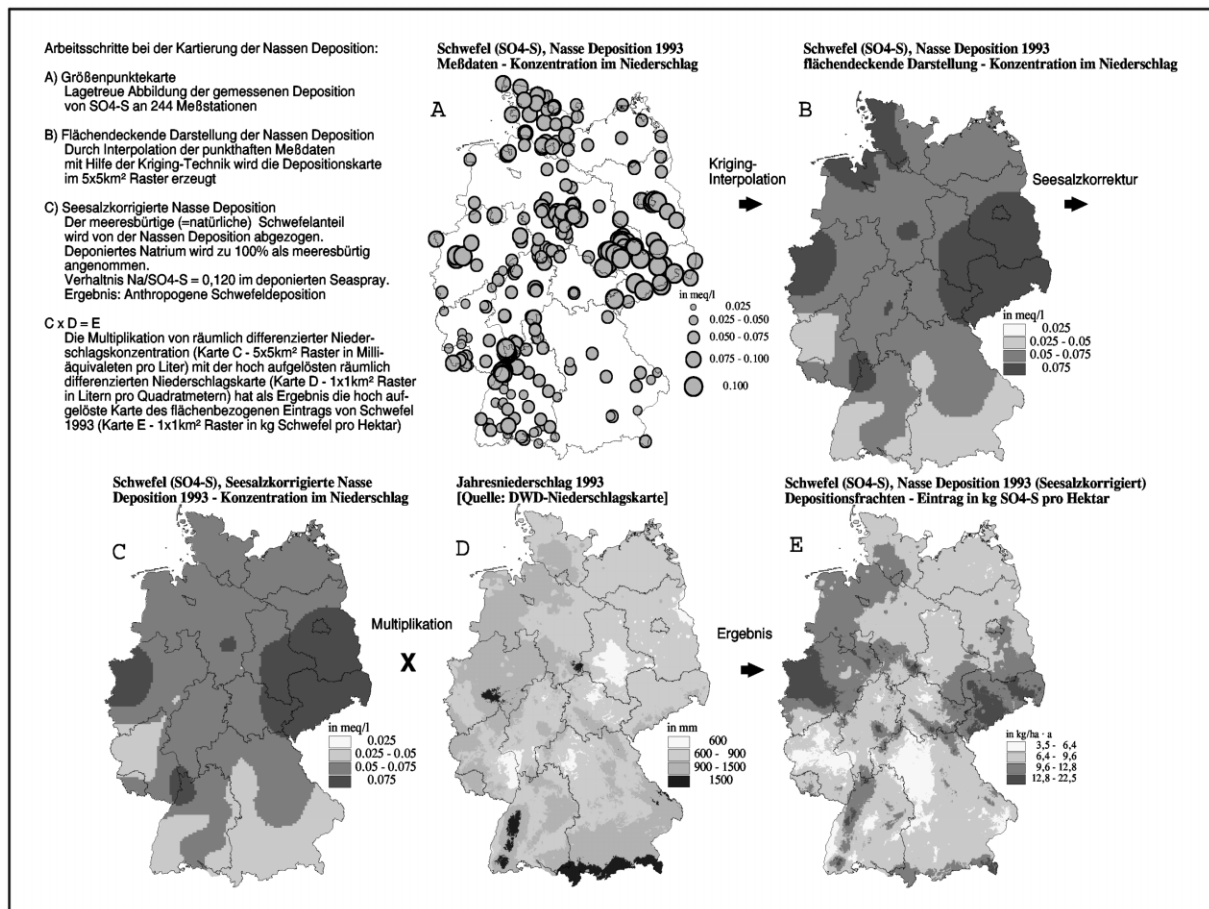


Abb. 3: Illustration der Arbeitsschritte der Kartierung der Nassen Deposition in Deutschland

Sollen nur die anthropogenen Anteile an der Deposition – nur diese können z.B. mit technischen Maßnahmen der Emissionsminderung reduziert werden – dargestellt werden, muß der aus natürlichen Quellen stammende Anteil der deponierten Stoffe ermittelt und vom Ergebnis abgezogen werden. Eine natürliche Quelle für Schwefel sind die Meere, die die Atmosphäre mit Bestandteilen des Seesalz („Seaspray“) befrachten. Mit der „Seesalzkorrektur“ wird der „Seaspray-Anteil“ berechnet und von der flächenhaften nassen Deposition abgezogen. Dazu muß die flächendeckende nasse Deposition von Natrium (Na_{dep}) vorliegen. Natrium gilt als zu 100% meeresbürtige Substanz. Das Verhältnis von Natrium zu den übrigen z.T. meeresbürtigen Stoffen im „Seaspray“ wird für die Seesalzkorrektur (ssk) zugrundegelegt. Das Natrium/Schwefel-Verhältnis ist 0,120 (Umweltbundesmat 1996). An jedem Ort (auf der Karte Abb.3, B) wird die Schwefeldeposition (SO₄-S_{dep}) dementsprechend auf den anthropogenen Beitrag vermindert durch Verschneidung der Karten nach der Formel:

$$SO_4-S_{ssk} = SO_4-S_{dep} (Na_{dep} \times 0,120).$$

Küstennah liegen die Anteile anthropogenen Schwefels in der Regel bei unter 25%, während in Süddeutschland nur zu geringem Anteil meeresbürtiger Schwefel (um bis zu 5%) mit dem Niederschlag deponiert wird (Gauger et al. 1997) (vgl. Abb.3, B und C).

Die Berechnung von Depositionsfrachten (flächenbezogener Eintrag, in kg Schwefel pro Hektar und Jahr) geschieht durch Multiplikation der interpolierten Konzentration von SO₄-S

im Niederschlag (Abb. 3, C) mit dem Jahresniederschlag. Für die Niederschlagshöhen liegen sehr genaue Niederschlagskarten (Abb. 3, D) vor, die vom Deutschen Wetterdienst (DWD) auf der Basis des engmaschigen Niederschlagsmeßnetzes unter Berücksichtigung topographischer Effekte modelliert werden (Müller-Westermeier 1995). Das Ergebnis der Verschneidung dieser beiden Karten ist die räumlich differenzierte Karte des Schwefeleintrags [$\text{kg SO}_4\text{-S /ha} \cdot \text{a}$] mit der nassen Deposition in einer Rasterauflösung von $1 \times 1 \text{ km}^2$ (Abb. 3, E). Wie in Abb. 2 unten angedeutet, ist hier nur ein kleiner Ausschnitt der Arbeiten im Zusammenhang der Critical Levels und Critical Loads Kartierungen in Deutschland beispielhaft vorgestellt. Für weitere Details, Beispiele und Ergebnisse sei auf die angeführte Literatur verwiesen, sowie auf den Artikel "Anshelm F und Gauger Th: Kartierung von Toleranzgrenzwerten der Wirkung von Luftverunreinigungen auf Materialien unter ARC/INFO" in diesem Heft.

Literatur:

- Gauger Th, Köble R und Smiatek G (1997): Kartierung kritischer Belastungskonzentrationen und -raten für empfindliche Ökosysteme in der Bundesrepublik Deutschland und anderen ECE-Ländern. Endbericht zum Forschungsvorhaben 106 01 061 im Auftrag des Umweltbundesamtes. Institut für Navigation der Universität Stuttgart. - Teil 1: Deposition Loads. 126 S. - Teil 2: Critical Levels. 75 S. - Teil 3: Informationssystem CANDIS. 27 S.
- Gauger Th, Köble R und Smiatek G (1998): Erfassung der nassen Deposition. In: Nagel H-D, Gregor H-D (eds.,1998a): Ökologische Belastungsgrenzen – Critical Loads & Levels. Ein internationales Konzept für die Luftreinhaltepolitik. Springer-Verlag. 320 S.
- Gregor H.-D. (1998): Konzepte für die Luftreinhaltepolitik. In: . In: Nagel H-D, Gregor H-D (eds.,1998a): Ökologische Belastungsgrenzen – Critical Loads & Levels. Ein internationales Konzept für die Luftreinhaltepolitik. Springer-Verlag. 320 S
- Müller-Westermeier G (1995): Numerisches Verfahren zur Erstellung klimatologischer Karten. Berichte des Deutschen Wetterdienstes (DWD) Nr. 193. Offenbach.
- Nagel H-D, Gregor H-D (eds.,1998a): Ökologische Belastungsgrenzen – Critical Loads & Levels. Ein internationales Konzept für die Luftreinhaltepolitik. Springer-Verlag. 320 S.
- Nagel H-D, Gregor H-D (1998b): Ökologische Wirkungsschwellen und Grenzen der Belastbarkeit. In: Nagel H-D, Gregor H-D (eds.,1998a): Ökologische Belastungsgrenzen – Critical Loads & Levels. Ein internationales Konzept für die Luftreinhaltepolitik. Springer-Verlag. 320 S
- Smiatek G, Köble R und Gauger Th (1995): Das Critical Loads Levels-Konzept. In: Arndt U, Böcker R und Kohler A (eds.,1995): Grenzwerte und Grenzwertproblematik im Umweltbereich. 27. Hohenheimer Umwelttagung, 27. Januar 1995. Verlag G. Heimbach. S. 111 – 119.
- Spranger T, Köble R (1998): Überschreitungen von Critical Levels und Critical Loads durch aktuelle Belastungen. In: Nagel H-D, Gregor H-D (eds.,1998a): Ökologische Belastungsgrenzen – Critical Loads & Levels. Ein internationales Konzept für die Luftreinhaltepolitik. Springer-Verlag. 320 S
- Umweltbundesamt (1996): Manual on Methodologies and Criteria for Mapping Critical Levels/Loads and Geographical Areas Where They Are Exceeded. Werner B, Spranger T (eds): UBA-Texte 71/96. Umweltbundesamt Berlin. 216 S.