

4. Versauerung

Wichtigste Erkenntnisse

Seit dem Dobris-Lagebericht sind die auf Schwefeldioxid-, Stickstoffoxid- und Ammoniakemissionen zurückzuführenden Folgen von Säureeinträgen im Süßwasser leicht zurückgegangen, so daß sich die wirbellose Fauna an vielen Orten teilweise erholen konnte. Die Vitalität vieler Wälder nimmt jedoch weiterhin ab. Diese Schäden hängen zwar nicht zwangsläufig mit einer Versauerung zusammen, dennoch könnten die langfristigen Auswirkungen von sauren Niederschlägen auf Böden eine Rolle spielen. In sensiblen Gebieten führt der Säureeintrag zu einer erhöhten Mobilität von Aluminium und Schwermetallen und verursacht eine Versauerung des Grundwassers.

Seit 1985 sind die Einträge von Stoffen, die eine Versauerung bewirken, rückläufig. Doch auf mehr als 10 % der europäischen Landfläche, insbesondere in Nord- und Mitteleuropa, werden die kritischen Belastungen (Eintragungsmengen, bei deren Überschreitung mit langfristigen Schäden zu rechnen ist) immer noch überschritten.

In Europa sind die Schwefeldioxidemissionen im Zeitraum von 1980 bis 1995 um die Hälfte zurückgegangen. Der Gesamtbetrag an Stickstoffemissionen (Stickstoffoxide plus Ammoniak), der zwischen 1980 und 1990 mehr oder weniger konstant geblieben war, verringerte sich zwischen 1990 und 1995 um etwa 15 %. Dies war der bisher bedeutendste Rückgang in Mittel- und Osteuropa und den NUS.

Der Verkehrssektor ist inzwischen mit einem Anteil von 60 % im Jahre 1995 der Hauptverursacher von Stickstoffoxidemissionen. Zwischen 1980 und 1994 nahm der Straßengüterverkehr um 54 % zu, und im Zeitraum 1985-1995 stieg die Personenbeförderung auf der Straße um 46 % und auf dem Luftweg um 67 %.

In Westeuropa hat die Einführung von Katalysatoren zu einer Verringerung der Emissionen im Verkehrsbereich geführt. Solche Maßnahmen wirken sich jedoch aufgrund der geringen Erneuerungsrate der Fahrzeugflotte nur langsam aus. Eine weitere Verringerung erfordert wahrscheinlich eine höhere Besteuerung von Treibstoffen und Fahrzeugen.

In MOE und den NUS gibt es ein erhebliches Wachstumspotential im Bereich des privaten Kraftfahrzeugverkehrs, aber auch umfangreiche Möglichkeiten zur effizienteren Nutzung der Energie im gesamten Transportsektor.

Mit den bisher umgesetzten politischen Maßnahmen zur Bekämpfung der Versauerung wurden nur Teilerfolge erzielt:

- Die im Protokoll des Übereinkommens über weiträumige grenzüberschreitende Luftverunreinigung (CLRTAP) festgelegte Zielvorgabe für Stickstoffoxide, bis 1994 die Emissionen auf dem Wert von 1987 zu stabilisieren, wurde für Gesamteuropa, aber nicht von allen 21 Unterzeichnerstaaten erreicht. Dennoch erzielten einige Vertragsparteien ebenso wie einige Staaten, die das Übereinkommen nicht unterzeichnet hatten, einen erheblichen Emissionsrückgang.
- Das Fünfte Umweltaktionsprogramm der Europäischen Kommission (5. UAP) hat für die Jahre 1990 bis 2000 eine 30%ige Reduzierung der Stickstoffoxidemissionen zum Ziel. Bis 1995 war erst ein Rückgang um 8 % erreicht, und es sieht nicht so aus, als könne die Vorgabe für das Jahr 2000 eingehalten werden.

Bis 1999 soll ein auf mehrere Schadstoffe und mehrere Auswirkungen bezogenes Protokoll fertiggestellt werden. Ziel dieses Protokolls wird es sein, auf kosteneffizienter Basis weitere nationale Emissionsgrenzwerte für Stickstoffoxide, Ammoniak und flüchtige organische Verbindungen ohne Methan (NMVOC) festzulegen.

- Die im ersten CLRTAP-Protokoll festgelegte Vorgabe, die Schwefelemissionen im Jahr 1993 gegenüber 1980 um 30 % zu reduzieren, wurde von allen 21 Unterzeichnerstaaten des

Protokolls sowie von fünf Nichtunterzeichnerstaaten eingehalten. Allerdings reduzierten einige europäische Staaten (beispielsweise Portugal und Griechenland) ihre Schwefelemissionen in diesem Zeitraum nicht im selben Maße. Noch ungewisser ist, ob die Zwischenziele des zweiten Schwefel-Protokolls bis zum Jahr 2000 erreicht werden können. Daher sind weitere Maßnahmen erforderlich, um das langfristige Ziel des Protokolls zu erreichen, nämlich dafür zu sorgen, daß keine kritischen Belastungsraten mehr überschritten werden.

- Das Ziel des 5. UAP für Schwefeldioxid, eine Reduzierung um 35 % im Vergleich zu 1985 bis zum Jahr 2000, wurde EU-weit (40 % Reduzierung insgesamt) und von den meisten Mitgliedsstaaten im Jahr 1995 erreicht.

Anschließend an das 5. UAP werden in der EU weitere Maßnahmen zur Verwirklichung der langfristigen Zielvorgabe des zweiten Schwefel-Protokolls vorbereitet. Sie umfassen die Reduzierung des Schwefelgehalts von Erzeugnissen auf Erdölbasis, die Verringerung der Emissionen von Großfeuerungsanlagen und die Festlegung von Emissionsgrenzen für Straßenfahrzeuge. Ein vorläufiges Ziel der EU-Strategie gegen die Versauerung, über das derzeit beraten wird, ist eine 55%ige Reduzierung der Stickstoffoxidemissionen zwischen 1990 und 2010. Wenn diese Vorgabe erreicht werden soll, muß der Schadstoffausstoß im Verkehrssektor besonders aufmerksam beobachtet werden.

4.1. Einleitung

In weiten Teilen Europas schädigen Säureeinträge, die vor allem auf vom Menschen verursachte Emissionen der drei gasförmigen Schadstoffe Schwefeldioxid (SO₂), Stickstoffoxide (NO_x) und Ammoniak (NH₃) zurückzuführen sind, säureempfindliche Süßwassersysteme, Wälder, Böden und natürliche Ökosysteme. Die Auswirkungen zeigen sich auf vielfältige Weise, so unter anderem im Laub- bzw. Nadelverlust und einer verringerten Vitalität der Bäume, in abnehmenden Fischbeständen und einer geminderten Vielfalt anderer Wasserorganismen in säureempfindlichen Seen und Fließgewässern sowie durch Veränderungen in der Bodenchemie. Aber auch bedeutsame Teile des europäischen Kulturerbes wie etwa Bauwerke aus Kalkstein und Marmor, Denkmäler und Ornamentglasfenster tragen Schäden davon. Zudem ruft die Ablagerung von Stickstoffverbindungen Eutrophierungseffekte in terrestrischen und marinen Ökosystemen hervor. Seit dem *Dobbris*-Lagebericht ist der Säureeintrag in die Seen mit seinen schädlichen Auswirkungen zurückgegangen, was vor allem durch verringerte Schwefelemissionen erreicht wurde. Die Versauerung der Böden wird jedoch zunehmen, solange kritische Belastungsraten überschritten werden, wie dies in großen Teilen Europas noch der Fall ist.

Die Masse der SO₂- und NO_x-Emissionen entsteht bei der Verbrennung von Kohle und Rückstandsheizöl vor allem in Kraftwerken zur Erzeugung von Strom, zur Beheizung von Gebäuden im Wohnungs-, Gewerbe- und Dienstleistungssektor, in der Industrie sowie durch Fahrzeuge mit Diesel- und Ottomotor, wozu auch Schiffe und Flugzeuge zählen. NH₃-Emissionen sind hauptsächlich auf die Produktion und Verwendung von Naturdünger zurückzuführen.

Kasten 4.1: Transport und Ablagerung von sauren Verbindungen

In die Atmosphäre abgegebenes SO₂, NO_x und NH₃ gelangen auf direktem Weg auf die Erdoberfläche zurück. Dies geschieht entweder als trockene Ablagerung auf Vegetation bzw. auf anderen Elementen der Erdoberfläche oder als feuchte Ablagerung zusammen mit Regen, Schnee, Hagel, Nebel und Tau, aber auch indirekt in trockener oder feuchter Form nach chemischer Umwandlung. SO₂ und NO_x können in der Atmosphäre oder aber nach der Ablagerung zu Schwefel- bzw. Salpetersäure umgesetzt werden. Aus NH₃ können durch Reaktion mit Schwefel- und Salpetersäure Ammoniumsulfat- und Ammoniumnitratpartikel entstehen.

Die Verweildauer der den Säureeintrag bewirkenden Gase und Partikel in der Atmosphäre ist von den meteorologischen und chemischen Verhältnissen abhängig. Im Schnitt werden Schwefelverbindungen innerhalb von zwei bis vier Tagen nach der Freisetzung abgelagert. Bei Stickstoffoxiden dauert dies in der Regel länger, aber ihre Umwandlung in Salpetersäure erfolgt verhältnismäßig schnell, und diese verbleiben nur für eine relativ kurze Zeit in der Atmosphäre. Ammoniak wird ebenfalls rasch abgelagert, aber nicht, wenn es mit Schwefel- und Salpetersäure eine Verbindung zu Ammoniumsulfat

und -nitrat eingeht. Diese Wechselwirkungen sind von besonderer Bedeutung für die weiträumige Verbreitung von Schwefel- und Stickstoffverbindungen, die über Entfernungen von mehreren tausend Kilometern erfolgen kann.

Die stärksten Ablagerungen von Schwefel sind in den Regionen mit den größten Emissionen zu verzeichnen und vor allem auf die trockene Ablagerung von Schwefeldioxid zurückzuführen. Starke Schwefelablagerungen sind auch in Regionen mit hohen Niederschlagsmengen festzustellen, beispielsweise in Küsten- und Gebirgsregionen. Ähnlich sehen die Muster für die Ablagerung von oxidiertem Stickstoff aus (der von NO_x -Emissionen stammt), obwohl sich verhältnismäßig geringe Mengen (im Vergleich zu Schwefel) in der Nähe ihre Emissionsquelle absetzen. Oxidierter Stickstoff wird über weite Strecken transportiert und trägt zur Problematik des troposphärischen Ozons bei (Kapitel 5), da NO_x ein bedeutender Vorläufer für die Ozonbildung ist.

Bei reduzierten Stickstoffverbindungen (die von Ammoniakemissionen herrühren) ist die Ablagerung in stärkerem Maße als im Falle von Schwefel durch hohe Depositionsraten in der Nähe der Quellen gekennzeichnet. Ammoniumoxide werden also nicht so weit befördert wie Schwefel- und Stickstoffoxide. So stammen in Frankreich 33 % der Schwefelablagerungen und 62 % des gesamten Stickstoffeintrags von Emittenten innerhalb des Landes, 30 % des Schwefels und 15 % des Gesamtstickstoffs haben ihren Ursprung in den Nachbarländern Deutschland, Spanien und Vereinigtes Königreich und 37 % bzw. 23 % in weiter entfernten Quellen.

Die Informationen und Daten über Ablagerungen, Konzentrationen, die weiträumige Verbreitung und den grenzüberschreitenden Fluß von Versauerung bewirkenden Luftschadstoffen entstammen vor allem dem Programm über die Zusammenarbeit bei der Messung und Bewertung der weiträumigen Übertragung von luftverunreinigenden Stoffen in Europa (EMEP), das im Rahmen des Genfer UNECE-Übereinkommens über weiträumige grenzüberschreitende Luftverunreinigung (LRTAP) auf den Weg gebracht wurde. Karte 4.1 zeigt den EMEP-Raum.

Nach der Freisetzung in die Atmosphäre verteilen sich die säurebildenden Gase und können mehrere Tage lang in der Luft verbleiben und durch Winde über große Strecken befördert werden, so daß sie weit von der Emissionsstelle entfernt zur Wirkung kommen. Die Vorgänge, durch die saure Emissionen zur Erdoberfläche zurückgelangen und zur Versauerung des Bodens und des Wassers führen, werden in Kasten 4.1 zusammenfassend dargestellt. Die kritischen Belastungsraten sind Gegenstand von Kasten 4.2.

Versauerung ist ein grenzüberschreitendes Problem, für dessen Lösung nationale wie auch internationale Initiativen erforderlich sind, wie zum Beispiel Maßnahmen zur Förderung der Umstellung auf sauberere Brennstoffe und die Minderung der Emissionen insbesondere von Fahrzeugen sowie von kohle- und ölgefeuerten Kraftwerken.

4.2 Auswirkungen

Wälder und Böden

In seit 1986 regelmäßig durchgeführten Erhebungen wurde über ausgedehnte Schäden an Bäumen berichtet, die sich insbesondere in Mitteleuropa in Form von Laub- bzw. Nadelverlust und Verfärbung zeigen (Becher et al., 1996, Lorenz et al., 1997). Die Schäden stehen jedoch nicht unbedingt mit der Versauerung im Zusammenhang. Andere Belastungsfaktoren wie Dürre, Wind- oder Frostschäden sowie die normale Alterung eines Baumbestands führen ebenfalls zu Laub- bzw. Nadelverlust und verminderter Vitalität. In Skandinavien ist aufgrund rauher Umweltbedingungen und langer Winter mit zunehmender Höhe eine verminderte Nadelmasse bei Fichten zu beobachten. In einigen Gebieten sind die Auswirkungen von Trockenheit deutlich sichtbar. Dies betrifft beispielsweise Spanien, das im Zeitraum 1990-1993 unter starken Dürreperioden litt. Andere Schadstoffbelastungen wie Ozoneinwirkung und Perioden hoher Schwefeldioxidkonzentrationen können ebenfalls eine Rolle spielen. Selbst in Regionen, in denen das Neutralisationsvermögen des Bodens wahrscheinlich einen wichtigen Einfluß auf das Wachstum und die Alterung von Waldbeständen ausübt, läßt sich daher kein kausaler Zusammenhang zwischen einem die Belastungsgrenze (Kasten 4.2) überschreitenden Säureeintrag und beobachteten Rückgängen der Laub- bzw. Nadelmasse feststellen. Trotz verminderter

Emissionen zeigen die Beobachtungsergebnisse einen generellen Anstieg des Laub- bzw. Nadelverlusts der Bäume. Dies mag zum Teil auf die Alterung des beobachteten Bestände zurückzuführen sein. Die Versauerung des Bodens ist jedoch ein langsamer Prozeß und wird sich in Gebieten, in denen die kritischen Belastungsraten überschritten werden, mit den möglichen langfristigen Auswirkungen noch weiter fortsetzen.

Kasten 4.2: Kritische Belastungsraten (Critical Loads)

Unter einer kritischen Belastungsraten ist die höchstmögliche Ablagerung säurebildender Verbindungen, die zu keinen chemischen Veränderungen mit langfristigen schädlichen Auswirkungen auf die Struktur und Funktion der Ökosysteme führt, zu verstehen (Gregor et al., 1996). Die Ermittlung kritischer Belastungen für Europa erfolgte anhand eines Rasters mit einer Größe von 50 x 50 km² (Posch et al., 1997), so daß der Vergleich mit gemessenen bzw. modellierten Depositionsraten möglich war. Das Kriterium für die Berechnung dieser Critical Loads findet keine allgemeine Zustimmung. Wie Versuche zeigen, mögen nämlich gewöhnliche Forstbaumarten gegenüber bestimmten chemischen Veränderungen im Boden nicht besonders empfindlich sein. Breiter Konsens besteht jedoch darin, daß Säureeinträge über die kritischen Belastungsraten hinaus zu einer Verarmung an Pflanzennährstoffen führen, und das kann das Wachstum und die Vitalität der Bäume beeinträchtigen. Im europäischen Rahmen ist die Überschreitung kritischer Belastungen der einzige Maßstab für eine solche Nährstofferschöpfung.

Das im Zusammenhang mit den Auswirkungen auf Bäume und Böden verwendete Konzept der Critical Loads ist auch auf Süßwasser anwendbar, wobei sich die kritischen Werte auf Schäden an ausgewählten Organismen und Populationen (Fische und Wirbellose) gründen, die gegenüber Veränderungen der Wasserchemie aufgrund von Säureeinträgen empfindlich sind.

Berechnet wird die kritische Belastung für Schwefel sowie für säurebildenden und eutrophierenden Stickstoff. Die eutrophierenden Wirkungen von Stickstoff stehen mit seinem verstärkten Eindringen ins Grundwasser, in Fließgewässer und Seen sowie mit Veränderungen im Ökosystem Wald im Zusammenhang. Auf nationaler Ebene werden Daten über Critical Loads in Europa beim CCE (Co-ordinating Centre for Effects) eingereicht, das die Angaben sammelt und in Karten und Datenbanken einträgt. Die jüngsten Werte sind bei Posch et al., 1997, zu finden. Bei der Arbeit an den Emissionsreduktionsstrategien benutzt die UNECE die sogenannten "5 percentile conditional critical loads", d.h. situationsabhängige kritische Belastungsraten für die 150 x 150 km großen EMEP-Rasterquadrate. 5 Perzentil bedeutet dabei, daß die 5 % der Fläche eines Rasterquadrats mit den empfindlichsten Ökosystemen unberücksichtigt bleiben. Da die Versauerung durch die Ablagerung von Schwefel wie auch Stickstoff verursacht wird, ist die Schwefelmenge, die ein Ökosystem zu tolerieren vermag, vom Niveau der Stickstoffablagerung abhängig und umgekehrt. Ist die Größenordnung der Stickstoffablagerung bekannt (beispielsweise aufgrund von Modellberechnungen) lassen sich *situationsabhängige* Belastungsraten für Schwefel ableiten, die von Jahr zu Jahr schwanken können, wenn die Stickstoffablagerung variiert. Ebenso werden die situationsabhängigen Belastungsraten für Stickstoff hergeleitet, wenn die Schwefelablagerung bekannt ist. Die situationsabhängigen Belastungsraten werden niedriger sein als (bzw. theoretisch ebenso hoch sein wie) die kritische Belastungsraten, die allein anhand der Schwefelablagerung geschätzt wurden. Eine Überschreitung wird registriert, sobald eine Ablagerung festgestellt bzw. berechnet wird, die eine kritische Belastungsraten übersteigt. Mit Überschreitungsschätzungen beschäftigt sich Abschnitt 4.4.2.

Werden für Emissionsminderungen umfangreiche mittlere Überschreitungen in Rasterquadraten von 150 x 150 km Größe herangezogen, ergibt sich ein entscheidender Nachteil daraus, daß die Ablagerung innerhalb einer großen Rasterfläche beträchtlich variieren kann, so daß sich die tatsächlichen Überschreitungen in lokalen Ökosystemen erheblich von den Werten unterscheiden können, die auf der Schätzung von durchschnittlichen Ablagerungen beruhen.

Süßwasser

In Europa sind vor allem in nördlichen Regionen Tausende von Seen durch Säureeinträge ernsthaft in Mitleidenschaft gezogen. Die Auswirkungen auf die Wasserorganismen können direkter Art sein, wenn sie auf die Toxizität zurückzuführen sind, oder indirekter Art, sofern sie durch den Verlust an säureempfindlichen Beutetieren bzw. pflanzlicher Nahrung oder aber durch komplexe Veränderungen in der Wasserchemie infolge des gestiegenen Säuregrads hervorgerufen werden. In vielen Fällen sind ganze Fischbestände verschwunden (Hesthagen et al., 1995).

Aus einem Vergleich der Daten für die 80er und 90er Jahre geht hervor, daß Verringerungen der Schwefelablagerungen vielerorts zu einer Verbesserung der Wasserchemie und einer teilweisen

Erholung der wirbellosen Fauna führen (Lükewille et al., 1997). Im regionalen Rahmen nehmen die Sulfatkonzentrationen fast überall ab, und in nahezu allen Fällen sind die Rückgänge in den 90er Jahren größer als in den 80er Jahren (Abbildung 4.1). Eine Ausnahme bildet das Vereinigte Königreich, wo es trotz der Minderung der Schwefelablagerungen noch wenig Belege für eine Reduzierung der Schwefelkonzentrationen gibt.

Veränderungen der Sulfatmenge führen zu Veränderungen in der Konzentration der anderen Wasserbestandteile. In den nordischen Staaten (Finnland, Schweden, Norwegen) ging die Alkalinität in den 80er Jahren zurück (Verstärkung des Säuregehalts), nahm aber in den 90er Jahren zu (Erholung). An vielen europäischen Standorten (Italien, Deutschland, Niederlande, Dänemark) erhöhte sich die Alkalinität in den 80er Jahren, und in den 90er Jahren beschleunigte sich die Zuwachsrate. Auch hier deutet wieder wenig darauf hin, daß sich die Alkalinität der britischen Binnengewässer im gleichen Zeitraum ebenfalls erhöht.

Abbildung 4.2 zeigt für verschiedene Länder den Anteil der Seen, in denen die kritische Belastung für Schwefel überschritten wird. Der hohe Wert für Norwegen erklärt sich aus sehr starken Schwefelablagerungen und sehr niedrigen kritischen Belastungsraten insbesondere im Süden. Für Wales ist die Angabe trotz der verhältnismäßig hohen kritischen Belastungsraten aufgrund starker Deposition ebenfalls hoch. Die Ablagerungen im russischen Teil der Halbinsel Kola rühren überwiegend von Schmelzhütten her. In den Zahlen für Finnland und Schweden ist enthalten, daß die Belastungsgrenze in ca. 3000 finnischen und 6000 schwedischen Seen überschritten wurde.

Sonstige Auswirkungen

In Gebieten mit hohen Schwefeldioxidkonzentrationen sind die schädlichen Auswirkungen säuernder Verbindungen auf Werkstoffe fast gänzlich auf gasförmiges Schwefeldioxid zurückzuführen. Die Kosten für die Reduzierung der Schwefeldioxidemissionen in Europa werden zu einem großen Teil dadurch aufgewogen, daß geringere Wartungs- und Erneuerungskosten für Gebäude und bauliche Anlagen anfallen (Kucera und Fitz, 1995). Zunehmende Bedenken bereiten die nachteiligen Auswirkungen von Schwebstoffen (PM) auf die Gesundheit. Dies gilt insbesondere im städtischen Raum (siehe Kapitel 12, Abschnitte 12.2.2 und 12.3.2), in dem die Emission von säurebildendem Schwefel und Stickstoff eine vorrangige Quelle der kleinen Teilchen mit einem Durchmesser unter 2,5 Mikrometer ist (PM_{2,5}).

Abbildung 4.1 Veränderungen des Sulfatgehalts und der Alkalinität des Oberflächenwassers, 80er und 90er Jahre

Jährliche Veränderungen des Sulfatgehalts im Oberflächenwasser während der 80er und 90er Jahre in verschiedenen Regionen Europas

Sulfat
Mittleuropa
Nordische Länder

UK

Jährliche Veränderungen des Alkalinität des Oberflächenwassers während der 80er und 90er Jahre in verschiedenen Regionen Europas

Alkalinität
Mittleuropa
Nordische Länder

UK

Anmerkung: Negative Werte deuten auf eine Abnahme des Sulfatgehalts bzw. der Alkalinität hin, positive Werte dagegen auf einen Anstieg. Die Länge des Balkens gibt das Ausmaß der Veränderung an. **Quelle:** Lükewille et al. (1997).

Abbildung 4.2 Anteil der Seen mit Überschreitung der Critical Loads für Schwefel (S) in ausgewählten Staaten, Herbst 1995

Norwegen
Wales
Kola (Rußland)
Finnland

Schweden Dänemark Karelien (Rußland) Schottland Anteil an der Gesamtheit der Seen

Anmerkung: Die Werte für Dänemark und Karelien sind aufgrund der geringen Anzahl der untersuchten Seen mit Unsicherheiten behaftet.

Quelle: Henriksen et al. (1998)

Abbildung 4.3 Konzentrationen von Sulfateilchen in der Luft an Standorten im ländlichen Raum, 1980-1995

Ispra, Italien
Jarczew, Polen
Suwalki, Polen
Keldsnor, Dänemark
Tange, Dänemark
Birkenes, Norwegen
High Muffles, Vereinigtes Königreich
Eskdalemuir, Vereinigtes Königreich

Anmerkung: Unterschiede bei den vertikalen Skalen

Quelle: EMEP/CCC

In der Luft enthaltene Sulfat- und Ammoniumnitratteilchen können die Sicht beeinträchtigen und als Kondensationskerne für die Nebel- und Wolkenbildung fungieren. Die in der Luft befindlichen Sulfateilchen vermögen die globale Erwärmung durch Treibhausgase auf regionaler Ebene teilweise aufzuheben (siehe Kapitel 2, Abschnitt 2.3).

4.3. Entwicklung der gemessenen atmosphärischen Konzentrationen

Die geringeren Auswirkungen der Säureablagerung in Europa sind das Resultat der Reduzierung der Schwefeldioxidemissionen in den vergangenen 15 Jahren und der entsprechenden Abnahme der Konzentrationen von Schwefeldioxid und Sulfataerosol in der Luft sowie des Säuregrads der Niederschläge. Am ausgeprägtesten sind die Verbesserungen an Standorten in West- und Nordeuropa, da für die Emissionsquellen dort Maßnahmen zur Eindämmung des Ausstoßes gelten.

Oft werden Schwefeldioxidkonzentrationen stark von Emissionen beeinflusst, die verhältnismäßig nahe an den Meßstellen auftreten, so daß die Entwicklungstendenzen dieser Konzentrationen schwer einzuschätzen sind. Schwefelsäure- und Sulfataerosolpartikel weisen längere Verweilzeiten in der Atmosphäre auf als Schwefeldioxid und geben daher besser Aufschluß über allgemeine Tendenzen. Bei der Untersuchung der Aufzeichnungen von EMEP-Meßstellen für den Zeitraum 1980-1993 (Abbildung 4.3) zeigen sich wesentliche Rückgänge luftbürtiger Sulfatkonzentrationen an Standorten in Nordeuropa. Eine Reduzierung des Sulfatgehalts der Luft ist auch in Ispra in Norditalien erkennbar. Die beobachteten Verringerungen stimmen im großen und ganzen mit der Reduktion der Emissionen überein, die Mitte der 70er Jahre in Westeuropa und Ende der 80er Jahre in Osteuropa einsetzte.

4.4. Deposition von Säurebildnern

4.4.1. Entwicklungstendenzen

In Europa stiegen die Schwefelemissionen seit 1880 (lediglich unterbrochen durch den Zweiten Weltkrieg) stetig an, bis 1980 ein Höchstwert von 60 Mio. Tonnen pro Jahr verzeichnet wurde, worauf dann ein steiler Rückgang erfolgte (Abbildung 4.4) (Mylona, 1996).

Bei den Depositionen zeigt sich das gleiche allgemeine Bild, wie es in Abbildung 4.5 für eine Meßstelle in Südnorwegen und eine in Südpolen dargestellt wird. Der polnische Standort ist repräsentativ für das sogenannte schwarze Dreieck, das heißt das Gebiet, in dem die Grenzen von Deutschland, der Tschechischen Republik und Polen zusammentreffen. In Norwegen begann der Rückgang der Deposition viel eher als in Polen, da Nordwesteuropa etwa 10 bis 15 Jahre früher als die NUS und die mittel- und osteuropäischen Länder (MOEL), insbesondere die damalige DDR, die Tschechoslowakei und Polen, Maßnahmen zur Emissionseindämmung ergriff.

In Abbildung 4.6 sind die Trends der Ablagerung von Schwefel, oxidiertem Stickstoff und reduziertem Stickstoff in verschiedenen Regionen für den Zeitraum zwischen 1985 und 1995 dargestellt. Die Regionen weisen unterschiedliche meteorologische Bedingungen auf, und ihre Nähe zu großen Emissionsgebieten variiert beträchtlich (siehe Karten 4.4 und 4.5). Im allgemeinen zeigt sich bei den Ablagerungen das gleiche Bild wie bei der Entwicklung der Emissionen. Der Rückgang der NO_x -

Emissionen war in diesem Zeitraum in Westeuropa gering, da die Ergebnisse von verbesserten Technologien und Emissionsminderungen in Industrie und Haushalten durch die verstärkte Nutzung von Kraftfahrzeugen wieder zunichte gemacht wurden (siehe Abschnitt 4.6).

Europaweit nimmt die relative Bedeutung der Stickstoffablagerungen verglichen mit der Schwefeldeposition immer mehr zu.

Im Prinzip können die Folgen der Schwefeldioxidemissionen teilweise durch die Ablagerung alkalischen Materials wie Flugasche und einige Industriestäube neutralisiert werden. Im Ergebnis von Bekämpfungsmaßnahmen sind die Emissionen solcher Substanzen jedoch jahrzehntelang zurückgegangen (Hedin et al., 1994), und die freigesetzten Mengen sind mittlerweile wahrscheinlich zu gering, um noch eine signifikante neutralisierende Wirkung ausüben zu können (Semb et al., 1995). Einträge alkalischen Wüstenstaubs mögen in Süd- und Südosteuropa jedoch eine erhebliche Rolle spielen.

4.4.2. Überschreitung kritischer Belastungen

Abbildung 4.7 verdeutlicht die Veränderungen, die sich zwischen 1985 und 1995 im Anteil an der gesamten Ökosystemfläche Europas ergeben haben, in dem Überschreitungen der kritischen Belastungsraten festgestellt wurden. Das Bild stimmt im allgemeinen mit den Emissionssenkungen überein, die sich vollzogen haben. Die großen Unterschiede von einem Jahr zum anderen lassen sich schwankenden meteorologischen Bedingungen zuschreiben. Bei Schwefel hängt der Abwärtstrend mit den verringerten SO_2 -Emissionen zusammen (Abbildung 4.8). Diese Entwicklung wirkt sich negativ auf die Gesamtfläche aus, in der Überschreitungen der kritischen Belastungsraten für säurebildenden Stickstoff festgestellt wurden, denn die situationsabhängige kritische Belastung liegt für Stickstoff höher, wenn die Schwefelablagerung abnimmt. Die Gesamtstickstoffemissionen ($\text{NO}_x + \text{NH}_3$) schwankten in diesem Zeitraum jedoch nur geringfügig. Das widerspiegelt sich in der nahezu unveränderten Fläche, auf der die kritische Belastungsraten für eutrophierenden Stickstoff überschritten wird, und dieser ist unabhängig von der Schwefeldeposition.

Karte 4.1 zeigt die räumliche Verteilung der Überschreitungen der situationsabhängigen kritischen Belastungsraten für Schwefel. Höchstwerte sind in der Nähe der Emissionsquellen in Mitteleuropa, dem Ostteil des Vereinigten Königreichs und an einigen anderen Standorten festzustellen.

Abbildung 4.4 Europäische Schwefelemissionen, 1880-1995

Mio. Tonnen

Quellen: Mylona (1996) und EMEP/MSC-W (von 1980)

Abbildung 4.5 Schwefelablagerung im südlichen Teil Norwegens und Polens, 1880-1995

Südnorwegen

Südpolen

Quellen: Mylona (1996) und EMEP/MSC-W (von 1985)

Karte 4.1 Überschreitung der situationsabhängigen Belastungsraten (5-Perzentil-Wert) für Schwefel, 1995

Überschreitung kritischer Belastungsraten für Schwefel

1:30 000 000

mehr als 2000

1000-2000

Belastungen in eq/ha im EMEP-150-Raster

Gebiete ohne Überschreitung

200-400

40-200

weniger als 40

Quellen: EMEP/MSC-W und CCE

Karte 4.2 Überschreitung der situationsabhängigen Belastungsraten (5-Perzentil-Wert) für säurebildenden Stickstoff, 1995

Überschreitung kritischer Belastungsraten für säurebildenden Stickstoff

1:30 000 000

Belastungen in eq/ha im EMEP-150-Raster

mehr als 1000

400-1000

Gebiete ohne Überschreitung

200-400

40-200

weniger als 40

Quellen: EMEP/MSC-W und CCE

Karte 4.3 Überschreitung der kritischen Belastungsraten (5-Perzentil-Wert) für eutrophierenden Stickstoff, 1995

Überschreitung der kritischen Belastungsraten für eutrophierenden Stickstoff

1:30 000 000

Belastungen in eq/ha im EMEP-150-Raster

mehr als 1000

400-1000

Gebiete ohne Überschreitung

200-400

40-200

weniger als 40

Quellen: EMEP/MSC-W und CCE

In Teilen Skandinaviens, in denen die Emissionen eher gering sind, ist die Zahl der Überschreitungen von Critical Loads aufgrund des geringen Pufferungsvermögens des Bodens (ein Maß für die Fähigkeit des Bodens, den Säuregehalt zu neutralisieren) recht groß. Im Mittelmeerraum weist der Boden ein weit größeres Pufferungsvermögen auf, so daß die kritischen Belastungen höher liegen und es weit weniger Überschreitungen gibt. Karte 4.2 zeigt die Überschreitung der situationsabhängigen Belastungsraten für säurebildenden Stickstoff, Karte 4.3 die Überschreitung der kritischen Belastungsraten für eutrophierenden Stickstoff.

4.5. Emissionen

4.5.1. Trends im Zeitraum 1980-1995

Die Daten in diesem Abschnitt umfassen alle Emissionen innerhalb des EMEP-Raums, die in der EMEP-Emissionsdatenbank enthalten sind (Olendrzynski, 1997). Aus den Abbildungen 8, 9 und 10 ist ersichtlich, wie sich die Emissionen von SO₂, NO_x und NH₃ zwischen 1980 und 1995 verändert haben. Das allgemeine Bild ist gekennzeichnet durch einen großen und stetigen Rückgang des SO₂-Ausstoßes im gesamten Zeitraum und eine generelle, aber weniger rasche Verringerung der Stickstofffreisetzung, und zwar erst ab etwa 1990. Die SO₂-Gesamtemissionen sanken zwischen 1980 und 1995 um etwa 50 % (Abbildung 4.8). Am ausgeprägtesten war der Rückgang in den NUS und in der EU mit 58 % bzw. 57 %, während er in Mittel- und Osteuropa nur ca. 40 % erreichte. In den MOEL sind die Emissionen vor allem seit 1990 zurückgegangen. Geringere Abnahmen waren bei NO_x zu verzeichnen, jedoch vollzog sich zwischen 1990 und 1995 eine 15%ige Abnahme der Gesamtemissionen (8 % in der EU, 29 % in MOE und 31 % in den NUS) (Abbildung 4.9). Für die Zeit vor 1990 sind die Emissionsdaten von NH₃ unvollständig und mit Unsicherheiten behaftet, während seitdem europaweit zuverlässigere offizielle Schätzwerte zugänglich wurden. Von 1990 bis 1995 gingen die NH₃-Gesamtemissionen in Europa um 15 % zurück (9 % in der EU, 32 % in MOE und 17 % in den NUS) (Abbildung 4.10).

4.5.2. Emissionen nach Sektoren

Abbildung 4.11 zeigt, daß die Schwefelemissionen vor allem aus dem Energiesektor stammen, NO_x aus dem Verkehrssektor und NH₃ aus der Landwirtschaft. Die Angaben über die zeitliche Entwicklung der

Emissionen in den verschiedenen Sektoren sind zwar recht unvollständig, deuten aber auf eine Verringerung des Anteils der SO₂-Emissionen aus der Industrie, eine Zunahme im Energiesektor und bei NO_x auf eine Verschiebung von der Industrie zum Verkehrswesen hin. Nach wie vor der größte NH₃-Emittent ist die Landwirtschaft.

4.5.3. Räumliche Verteilung der Emissionen

Die Karten 4.4 und 4.5 zeigen die räumliche Verteilung der Emissionen von Schwefeldioxid (in Tonnen Schwefel pro Jahr) und von Stickstoffoxiden sowie Ammoniak (in Tonnen Stickstoff pro Jahr) im Jahre 1995 für Europa unter Verwendung der EMEP-Emissionsdatenbank mit dem 50 x 50-km-Raster (Olendrzynski, 1997).

Abbildung 4.6 Jährliche Ablagerung, 1985-1995

Schwefel
Südpolen
Benelux-Staaten
Norditalien
Südnorwegen

Oxidierter Stickstoff
Benelux-Staaten
Südpolen
Norditalien
Südnorwegen

Reduzierter Stickstoff
Benelux-Staaten
Norditalien
Südpolen
Südnorwegen

Quelle: EMEP/MSC-W

Schwefelemissionen stammen überwiegend aus Mitteleuropa, Teilen des Vereinigten Königreichs, Spanien, Italien, Teilen des Balkans, der Ukraine und Rußland. Die 10 größten Schwefelemittenten (in 1000 Tonnen S pro Jahr) waren im Zeitraum 1985-1995 Deutschland (2612), Rußland (2248), das Vereinigte Königreich (1741), Polen (1704), die Ukraine (1348), Spanien (1022), Bulgarien (943), die Tschechische Republik (894), Italien (827) und Frankreich (623).

Aufgrund der hohen trockenen Depositionsrate von SO₂ in der Nähe der Emissionsquelle hat jeder der 10 größten Schwefelemittenten auch jeweils den höchsten Anteil an den inländischen Schwefelablagerungen. In einer Reihe angrenzender Staaten (Österreich, Belgien, Dänemark, Luxemburg, Niederlande, Norwegen, Schweiz, Schweden, Belarus, Lettland und Litauen) kommt mehr als die Hälfte des innerhalb ihrer Grenzen abgelagerten Schwefels von diesen 10 größten Emittenten. Dies spiegelt sich auch in den Überschreitungen der kritischen Belastungsraten wider (Karte 4.1).

Bei Stickstoff ist das Bild der Emissionen ausgeglichener als bei Schwefel. Besonders deutlich ist dies in den Niederlanden, im Westen Deutschlands und im Süden des Vereinigten Königreichs zu erkennen. Wie in Abschnitt 4.1 dargestellt, erlangen Stickstoffemissionen zunehmende Bedeutung als Quelle der Versauerung. In weiten Teilen Frankreichs, Spaniens, Italiens, Skandinaviens, der MOEL und der NUS liegen die freigesetzten Stickstoffmengen mittlerweile höher als die Schwefelemissionen. Die 10 größten Emittenten von Gesamtstickstoff (NO_x und NH₃, in 1000 Tonnen N pro Jahr) waren Rußland (1610), Deutschland (1486), Vereinigtes Königreich (1067), Frankreich (1064), Italien (938), die Ukraine (880), Polen (793), Spanien (615), Rumänien (388) und die Niederlande (355).

In Bulgarien, Dänemark, Deutschland, Frankreich, Irland, Italien, den Niederlanden, Portugal, Rumänien, Spanien, der Türkei, der Ukraine und dem Vereinigten Königreich haben die einheimischen

Emissionen einen Anteil von mehr als 50 % an den inländischen Stickstoffablagerungen. In den übrigen Ländern stammen mehr als die Hälfte der Ablagerungen von Quellen außerhalb des Landes.

Im Vergleich zu Schwefel erfolgt die Deposition des Gesamtstickstoffs etwas stärker in der Nähe des Freisetzungsortes, aber der grenzüberschreitende Charakter des Stickstofftransports ist noch deutlich erkennbar (siehe Kasten 4.1). Unterschiede in der Verbreitungsstrecke spiegeln sich in den Karten zu Überschreitungen kritischer Belastungen wider, Karten 4.1 und 4.2.

4.6. Anstieg der verkehrsbedingten Emissionen

Erfolge bei der Bewältigung des Problems der Säurebelastung waren vor allem das Ergebnis der fortschreitenden Verringerung der Schwefeldioxidemissionen. Derzeit richtet sich das Augenmerk stärker auf den Verkehrssektor, in dem umweltpolitische Maßnahmen nicht mit dem Wachstum des Verkehrsaufkommens Schritt gehalten haben. Der Transportsektor ist verantwortlich für den größten Teil der Stickstoffoxidemissionen. Aber das Verkehrswesen ist auch eine bedeutende Quelle anderer Luftschadstoffe, darunter Kohlenmonoxid, Kohlendioxid, Schwebstoffe und flüchtige organische Verbindungen ohne Methan (NMVOC). Einige der organischen Verbindungen sind toxisch, wobei Benzol und 1,3-Butadien derzeit besonderen Anlaß zur Sorge geben. Im Straßenverkehr werden darüber hinaus polyaromatische Kohlenwasserstoffe freigesetzt und bei Verwendung von verbleitem Benzin auch Blei.

Zu den Faktoren, die in Europa den Anstieg der Emission einer Reihe von Schadstoffen fördern, zählen:

- der anhaltende Anstieg des Straßenverkehrs vor allem mit Lkw und Pkw zu Lasten des Schienentransports,
- der Anstieg des Luftverkehrs, des in Europa am schnellsten wachsenden Verkehrsträgers,
- das große Wachstumspotential des Individualverkehrs in Osteuropa entsprechend den in Westeuropa gemachten Erfahrungen.

Abbildung 4.7 Anteil Europas, in dem kritische Belastungsraten überschritten werden, 1985-1995

Prozentualer Anteil der gesamten Landfläche des EMEP-Raums
säurebildender Schwefel
säurebildender Stickstoff
eutrophierender Stickstoff

Anmerkung: Schätzungen des Anteils der Gesamtfläche Europas, auf der Überschreitungen der situationsabhängigen Belastungsrate (5-Perzentil-Wert) für Schwefel und Stickstoff und der kritischen Belastungsrate (konstant) für eutrophierenden Stickstoff auftreten. Berechnet anhand von EMEP-Rasterquadraten der Größe 150 x 150 km unter Verwendung von Schätzungen des Teils von Ökosystemen, die je Rasterquadrat von Überschreitungen der kritischen Werte betroffen sind (Posch, 1997). **Quelle:** EMEP/MS-CW und CCE

Karte 4.4 Emissionen von Schwefel im Jahre 1995 bei 50 km Auflösung (Tonnen S pro Jahr)

mehr als 50 000
10 000 - 50 000
1 000 - 5 000
Emission von Schwefel
1 : 30 000 000
Emission in Tonnen im EMEP-50-Raster
500 - 1 000
100 - 500
1-100

Anmerkungen: Enthält Emissionen der Schifffahrt in der Nordsee und im Nordost-Atlantik (Lloyd's, 1995). Über Emissionen der Ostseeschifffahrt stehen nur wenige Angaben zur Verfügung, über das Mittelmeer und das Schwarze Meer gibt es kaum Daten. Die Emissionen in diesen Meeren werden stark unterbewertet.

Quelle: EMEP

Karte 4.5 Emissionen von Stickstoffoxiden und Ammoniak im Jahre 1995 bei 50 km

Auflösung (Tonnen N pro Jahr)

mehr als 50 000

10 000 - 50 000

5 000 - 10 000

1 000 - 5 000

Emission von Stickstoffoxiden und Ammoniak

1 : 30 000 000

Emission in Tonnen im EMEP-50-Raster

500 - 1 000

100 - 500

1 - 100

Anmerkungen: Enthält Emissionen der Schifffahrt in der Nordsee und im Nordost-Atlantik (Lloyd's, 1995). Über Emissionen der Ostseeschifffahrt stehen nur wenige Angaben zur Verfügung, über das Mittelmeer und das Schwarze Meer gibt es kaum Daten. Die Emissionen in diesen Meeren werden stark unterbewertet.

Quelle: EMEP

4.6.1. Verkehrsaufkommen

Güterverkehr

Abbildung 4.12 zeigt, welche Veränderungen sich in Europa zwischen 1985 und 1995 im Güterverkehr vollzogen haben. Den größten Anteil am anhaltenden Wachstum des gesamten Güterverkehrs in Westeuropa hat der Straßenverkehr. Zum Teil infolge des Strukturwandels der Wirtschaft in Ostdeutschland ging der Schienenverkehr um 20 % zurück. Nur 17 % des Güterverkehrs werden derzeit über die Schiene abgewickelt.

Zwar hat der Güterverkehr auf der Schiene proportional gesehen in MOE und den NUS einen größeren Stellenwert als in Westeuropa, doch ist er wiederum vor allem aufgrund der wirtschaftlichen Umgestaltung rasch zurückgegangen. Das Wachstum des Straßengüterverkehrs seit 1993 deutet auf eine Annäherung an westeuropäische Gepflogenheiten hin.

Aus Karte 4.6 geht hervor, wie hoch in verschiedenen Ländern der Anteil an Gütern ist, der auf der Straße befördert wird.

Personenverkehr

Der Personenverkehr ist in Europa im Wachsen begriffen. In der EU nahm der Flugreiseverkehr in den 10 Jahren vor 1994 um 82 % und der Autoreiseverkehr um 46 % zu, während die Inanspruchnahme von Bussen um 15 % und die der Bahn nur um 3 % anstieg. Auch hier sind wieder auffällige Unterschiede zwischen Ost- und Westeuropa festzustellen (Abbildung 4.13).

Die meisten Pkw gibt es in Ländern wie Deutschland, der Schweiz, Österreich und Italien, was zum einen den höheren Wohlstand in diesen Ländern widerspiegelt, zum anderen aber auch auf das Wachstumspotential des Individualverkehrs in den übrigen Ländern Europas hindeutet.

In Mittelosteuropa vollzieht sich derzeit eine starke Verschiebung vom öffentlichen zum privaten Personenverkehr. Dies führt nicht nur zu wachsenden Verkehrsstaus und einer chaotischem Parksituation in den Städten, die nicht für die Aufnahme einer großen Anzahl von Pkw konzipiert wurden, sondern auch zu verstärkter Schadstoffbelastung. Zudem werden die öffentlichen Verkehrsnetze erheblich eingeschränkt bzw. rationalisiert. Berichten zufolge waren beispielsweise 1993 in Polen 24 000 km Eisenbahnstrecke in Betrieb, aber nach Abschluß des geplanten Straßenbauprogramms werden schätzungsweise nur noch 14 000 km übrigbleiben (Hall, 1993).

Entsprechend der Zunahme des Straßenverkehrs wurde in Europa das Straßennetz ausgebaut, das Eisenbahnnetz hingegen beschnitten oder allenfalls auf dem alten Stand belassen. Auf dem gesamten Kontinent wurden Autobahnen gebaut, so daß ihre Gesamtstrecke deutlich zugenommen hat (über 200 % in der EU allein seit 1970). Die Länge aller Straßen zusammengenommen ist in der EU seit 1970 ebenfalls um 17 % und in den MOEL um 12 % gewachsen.

Abbildung 4.8 SO₂-Emissionen in Europa, 1980-1995

Mio. Tonnen
Gesamteuropa
Westeuropa
MOE
NUS

Abbildung 4.9 NO_x-Emissionen in Europa, 1980-1995

Mio. Tonnen
Gesamteuropa
Westeuropa
MOE
NUS

Abbildung 4.10 NH₃-Emissionen in Europa, 1980-1995

Mio. Tonnen
Gesamteuropa
Westeuropa
MOE
NUS

Quelle: EMEP/MSC-W

Das Bild bei der Eisenbahn entspricht den Entwicklungen im Gütertransport. In der EU ist das Eisenbahnnetz um 6 % geschrumpft, während es in den MOEL und den NUS im wesentlichen unverändert bleibt.

Den in Abschnitt 2.7.2 behandelten Energieszenarien liegt im großen und ganzen der Ansatz zugrunde, daß das Verkehrsaufkommen in Europa weiter zunehmen wird (Amman, 1997). Innerhalb der EU rechnet man damit, daß der Energieeinsatz in Kraftwagen zwischen 1990 und 2010 von 15 GJ/Kopf auf 18 GJ/Kopf ansteigt. Nach dem Szenario, das von der Fortschreibung des Ist-Zustands ausgeht, wird der Energieverbrauch durch Automobile in den MOEL und den NUS von 3,6 auf 5,4 GJ/Kopf wachsen. Bei dem Szenario, das davon ausgeht, daß sich die Energieverwendung und -effizienz in den MOEL und den NUS dem westeuropäischen Niveau annähert, wird jedoch für Europa ein Verbrauch von 12 GJ/Kopf prognostiziert. Ein Großteil des Anstiegs wird dabei auf Mittel- und Osteuropa entfallen. Dadurch wird es in diesen Ländern zu einem Anwachsen der Emission von Luftschadstoffen durch Kraftfahrzeuge kommen.

Während der Energiebedarf für Verkehrszwecke voraussichtlich zunehmen wird, ist es möglich, daß die Energieintensität im Verkehrswesen (Transportenergienutzung je Einheit des BIP) sinkt. Innerhalb der EU wird mit einem Rückgang der Energieintensität im Verkehrswesen von 0,76 auf 0,64 MJ/EUCU BIP im Zeitraum zwischen 1990 und 2010 gerechnet. Für die MOEL und die NUS geht man entsprechend dem Fortschreibungsszenario von einem Absinken von 1,92 auf 1,61 MJ/EUCU BIP und nach dem Energiekonvergenz-Szenario von einem Rückgang auf 1,11 MJ/EUCU BIP aus (Amman, 1997). In diesen Ländern besteht noch breiter Raum für signifikante Steigerungen der Effizienz der Verkehrssysteme.

4.6.2. Bekämpfung der Emissionen im Straßenverkehr

Zur Bekämpfung der Emissionen im Straßenverkehr wurde in Europa eine Reihe von Gesetzesinitiativen gestartet. Innerhalb der EU enthält die Richtlinie 91/441/EWG die Forderung, ab 1993 sämtliche Neuwagen mit Fremdzündungsmotor mit Drei-Wege-Katalysatoren auszustatten. Seitdem befinden sich die Emissionen von NO_x, CO und NMVOC durch Kraftfahrzeuge im Rückgang. Weitere Maßnahmen sind für 2001 vorgesehen. Wenn das Verkehrsaufkommen jedoch weiter wächst, ist davon auszugehen, daß die Emissionen in ca. 15 Jahren wieder ansteigen.

Tendenzen zum Bau größerer Automobile führen zum Gesamtanstieg der CO₂-Emissionen, der sich durch Extraausstattungen mit zusätzlichem Kraftstoffverbrauch wie Klimaanlage noch vergrößert. Bei

steigendem Verkehrsaufkommen ist mit zunehmenden CO₂-Gesamtemissionen zu rechnen, allerdings ist die Größenordnung nur schwer vorauszusagen.

Der Einsatz schadstoffärmerer Kraftstoffe läßt sich durch steuerliche Anreize fördern. In Abbildung 4.14 ist die Entwicklung der Kraftstoffpreise im Straßenverkehr seit 1978 dargestellt. Zwar ähnelt sich die Entwicklung der Preise für Diesel und Benzin, doch liegt der Benzinpreis aufgrund der Besteuerung höher. In Europa waren 1996 die Durchschnittspreise für bleifreies und verbleites Benzin weitgehend gleich.

Durch das Grünbuch der Europäischen Kommission über faire und effiziente Preise im Verkehr ist die Debatte über die Internalisierung der externen Kosten in Schwung gekommen. Seit 1993 gibt es in der EU ein "Eurovignette"-System, das darauf abzielt, ein gemeinsames Gebührensystem für schwere Lkw bei Benutzung von Straßen der Gemeinschaft einzurichten. Vorschläge zur Aktualisierung und Änderung des Systems werden derzeit diskutiert, so unter anderem die Einführung niedrigerer Sätze für Fahrzeuge, die der neuen Abgasgrenzwertstufe Euro II entsprechen.

Abbildung 4.11 Emissionen säurebildender Substanzen je Sektor, 1994/1995

SO₂
 Sonstige 3 %
 Haushalte 9 %
 Verkehr 5 %
 Industrie 22 %
 Energie 61 %
 Insgesamt: 18,5 Mio. Tonnen

NO_x
 Sonstige 1 %
 Haushalte 4 %
 Verkehr 60 %
 Energie 21 %
 Industrie 14 %
 Insgesamt: 15,5 Mio. Tonnen

NH₃
 Industrie 6 %
 Landwirtschaft 93 %
 Verkehr 1 %
 Insgesamt: 4,5 Mio. Tonnen

Anmerkungen: Daten nur für die EU, die EFTA und MOE. EU-Daten für 1994, EFTA- und MOE-Daten für 1995. Keine Daten für andere europäische Länder verfügbar.

Quellen: EUA und ETC/AE

Karte 4.6 Güterverkehr im Verhältnis zum Gesamttransport auf der Straße, der Schiene, über Binnenwasserstraßen und durch Rohrleitungen, 1995

Güterverkehr
 1:30 000 000
 Güterstraßenverkehr
 80-98%
 60-80%
 40-60%
 20-40%
 2-20%
 nicht genügend Daten verfügbar

Quelle: UNSTAT, ECMT

Im Jahre 1993 hatte Diesel in der EU einen Anteil von 48 % am Gesamtverbrauch von Kraftstoffen im Straßenverkehr, während es 1980 noch 33 % gewesen waren. Der verstärkte Einsatz von Dieselmotoren kann zwar zu geringen Reduzierungen der CO₂-Emissionen führen, aber andererseits die Schwebstoff- und NO_x-Freisetzung im städtischen Raum erhöhen, die mit gesundheitlichen

Problemen des Menschen in Zusammenhang gebracht werden. Was die Emissionen von NO_x, CO und NMVOC anbelangt, weisen Dieselfahrzeuge zwar Vorteile gegenüber benzingetriebenen Kraftwagen auf, die jedoch bei Ausstattung der Benzinmotoren mit Katalysatoren aufgewogen werden.

Ein weiterer straßenverkehrsbedingter Schadstoff ist Blei, das dem Benzin zur Erhöhung der Oktanzahl zugesetzt wird und stark an der atmosphärischen Konzentration von Blei in Stadtgebieten beteiligt sein kann (siehe Abbildung 12.7). Zur Verminderung dieser Emissionen haben viele Länder bleifreies Benzin eingeführt (Karte 4.7). In einigen osteuropäischen Ländern können Motoren generell mit niedrigoktanigem Benzin ohne Bleizusatz arbeiten. Katalysatoren werden durch Bleigehalt im Benzin geschädigt, so daß für Fahrzeuge mit Katalysator bleifreies Benzin verwendet werden muß. Voraussetzung für die Senkung der säurebildenden Emissionen durch den Einsatz von Katalysatoren ist also die Verfügbarkeit von unverbleitem Benzin.

Die Produktion von bleifreiem Benzin ist etwa 2 % teurer als von Kraftstoff mit Bleizusatz, deshalb haben einige Länder fiskalische Anreize zur Förderung des Einsatzes von unverbleitem Benzin eingeführt. Diese Maßnahmen und die Forderung nach der Ausstattung der Fahrzeuge mit Katalysatoren sowie Informationskampagnen führen schließlich zum Rückgang der Bleiemissionen im Straßenverkehr (siehe Abbildung 6.4).

Abbildung 4.12 Güterverkehr in Europa, 1985-1995

Mrd. Tonnenkilometer
Westeuropa
Insgesamt
Binnenwasserstraßen
Schiene
Rohrleitungen
Straße
Mrd. Tonnenkilometer
Mittel- und Osteuropa

Quelle: UNSTAT, ECMT

Abbildung 4.13 Personenverkehr in Europa, 1995

Westeuropa
Mittel- und Osteuropa
Neue Unabhängige Staaten
Luft
Zug
Bus
Pkw

Quelle: UNSTAT, ECMT

Karte 4.7 Verwendung bleifreien Benzins in Europa, 1996

Verwendung bleifreien Benzins
1:30 000 000
Anteil von bleifreiem Benzin am gesamten Benzin
>95%
75-95%
<50%
keine Angaben

Quelle: Dänisches Umweltministerium, 1998

4.7. Maßnahmen

Zwei grundlegende Hindernisse, die der europäischen Verkehrspolitik bei Maßnahmen gegen die Säurebelastung im Wege stehen, sind die eingeschränkten Befugnisse der EU und anderer überstaatlicher Gremien sowie die Tatsache, daß der Förderung freier Märkte und der wirtschaftlichen

Entwicklung oft zu Lasten der Umwelt oberste Priorität eingeräumt wird. Im Fünften Umweltaktionsprogramm wird anerkannt, daß es zur Schaffung eines zukunftsfähigen Verkehrssystems konzentrierter Aktionen nicht nur seitens der EU-Organen, sondern auch durch die Regierungen der Staaten und die örtlichen Gebietskörperschaften, die freie Wirtschaft und Einzelpersonen wie auch seitens anderer Interessengruppen bedarf. Seither wurden ein fünfjähriges Aktionsprogramm für die Entwicklung der europäischen Verkehrspolitik und ein Weißbuch über die Wettbewerbsfähigkeit und den freien Zugang zu den Eisenbahnnetzen auf den Weg gebracht. Eine weitere Initiative, das Auto-Öl-Programm unter Einbeziehung der Kommission und der Motor- und Mineralölindustrie,

Abbildung 4.14 Kraftstoffpreise im europäischen Straßenverkehr 1978-1996

USD je Liter
 verbleites Benzin
 bleifreies Benzin
 Diesel

Quelle: IEA

Tabelle 4.1 Derzeitige und geplante Emissionsreduktionsziele der UNECE und der EU im Hinblick auf Versauerung und Eutrophierung

Derzeitige UNECE-Protokolle	Jahr	Hauptziel
Erstes Schwefelprotokoll (Helsinki)	1985	Reduktion der Schwefelemissionen bzw. des grenzüberschreitenden Flusses von Schwefel um 30 % gegenüber dem Stand von 1980 bis zum Jahr 1993.
Zweites Schwefelprotokoll (Oslo)	1994	Festlegung nationaler Emissionshöchstgrenzen für 2000 (und in einigen Fällen für 2005/2010) ausgehend von einer Zwischenzielsetzung, die eine 60 % geringere Überschreitung des kritischen Wertes der Schwefelablagerung (5-Perzentil-Wert) zum Inhalt hat.
Erstes NO _x -Protokoll (Sofia)	1988	Stabilisierung des NO _x -Emissionen bzw. des grenzüberschreitenden Flusses von NO _x auf dem Stand von 1987 bis zum Jahr 1994.
In Vorbereitung befindliche UNECE-Protokolle	Jahr (voraussichtlich)	Hauptziel
"multi-Schadstoff/multi-Effekt"-Protokoll	1999	Festlegung nationaler Emissionshöchstgrenzen für NO _x , NH ₃ und VOC unter Verwendung eines wirkungsorientierten (kritische Belastungen) und kostengünstigen Ansatzes, der auf die Minderung der Versauerung, Eutrophierung und des troposphärischen Ozons im Zusammenhang mit Reduktionen der NMVOC-Emissionen abzielt (siehe auch Kapitel 5).
Derzeitige EU-Politik	Jahr	Hauptziel
SO ₂ -Zielsetzung des 5. UAP	1992	35 % Reduktion gegenüber dem Stand von 1985 bis 2000. Zur Erreichung dieses Ziels sind mehrere Richtlinien in Kraft getreten bzw. werden derzeit überprüft.
NO _x -Zielsetzung des 5. UAP	1992	Stabilisierung bis 1994 und Reduktion um 30 % bis 2000 jeweils gegenüber dem Stand der Emissionen von 1990. Zur Erreichung dieses Ziels sind verschiedene Richtlinien in Kraft getreten bzw. derzeit in Vorbereitung.
In Vorbereitung befindliche	Jahr	Hauptziel

EU-Strategie	(voraussichtlich)
Reduktion der Emissionen von SO ₂ , NO _x und NH ₃	1998
Überschreitung [auf der Grundlage eines	Gründet sich auf einen wirkungsorientierten (kritische Belastungen) und kostengünstigen Ansatz, Reduktion der Emissionen von SO ₂ , NO _x und NH ₃ , um bis 2010 die Zwischenvorgabe einer um mindestens 50 % geringeren Referenzszenarios einschließlich sämtlicher (bestehender und in Vorbereitung befindlicher) Richtlinien innerhalb der EU] in allen Ökosystembereichen zu erlangen, in denen kritische Belastungsraten für den Gesamtsäuregrad überschritten werden

galt den Emissionen von Straßenfahrzeugen und der Luftqualität. Es beinhaltet Normen für die Fahrzeugemissionen und die Kraftstoffqualität, Maßnahmen zur Bekämpfung von Verdunstungsemissionen sowie Inspektions- und Wartungsprogramme. Derzeit wird "Auto Oil II" mit Normen für das Jahr 2005 entwickelt.

Die Bekämpfung der Emissionen im Straßenverkehr ist Bestandteil einer Reihe von Strategien zur Bewältigung des Problems der Versauerung in Europa auf nationaler und internationaler Ebene, die im Ergebnis des Genfer UNECE-Übereinkommens über weiträumige grenzüberschreitende Luftverunreinigung (CLRTAP) von 1979, des ersten mehrseitigen Vertrags zur Luftverschmutzung, und des Fünften Umweltaktionsprogramms (5. UAP) entstanden sind. In Tabelle 4.1 sind die verschiedenen UNECE-Protokolle und EU-Maßnahmen zusammengefaßt; Fortschritte auf dem Weg zur Erreichung ihrer Zielsetzungen sind in Tabelle 1 der Zusammenfassung dieses Berichts aufgeführt.

Schwefeldioxid (SO₂)

Ziel des ersten Schwefelprotokolls im Rahmen des CLRTAP war es, die Emissionen bis 1993 um 30 % unter Stand von 1980 zu senken. Das langfristige Ziel des 1994 unterzeichneten zweiten Schwefelprotokolls lautet, die kritischen Belastungsraten für Schwefel nicht zu überschreiten. Ein Zwischenziel ist die Reduzierung des Abstands zwischen den Schwefelablagerungsmengen von 1990 und den kritischen Belastungen (5-Perzentil-Wert) für Schwefel in den verschiedenen Gebieten Europas um mindestens 60 % bis zum Jahr 2000. Auf der Grundlage einer Kostenwirksamkeitsanalyse wurden für verschiedene europäische Staaten unterschiedliche Emissionsreduktionsziele festgelegt.

Das Ziel des ersten Protokolls wurde für Europa insgesamt und von fast allen Vertragsparteien des Übereinkommens erreicht. Ob die Zwischenvorgabe des zweiten Protokolls bis zum Jahr 2000 erreicht werden kann, ist ungewiß. Für die EU als Ganzes besteht das Zwischenziel beispielsweise in einer Reduzierung gegenüber den Werten von 1980 um 62 % bis zum Jahr 2000. 1995 war eine Minderung um 57 % gegenüber den Werten von 1980 erreicht; für Europa als Ganzes belief sich die Verringerung auf 50 %.

Das im 5. UAP enthaltene SO₂-Ziel (Verringerung der Emissionen um 35 % gegenüber dem Stand von 1985 bis zum Jahr 2000) wurde für die EU insgesamt 1995 (Gesamtreduktion 40 %) und von den meisten Mitgliedstaaten erreicht.

In erster Linie waren die in Europa zwischen 1980 und 1995 erzielten Minderungen der SO₂-Emissionen das Ergebnis von Eindämmungsmaßnahmen für große Punktquellen (Rauchgasentschwefelung und Verwendung schwefelärmerer Kohle). Einige Verringerungen waren auf Maßnahmen wie die Umstellung von Kohle auf Erdgas und den Einsatz von weniger Kohle, die Erneuerung von Kraftwerken sowie die Umgestaltung der Volkswirtschaft in den MOEL und den NUS zurückzuführen.

Wenn die Vertragsparteien des CLRTAP-Übereinkommens das langfristige Ziel des zweiten Protokolls erreichen wollen, müssen sie ihre Emissionen weiter reduzieren. Sonstige derzeitige und geplante Initiativen auf EU-Ebene zur Förderung eines kontinuierlichen Rückgangs der Schwefelemissionen sind unter anderem:

- eine Strategie zur Verringerung der Säurebelastung - eine Mitteilung über eine Gemeinschaftsstrategie gegen die Versauerung wurde von der Kommission im März 1997 angenommen (Dok. KOM (97) 088);
- die Überarbeitung der LCP-Richtlinie 88/609/EWG zur Begrenzung von Schadstoffemissionen (SO₂- und NO_x-Emissionen) von Großfeuerungsanlagen in die Luft;
- Richtlinie 93/12/EWG des Rates über den Schwefelgehalt bestimmter flüssiger Brennstoffe (Diesel- und Gasöl);
- eine vorgeschlagene neue Richtlinie zur Begrenzung des Schwefelgehalts von schwerem Heizöl;
- eine Reihe von Richtlinien, die für verschiedene Arten von Straßenfahrzeugen Emissionsgrenzwerte festlegen, und verschiedene Vorschläge für neue Richtlinien auf der Grundlage der Ergebnisse des Auto-Öl-Programms;
- die Richtlinie über die integrierte Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung.

Zwischen den von der EU und den im Rahmen der UNECE entwickelten Strategien zur Eindämmung der Emissionen besteht ein enger Zusammenhang (Amann et al., 1997).

Stickstoffoxide (NO_x)

Ziel des ersten NO_x-Protokolls des Übereinkommens über weiträumige grenzüberschreitende Luftverunreinigung (CLRTAP) war es, die Emissionen bis 1994 auf dem Stand von 1987 zu stabilisieren. Dies wurde im gesamteuropäischen Maßstab erreicht, wenn auch nicht von allen Unterzeichnern des Protokolls.

Derzeit besteht das vorrangige Ziel des Übereinkommens darin, die Aushandlung eines neuen NO_x-Protokolls 1998 zum Abschluß zu bringen. Dabei handelt es sich um ein Protokoll zu mehreren Schadstoffen und mehreren Auswirkungen, in dem es um Versauerung, Eutrophierung und troposphärisches Ozon sowie um die Emission von NO_x, NH₃ und VOC geht. Wie das zweite Schwefelprotokoll hat es zum Ziel, schädliche Auswirkungen auf die Umwelt auf möglichst kostengünstige Weise zu minimieren und schließlich auszuschalten.

Im Rahmen dieses neuen Protokolls muß die Kostenoptimierung jedoch so erfolgen, daß zumindest die Umweltqualitätsziele auf dem Gebiet der Versauerung, der Eutrophierung und des troposphärischen Ozons erreicht werden.

Das 5. UAP enthält die Vorgabe, die NO_x-Emissionen zwischen 1990 und 2000 um 30 % zu reduzieren. Bis 1995 wurde eine 8%ige Verringerung erzielt, und es ist nicht sehr wahrscheinlich, daß der für 2000 anvisierte Wert erreicht wird. Es ist davon auszugehen, daß der Straßenverkehr weiter zunimmt. Die Vorteile verschiedener Maßnahmen, die zur Minderung der Emissionen von Kraftfahrzeugen ergriffen wurden, wie zum Beispiel strengere Abgasnormen, werden aufgrund der geringen Erneuerungsrate des Fahrzeugbestandes erst nach dem Jahr 2000 voll zum Tragen kommen. Bei stationären NO_x-Quellen wird die weitere Senkung der Emissionen von der Energienachfrage, dem Brennstoffmix sowie davon abhängen, wie schnell die Mitgliedstaaten die Bestimmungen einschlägiger Richtlinien (z. B. die LCP- und die IVU-Richtlinie) umsetzen.

Um die Versauerung, Eutrophierung und den Ozongehalt der Troposphäre zu verringern, sind weitere Reduktionen der NO_x-Emissionen nach dem Jahr 2000 erforderlich. Es ist wahrscheinlich, daß die EU-Strategien, -Ziele und -Maßnahmen zur Bekämpfung der Versauerung denen des zweiten CLRTAP-NO_x-Protokolls ähneln bzw. in dieses integriert werden. Das vorläufige Ziel im Rahmen der EU-Strategie gegen die Versauerung ist eine Senkung der NO_x-Emissionen zwischen 1990 und 2010 um 55 %.

Ammoniak (NH₃)

Derzeit gibt es weder in der EU noch im Rahmen des Übereinkommens über weiträumige grenzüberschreitende Luftverunreinigung internationale Zielsetzungen für die Verringerung der Ammoniakemissionen. Ein geringer Emissionsrückgang war zwischen 1990 und 1995 als Ergebnis

verminderter landwirtschaftlicher Tätigkeit (Reduzierung des Viehbestandes) zu verzeichnen. Ammoniak ist einer der Schadstoffe, die in die Verhandlungen über ein neues NO_x-Protokoll im Rahmen des Übereinkommens über weiträumige grenzüberschreitende Luftverunreinigung einbezogen werden. Mit einer bevorstehenden Richtlinie im Zusammenhang mit der EU-Strategie gegen die Versauerung sollen nationale Emissionshöchstgrenzen für Ammoniak eingeführt werden.

Literatur

Amann, M., Bertok, I., Cofala, J., Gyarmas, F., Heyes, C., Klimont, Z., Schopp, W., Hettelingh, J.-P. und Posch, M. (1997). *Cost-effective control of acidification and ground level ozone*. Zweiter Zwischenbericht. International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Österreich.

Becher, G., Förster, M., Lorenz, M., Minnich, M., Möller-Edzards, C., Stephan, K., van Ranst, E., Vanmechelen, L. und Vel, e. (1996). *Forest condition in Europe, Results of the 1995 Survey*. EG-UNECE, Brüssel, Belgien, Genf, Schweiz.

Dänisches Umweltministerium (1998). Fourth meeting of the task force on the phase-out of lead in gasoline. *Country Assessment Report*. Dänische Umweltschutzagentur.

Gregor, H.D., Werner, B. und Spranger, T. (Hrsg.) (1996). *Manual on methodologies for mapping critical loads/levels and geographical areas where they are exceeded*. (Nur in englischer Sprache). Task Force on Mapping (TFM), UBA Texte 71/96. Umweltbundesamt (UBA), Berlin, Deutschland.

Hall, D. R. (1993). *Transport and Economic Development in New Central and Eastern Europe*. Belhaven Press, London, Vereinigtes Königreich.

Hedin, L.O., Granat, L., Likens, G.E., Buishand, T.A., Galloway, J.N., Butler, T.N. und Rodhe, H. (1994). Steep declines in atmospheric base cations in regions of Europe and North America. In *Nature*, Bd. 367, S. 351-354.

Henriksen, A., Skjelkvåle, B.L., Mannio, J., Wilander, A., Harriman, R., Curtis, C., Jensen, J.P., Fjeld, E. und Moiseenko, T. (1998). Northern Europe Lake Survey - 1995, Finnland, Norwegen, Schweden, Dänemark, Kola (Rußland), Karelien (Rußland), Schottland und Wales. *Ambio*, im Druck.

Hesthagen, T., Berger, H. M., Larsen, B.M. und Saksgård, R. (1995). Monitoring fish stocks in relation to acidification in Norwegian watersheds. In *Water, Air and Soil Pollution*, Bd. 85, S. 641-646.

Kucera, V. und Fitz, S. (1995). Direct and indirect air pollution effects on materials including cultural monuments. In *Water, Air and Soil Pollution*, Bd. 85, S. 153-165.

Lorenz, M., Augustin, S., Becher, G. und Förster, M. (1997). *Forest condition in Europe*. Results of the 1996 crown condition survey. Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft, Hamburg, Deutschland. EG-UNECE, Brüssel, Belgien, Genf, Schweiz.

Lloyd's Register of Shipping (1995). *Marine Exhaust Emission Research Programme*. Lloyd's Register of Shipping, London, Vereinigtes Königreich.

Lükewille, A., Jeffries, D., Johannessen, M., Raddum, G., Stoddard, J., Traaen, T. (1997). The Nine Year Report: Acidification of Surface Waters in Europe and North

America. Long-term Developments (1980s and 1990s). Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution International Co-operative Programme on Assessment and Monitoring of Acidification of Rivers and Lakes. *NIVA-Report*, Serien-Nr. 3637-97, 168 Seiten.

Mylona, S. (1996). Sulphur dioxide emissions in Europe 1880-1991 and their effect on sulphur concentrations and depositions. In *Tellus*, Bd. 48 B, S. 662-689.

Oleandrzyński, K. (1997). Emissions. In *Transboundary Air Pollution in Europe*. MSC-W Status Report 1997. Hrsg.: Berge, E.. EMEP/MS-CW Report 1/97. Norwegisches Meteorologisches Institut, Oslo, Norwegen.

Posch, M., Hettelingh, J.-P., de Smet P.A.M. und Downing, R.J. (Hrsg.) (1997). *Calculation and mapping of critical thresholds in Europe: Status Report 1997*. Co-ordination Centre for Effects. Nationales Institut für Gesundheitswesen und Umweltschutz. Bericht Nr. 2591101007, Bilthoven, Niederlande.

Posch, M. (1997). *Personal Communication*. Nationales Institut für Gesundheitswesen und Umweltschutz. Bilthoven, Niederlande.

Semb, A., Hanssen, J.E., François, F., Maenhaut, W. und Pacyna, J.M. (1995). Long range transport and deposition of mineral matter as a source for base cations. In *Water, Air, Soil Pollution*, Bd. 85, S. 1933-1940.

Tsyro, S.G. (1997). Long-term source-receptor calculations for acidifying and eutrophying compounds. In *Transboundary Air Pollution in Europe*. MSC-W Status Report 1997, Berge, E. (Hrsg.). EMEP/MSC-W Report 1/97. Norwegisches Meteorologisches Institut, Oslo, Norwegen.