

**SCHRIFTENREIHE  
UMWELT NR. 257**

**Luft**

**Luftschadstoff-  
Emissionen  
aus natürlichen  
Quellen in der  
Schweiz**

**Download PDF**

[www.umwelt-schweiz.ch/publikationen](http://www.umwelt-schweiz.ch/publikationen)

Code: SRU-257-D

© BUWAL 1996

## Inhaltsverzeichnis

<b>Abstracts</b>	<b>5</b>
<b>Vorwort</b>	<b>7</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>9</b>
<b>2 Berechnung der natürlichen Emissionen</b>	<b>13</b>
2.1 Wälder und natürliche Grasflächen	14
2.2 Gewässer und Feuchtgebiete	16
2.3 Wildtiere	17
2.4 Waldbrände	19
2.5 Blitze	19
<b>3 Zusammenstellung der natürlichen Emissionen</b>	<b>20</b>
<b>4 Vergleich mit den anthropogenen Emissionen</b>	<b>22</b>
<b>5 Schlussfolgerungen</b>	<b>25</b>
<b>Abkürzungen</b>	<b>27</b>
<b>Literaturhinweise</b>	<b>29</b>



## Abstracts

Der Bericht quantifiziert die Emissionen von luftverunreinigenden Stoffen aus natürlichen Quellen in der Schweiz und vergleicht diese mit den vom Menschen verursachten Emissionen. Die natürlichen Emissionen von Schwefeldioxid, Stickoxiden, Kohlenmonoxid und Ammoniak betragen weniger als 2 % der gesamten jährlichen Emissionen. Beim Lachgas tragen die natürlichen Emissionen 7 %, beim Methan 15 % zu den Gesamtemissionen bei.

Die natürlichen Emissionen fallen einzig bei den flüchtigen organischen Verbindungen stärker ins Gewicht. Hier beträgt der Anteil an den Gesamtemissionen 25 %. Diese Emissionen stammen vor allem aus dem Nadelwald. Der Einfluss der natürlichen Quellen auf die Bildung von bodennahem Ozon ist jedoch gering. Dies folgt aus einem Vergleich der flächenbezogenen Emissionen, welche für die Ozonbildung massgeblich sind. Die flächenbezogenen anthropogenen Emissionen der flüchtigen organischen Verbindungen sind im schweizerischen Mittel ungefähr 10 mal höher als die natürlichen.

---

Le rapport présente une évaluation quantitative des émissions de polluants atmosphériques provenant de sources naturelles en Suisse et les compare avec les émissions dues à l'activité humaine. Les émissions naturelles de dioxyde de soufre, d'oxydes d'azote, de monoxyde de carbone et d'ammoniac constituent moins de 2 % de l'ensemble des émissions annuelles. Les émissions naturelles représentent 7 % du total des émissions dans le cas de protoxyde d'azote, et 15 % dans celui du méthane.

C'est uniquement dans le cas des composés organiques volatils que les émissions provenant de sources naturelles ont plus d'importance (proportion par rapport à l'ensemble des émissions: 25 %). Ces émissions proviennent essentiellement des forêts de résineux. L'influence des sources naturelles sur la formation d'ozone proche du sol est cependant faible, comme le démontre une comparaison des émissions par unité de surface déterminantes pour la formation d'ozone. En moyenne suisse, les émissions anthropiques de composés organiques volatils, par unité de surface, sont environ dix fois plus élevées que les émissions naturelles.

---

Il rapporto quantifica le emissioni di inquinanti atmosferici provenienti da fonti naturali e le confronta con le emissioni prodotte dall'uomo. Le emissioni naturali di anidride solforosa, di ossidi d'azoto, di monossido di carbonio e di ammoniaca rappresentano meno del 2 % delle emissioni totali annue. Per il protossido d'azoto e per il metano detta percentuale corrisponde al 7 % e al 15 % rispettivamente.

Le emissioni naturali di composti organici volatili sono invece relativamente importanti: rappresentano infatti il 25 % delle emissioni totali. Dette emissioni provengono soprattutto dai boschi di conifere. Tuttavia l'influsso delle fonti naturali sulla formazione dell'ozono in prossimità del suolo è debole. È quanto risulta da un confronto delle emissioni riferite alla superficie, parametro questo determinante per la formazione dell'ozono. In Svizzera, le emissioni antropogene di composti organici volatili riferite alla superficie superano in media di 10 volte quelle naturali.

---

The report quantifies the emissions of air pollutants originating from natural sources in Switzerland and compares them with the anthropogenic emissions. The natural emissions of sulphur dioxide, nitrogen oxides, carbon monoxide and ammonia amount to less than 2 % of the total annual emissions. The natural emissions of nitrous oxide and methane contribute 7 % and 15 % respectively to the total emissions.

It is only the class of non-methane volatile organic compounds where the contribution of natural emissions to the total emissions is significant, approaching 25 %. The coniferous forests are the main sources of these emissions. However, the importance of the emissions of the natural sources for the formation of tropospheric ozone is small. This results from the comparison of the emission densities which are relevant for the formation of ozone. In Switzerland, the mean emission density of anthropogenic volatile organic compounds is about 10 times higher than the natural one.

---

## Vorwort

Unsere Luftqualität wird massgeblich von der Art und Menge der Stoffe bestimmt, welche von den verschiedensten Quellen an die Luft abgegeben werden. Im Gegensatz zu den Emissionen, welche vom Menschen verursacht werden, können die Emissionen aus natürlichen Quellen nicht beeinflusst werden.

Der vorliegende Bericht zeigt auf, welche Mengen an luftverunreinigenden Stoffen aus natürlichen Quellen stammen, und vergleicht diese mit den Mengen, welche vom Menschen verursacht werden. Aus dem Bericht geht hervor, dass in der Schweiz die Emissionen aus natürlichen Quellen nur von geringer Bedeutung für die Luftverschmutzung sind. Die Emissionen, welche vom Menschen verursacht werden, spielen eine weitaus entscheidendere Rolle.

Um eine saubere und gesunde Luft für uns Menschen und für unsere Umwelt wieder herzustellen und zu erhalten, müssen daher weiterhin die anthropogenen Emissionen vermindert werden.

Gerhard Leutert  
Chef der Abteilung Luftreinhaltung



## 1 Einleitung

Natürliche, trockene Luft besteht aus ca. 78 % Stickstoff, 21 % Sauerstoff, 0.9 % Edelgasen und ca. 0.03 % Kohlendioxid. Daneben kommen auch in der sogenannten Reinaluft viele Spurengase wie z.B. Schwefeldioxid, Stickoxide, flüchtige organische Verbindungen, Methan und Stäube vor.

Die Zusammensetzung der Luft wird unter anderem von den ihr zugeführten Stoffen bestimmt. Für den Ausstoss dieser Gase, Stäube und Aerosole in die Atmosphäre verwendet man den Begriff "Emission". Die Emission besteht sowohl aus Beiträgen infolge menschlicher Tätigkeiten (sog. anthropogene Beiträge) wie auch aus solchen, welche natürlichen Ursprungs sind.

Durch menschliche Tätigkeiten werden jährlich grosse Mengen an Luftschadstoffen ausgestossen. Sie stammen, je nach Schadstoff, hauptsächlich aus dem Motorfahrzeugverkehr, den Feuerungsanlagen, aus Industrie und Gewerbe sowie aus der Landwirtschaft. Die Entwicklung der anthropogenen Emissionen in der Schweiz wurden 1995 neu quantifiziert und in zwei Berichten publiziert: einem Uebersichtsbericht "Vom Menschen verursachte Luftschadstoff-Emissionen in der Schweiz von 1900 bis 2010" [1] und einem Detailbericht "Emissionen von Luftschadstoffen in der Schweiz von 1900 bis 2010 - Anthropogene Emissionen im Detail" [2].

Um den Einfluss der vom Menschen verursachten Emissionen auf die Luftqualität beurteilen zu können, interessiert auch die "Hintergrund-Emission" aus den natürlichen Quellen. Der vorliegende Bericht enthält eine Zusammenstellung dieser Emissionen aus natürlichen Quellen und ermöglicht den quantitativen Vergleich mit den anthropogenen Quellen.

Der vorliegende Bericht ist eine überarbeitete und aktualisierte Fassung des 1987 erschienenen BUWAL-Berichtes Nr. 75 "Emissionen von luftverunreinigenden Stoffen aus natürlichen Quellen in der Schweiz" [3]. Wegen der veränderten Struktur und der verbesserten Datenbasis sind der alte und der neue Bericht nicht vergleichbar.

## Natürliche Emissionsquellen

Die Emissionen aus natürlichen Quellen werden durch verschiedene Vorgänge verursacht. Die wichtigsten natürlichen Emissionsprozesse sowie die wichtigsten dabei in die Atmosphäre abgegebenen Stoffe sind in Tabelle 1 zusammengestellt.

**Tab. 1** Wichtigste natürliche Emissionsprozesse und wichtigste dabei emittierte Stoffe

Prozess	Emittierte Stoffe
Mikrobielle und chemische Prozesse in Böden und Gewässern	Methan (CH <sub>4</sub> ) Lachgas (N <sub>2</sub> O) Stickoxide (NO <sub>x</sub> ) Ammoniak (NH <sub>3</sub> ) Schwefelwasserstoff (H <sub>2</sub> S) organische Schwefelverbindungen
Ausscheidungen von Pflanzen	Kohlenwasserstoffe (z.B. Isopren, Terpene) Methan (CH <sub>4</sub> ) Staub (Pollenstaub)
Verdauung und Ausscheidungen von Tieren	Methan (CH <sub>4</sub> ) Ammoniak (NH <sub>3</sub> )
Erosion	Staub
Meeresgischt ("sea spray")	Aerosole aus Seesalzpartikeln
Blitze	Stickoxide (NO <sub>x</sub> )
Wald- und Buschbrände	Kohlendioxid (CO <sub>2</sub> ) Kohlenmonoxid (CO) Kohlenwasserstoffe Stickoxide (NO <sub>x</sub> ) Schwefeldioxid (SO <sub>2</sub> ) Staub
Vulkanische Eruptionen	Schwefeldioxid (SO <sub>2</sub> ) Schwefelwasserstoff (H <sub>2</sub> S) Kohlendioxid (CO <sub>2</sub> ) Methan (CH <sub>4</sub> ) Staub
Meteore und Meteoriteneinfall	Staub

Eine eindeutige Trennung von natürlichen und anthropogenen Emissionen ist allerdings nicht möglich. Zwar gibt es natürliche Vorgänge wie vulkanische Eruptionen oder Blitze, die von Menschen gänzlich unbeeinflusst sind. Andererseits lassen sich z.B. die Emissionen von Pflanzen und Tieren schon nicht mehr ganz eindeutig zuordnen, denn ohne menschliche Einwirkungen würden sowohl die Pflanzendecke als auch der Tierbestand der Schweiz sicher anders aussehen.

Für einen Vergleich der natürlichen mit den anthropogenen Emissionen sind deshalb mehr oder weniger willkürliche Abgrenzungen notwendig. Diese wurden in Übereinstimmung mit den Spezifikationen des CORINAIR-Inventars 1990 vorgenommen. Demnach gelten die Emissionen der landwirtschaftlich genutzten Kulturen und Böden sowie der Nutztiere als anthropogen, die Emissionen von Wäldern, Feuchtgebieten, unproduktiven Vegetationsflächen und Wildtieren dagegen als natürlich.

Aufgrund dieser Vorgaben werden im vorliegenden Bericht die Emissionen folgender in der Schweiz vorkommender natürlichen Quellen diskutiert:

- Wälder
- Natürliche Grasflächen
- Gewässer
- Feuchtgebiete
- Wildtiere
- Waldbrände
- Blitze.

### **Emittierte Stoffe**

Unter den in der Schweiz insgesamt (natürlich und anthropogen) emittierten Stoffen stehen diejenigen im Vordergrund des Interesses, welche auch im Bericht über die anthropogenen Emissionen [1] diskutiert werden. Es sind dies: Schwefeldioxid ( $\text{SO}_2$ ), Stickoxide ( $\text{NO}_x$ ), flüchtige organische Verbindungen (NMVOC), Kohlenmonoxid (CO), Ammoniak ( $\text{NH}_3$ ), Chlorwasserstoff (HCl), Fluorwasserstoff (HF), Staub, Schwermetalle (Pb, Zn, Cd, Hg), Dioxine und Furane, sowie die klimarelevanten Gase Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW), Methan ( $\text{CH}_4$ ), Lachgas ( $\text{N}_2\text{O}$ ) und Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ ).

Aus natürlichen Quellen sind Emissionen von  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ , NMVOC, CO,  $\text{NH}_3$ , Staub,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}$  und  $\text{CO}_2$  bekannt. Zwei dieser Schadstoffe - Staub und  $\text{CO}_2$  - stellen Spezialfälle dar. Sie werden im vorliegenden Bericht aus den folgenden Gründen ausgeklammert:

- **Staub**

Natürliche Staubemissionen entstehen in der Schweiz durch Pollenabscheidung, Erosion und Waldbrände. Vor allem die Einwirkung des Pollenstaubes ist von gesundheitlicher Bedeutung für den Menschen. Deshalb werden auch die Immissionen mit einem nationalen Pollenmessnetz (NAPOL) während der Vegetationsperiode regelmässig gemessen. Nur wenig Informationen liegen hingegen über die Emissionsmengen an Pollenstaub vor. Bei den Staubemissionen, welche durch die Erosion entstehen, ist die Situation ähnlich. Ueber diese Mengen können keine Angaben gemacht werden. Wegen dieser schlechten Datenlage wurde in diesem Bericht auf die Quantifizierung der Staub-Emissionen aus natürlichen Quellen verzichtet.

- **Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>)**

Die natürlichen Quellen, vor allem die Wälder, sind bedeutende CO<sub>2</sub>-Emittenten. In einem stationären natürlichen Kreislauf wird aber dieselbe CO<sub>2</sub>-Menge durch CO<sub>2</sub>-bindende Prozesse auch wieder der Umgebungsluft entzogen. Bei der Quantifizierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen aus natürlichen Quellen muss daher auch die Fixierung in natürlichen Senken mitberücksichtigt werden. Diese Kreislaufprozesse und die resultierenden CO<sub>2</sub>-Emissionen resp. CO<sub>2</sub>-Fixierungen werden im schweizerischen Klimainventar [4] behandelt und deswegen im vorliegenden Bericht nicht wiederholt.

Für den vorliegenden Bericht von Interesse verbleiben folglich einerseits die "klassischen" Luftschadstoffe:

- Schwefeldioxid (SO<sub>2</sub>)
- Stickoxide (NO<sub>x</sub>)
- Flüchtige organische Verbindungen (NMVOC)
- Kohlenmonoxid (CO)
- Ammoniak (NH<sub>3</sub>)

und andererseits die klimarelevanten Gase:

- Methan (CH<sub>4</sub>) und
- Lachgas (N<sub>2</sub>O).

## **Bezugsjahr**

Die Emissionen aus natürlichen Quellen werden im folgenden für das Jahr 1990 berechnet. Auf die Darstellung von Zeitreihen wird verzichtet, da sich die Emissionen aus natürlichen Quellen im Vergleich zu den anthropogenen Emissionen im Lauf dieses Jahrhunderts nicht wesentlich veränderten.

## 2 Berechnung der natürlichen Emissionen

Zur Berechnung der Emissionen aus natürlichen Quellen dienen insbesondere folgende Ausgangsdaten:

- Die Aktivitätsrate beschreibt für eine Emissionsquelle die Basisgrösse, auf welche die Emissionen bezogen werden. Für die natürlichen Quellen sind dies vor allem Flächen (Wald, natürliche Grasflächen, Feuchtgebiete etc.) und Tierbestände.
- Der Emissionsfaktor gibt die freigesetzte Schadstoffmenge pro Aktivitätseinheit und Jahr an, beispielsweise pro Hektare Wald und Jahr oder pro Wildtier und Jahr.

Mit Hilfe der Aktivitätsraten und der Emissionsfaktoren lassen sich die Jahresemissionen der verschiedenen Schadstoffe und Emissionsquellen nach dem folgenden Schema berechnen:

$$\boxed{\text{Emissionsmenge}} = \boxed{\text{Aktivitätsrate}} \times \boxed{\text{Emissionsfaktor}}$$

Diese Berechnung wird für jeden einzelnen Schadstoff mit dem entsprechenden Emissionsfaktor durchgeführt.

Die Emissionsfaktoren natürlicher Quellen sind mit relativ grossen Unsicherheiten behaftet. Damit werden auch die berechneten Emissionsmengen in gleichem Masse unsicher. Die errechneten Emissionsmengen dürften eine Genauigkeit von etwa  $\pm 50\%$  aufweisen.

Aufgrund dieser Unsicherheit werden im folgenden die ermittelten Emissionsfaktoren und die daraus berechneten Emissionen jeweils auf zwei signifikante Stellen gerundet angegeben. Die Berechnungen wurden allerdings mit ungerundeten Werten durchgeführt, so dass in den folgenden Tabellen die angegebene Emissionsmenge vom Produkt von Aktivitätsrate und Emissionsfaktor geringfügig abweichen kann.

Wurden in der Literatur für dieselbe Quelle unterschiedliche Emissionsfaktoren gefunden und streuen diese über mehr als einen Faktor 10, so wurde das geometrische Mittel dieser Werte eingesetzt. Liegt die Streuung der gefundenen Werte unter einer Zehnerpotenz, wurde mit dem arithmetischen Mittel gerechnet.

In denjenigen Fällen, in denen über bestimmte Aktivitäten oder Emissionsfaktoren keine Literaturangaben vorliegen, wurden für die Berechnungen der Emissionen plausible Ersatzgrössen eingesetzt.

## 2.1 Wälder und natürliche Grasflächen

Pflanzen scheiden verschiedene flüchtige organische Verbindungen (NMVOC) aus, die von den Blatt- und Nadelflächen verdunsten. Darunter fallen z.B. Isopren (vor allem von Laubbäumen und Krautpflanzen) und Terpene (vor allem von Nadelbäumen). Darüber hinaus emittieren Pflanzen Ethylen und Methan. Die Emissionen der meisten Kohlenwasserstoff-Verbindungen sind abhängig vom Klima, insbesondere von Temperatur, Sonnenlichtintensität und Luftfeuchtigkeit.

### *Nadel- und Laubwald*

In einer detaillierten Untersuchung wurden die Waldflächen und die NMVOC-Emissionen für jede Baumart und Klimaregion einzeln berechnet [5]. In dieser Studie wurde allerdings nur der "zugängliche" Wald berücksichtigt, wie er im Rahmen des Landesforstinventars in den Jahren 1982 - 86 erhoben wurde und welcher 92.5 % der gesamten Waldfläche entspricht [6]. Im Jahr 1990 betrug die gesamte Waldfläche 1'196'000 ha [7]. Der Zusammenschluss der Flächen für jede einzelne Baumart ergibt eine Flächenaufteilung zwischen Nadel- und Laubwald von 73.5 % zu 26.5 %. Die aus der Studie [5] berechneten NMVOC-Emissionen von 87'000 t wurden im vorliegenden Bericht auf die gesamte Waldfläche hochgerechnet und der Flächenaufteilung entsprechend dem Nadel- und Laubwald zugeordnet.

Für CH<sub>4</sub> können aus [8] Emissionsfaktoren von 50 kg/ha/a und 20 kg/ha/a für Nadel- resp. Laubwald abgeschätzt werden.

Zur Berechnung der Lachgas- und der Stickoxid-Emissionen aus dem Waldboden liegen in der Literatur nur grobe Abschätzungen vor. In [9] wird für den Wald der gemäßigten Zone ein N<sub>2</sub>O-Emissionsfaktor von 0.55 bis 1.1 kg/ha/a angegeben. Hier wurde der Mittelwert von 0.82 kg/ha/a eingesetzt. Aus [10] kann ein N<sub>2</sub>O / NO<sub>x</sub> - Verhältnis entnommen werden, welches einen NO<sub>x</sub>-Emissionsfaktor von 0.11 kg/ha/a ergibt.

Beim Ammoniak scheint es so zu sein, dass die aus dem Waldboden stammende Menge von den Pflanzen direkt wieder absorbiert wird, so dass aus dem Wald insgesamt kein NH<sub>3</sub> austritt [11].

### Natürliche Grasflächen

Unter "natürlichen Grasflächen" werden die unproduktive Vegetation und das Verkehrsgrün gemäss Arealstatistik [12] verstanden. Darunter fallen Gebüsch- und Strauchvegetation, unproduktive Gras- und Krautvegetation, Nassstandorte, Ufervegetation, Strassen- und Bahngrün sowie Graspisten und Flugplatzgrün.

In der Literatur wurden für NMVOC und für CH<sub>4</sub> keine Emissionsfaktoren gefunden. Da ein grosser Teil der natürlichen Grasflächen im Berggebiet liegt und damit für diese Flächen klimatisch relativ ähnliche Bedingungen wie bei den Alpweiden vorherrschen, wurden hier die Emissionsfaktoren der alpwirtschaftlichen Nutzflächen (Weiden) verwendet [13].

Für NH<sub>3</sub> wird in [11] für Böden ausserhalb von Aeckern ein Emissionsfaktor von rund 1 kg/ha/a angegeben.

Wie bei [9] wurden für N<sub>2</sub>O und für NO<sub>x</sub> aus natürlichen Grasflächen dieselben Emissionsfaktoren verwendet wie für Wälder.

**Tab. 2.1** Emissionsdaten für Wälder und natürliche Grasflächen

	Fläche (ha)	Emissionsfaktoren (kg/ha/a)					Emissionen (t/a)				
		NO <sub>x</sub>	NMVOC	NH <sub>3</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O	NO <sub>x</sub>	NMVOC	NH <sub>3</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O
Laubwald	318'000	0.11	7.4		20	0.82	35	2'400		6'400	260
Nadelwald	878'000	0.11	110		50	0.82	97	92'000		44'000	720
Grasflächen	255'000	0.11	2.0	1.0	8.4	0.82	28	510	260	2'100	210

## 2.2 Gewässer und Feuchtgebiete

Durch biologische Prozesse werden in Gewässern vor allem Stickstoff- und Kohlenstoffverbindungen abgebaut und als gasförmige Produkte freigesetzt. So werden in den sauerstoffreichen Seen und Flüssen die Stickstoffverbindungen zu Stickoxiden ( $\text{NO}_x$ ) oxidiert und emittiert. Bei Sauerstoffmangel, wie er in den Feuchtgebieten und im Sediment der Seen und Flüsse auftritt, wird durch natürliche Denitrifikationsprozesse Lachgas ( $\text{N}_2\text{O}$ ) gebildet. Ebenfalls als Folge des Sauerstoffmangels wird in Feuchtgebieten Methan ( $\text{CH}_4$ ) produziert. Diese Emissionen sind als sogenanntes Sumpfgas bekannt. In Seen und Flüssen wird Methan beim Aufsteigen im Wasser sofort oxidiert, so dass dort keine Methan-Emissionen auftreten.

### *Seen und Flüsse*

Die Gesamtfläche der schweizerischen Seen und Flüsse (ohne Uferböschung) beträgt gemäss Arealstatistik [12] 142'000 ha resp. 27'500 ha.

Bei einer Untersuchung der Lachgas-Umsetzung in sechs Schweizer Seen wurde für alle Schweizer Seen zusammen eine  $\text{N}_2\text{O}$ -Produktionsrate von 154 t/a extrapoliert [14]. Daraus kann ein Emissionsfaktor von 1.1 kg/ha/a berechnet werden, welcher auch für Flüsse verwendet wurde.

Aus dem Verhältnis zwischen  $\text{N}_2\text{O}$  /  $\text{NO}_x$ , wie er in [15] angegeben wird, wurde für  $\text{NO}_x$  ein Emissionsfaktor von 0.064 kg/ha/a für Seen und Flüsse ermittelt.

### *Feuchtgebiete*

Die Fläche der Feuchtgebiete (Auen, Moore und partiell überflutete Gebiete) betrug 1980 rund 40'000 ha [3]. Für 1990 wird der gleiche Wert eingesetzt, mit der Annahme, dass die zwischen 1980 und 1990 rückläufigen Moorflächen durch zunehmende Auenflächen in etwa kompensiert wurden.

Für  $\text{CH}_4$  finden sich in der Literatur Emissionsfaktoren von 4 - 180 kg/ha/a, die relativ stark temperaturabhängig sind [16]. Hier wurde ein mittlerer  $\text{CH}_4$ -Emissionsfaktor von 30 kg/ha/a eingesetzt.

Für  $\text{N}_2\text{O}$  wurde derselbe Emissionsfaktor wie bei Flüssen und Seen eingesetzt.

Tab. 2.2 Emissionsdaten für Gewässer und Feuchtgebiete

	Fläche (ha)	Emissionsfaktoren (kg/ha/a)			Emissionen (t/a)		
		NO <sub>x</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O	NO <sub>x</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O
Seen	142'000	0.064		1.1	9.1		150
Flüsse	27'500	0.064		1.1	1.8		30
Feuchtgebiete	40'000		30	1.1		1'200	43

## 2.3 Wildtiere

### *Grosse Wildtiere*

Unter dem Begriff "grosse Wildtiere" werden Hirsch, Reh, Gemse und Steinbock zusammengefasst. Diese Pflanzenfresser produzieren im Verdauungstrakt Methan (CH<sub>4</sub>), welches durch die Exkremente oder beim Wiederkäuen emittiert wird. Ebenso emittieren die Tiere durch ihre Exkremente Ammoniak (NH<sub>3</sub>).

Der Bestand der grossen Wildtiere war im Jahr 1990 wie folgt: 21'195 Hirsche, 114'703 Rehe, 94'447 Gemen und 14'451 Steinböcke [17].

Für NH<sub>3</sub> findet sich in [11] ein Emissionsfaktor von 16 g/kg Körpergewicht. Umgerechnet auf das durchschnittliche Lebendgewicht der Wildtiere und unter Berücksichtigung der Bestände ergibt dies für den schweizerischen Bestand einen gewichteten Emissionsfaktor von 0.40 kg/Tier/a.

Während in der Literatur Angaben über die spezifische CH<sub>4</sub>-Produktion von Nutztieren zu finden sind [18], fehlen entsprechende Daten für Wildtiere. Uebernimmt man die Emissionsfaktoren für Rindvieh und rechnet diese unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Lebendgewichte auf Wildtiere um, so erhält man einen gewichteten Emissionsfaktor von etwa 3.7 kg/Tier/a.

### *Kleine Wildtiere*

Bei den "kleinen Wildtieren" handelt es sich um Mäuse, Ratten und weitere Nagetiere auf Waldböden, Alpweiden und Landwirtschaftsböden [19].

Die Flächen von Waldböden, Alpweiden resp. Landwirtschaftsböden betragen 1'196'000 ha, 565'000 ha resp. 1'017'000 ha [7, 20].

Die CH<sub>4</sub>-Emissionen der kleinen Wildtiere betragen gemäss [21] in Landwirtschaftsböden 2 kg/ha/a und in Wald- und Alpweideböden 0.4 kg/ha/a. Mit den Flächenanteilen gewichtet ergibt dies für die Schweiz einen Emissionsfaktor von 1.0 kg/ha/a.

Für Ammoniak wurde in der Literatur kein Emissionsfaktor gefunden. Es wurde daher die grobe Annahme getroffen, dass das Verhältnis der Emissionsfaktoren von Ammoniak zu Methan bei kleinen Wildtieren gleich gross ist wie bei grossen Wildtieren. Dies ergibt einen NH<sub>3</sub>-Emissionsfaktor von 0.11 kg/ha/a.

**Tab. 2.3** Emissionsdaten für Wildtiere

	Bestand (Anzahl Tiere)	Emissionsfaktoren (kg/Tier/a)		Emissionen (t/a)	
		NH <sub>3</sub>	CH <sub>4</sub>	NH <sub>3</sub>	CH <sub>4</sub>
Grosse Wildtiere	245'000	0.40	3.7	98	910
<i>davon:</i>					
- Hirsch	21'000	1.4	14	31	290
- Reh	115'000	0.24	2.3	28	260
- Gemse	94'000	0.32	3.0	30	280
- Steinbock	14'000	0.64	6.0	9.2	87

	Fläche (ha)	Emissionsfaktoren (kg/ha/a)		Emissionen (t/a)	
		NH <sub>3</sub>	CH <sub>4</sub>	NH <sub>3</sub>	CH <sub>4</sub>
Kleine Wildtiere	2'778'000	0.11	1.0	310	2'800
<i>davon:</i>					
- in Waldböden	1'196'000	0.044	0.40	53	480
- in Alpweiden	565'000	0.044	0.40	25	230
- in Landwirtschaftsböden	1'017'000	0.22	2.0	220	2000

## 2.4 Waldbrände

In der Schweiz wurde 1990 eine Waldfläche von 1'102 ha durch Waldbrände zerstört, wobei deren Ursachen unter anderem Naturereignisse, Unvorsichtigkeit von Menschen oder auch unbekannt waren [7].

Die Rauchgase, welche bei einem Waldbrand entstehen, beinhalten eine sehr komplexe Mischung von Schadgasen und Feststoffen. Die in der Literatur verfügbaren Emissionsfaktoren umfassen einen weiten Bereich [8, 21, 22, 23, 24]. Aus diesen Literaturangaben wurden für die Emissionsfaktoren der interessierenden Schadstoffe gerundete Mittelwerte gebildet.

Tab. 2.4 Emissionsdaten für Waldbrände

Fläche (ha)	Emissionsfaktoren (kg/ha/a)					Emissionen (t/a)				
	SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	NMVOC	CO	CH <sub>4</sub>	SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	NMVOC	CO	CH <sub>4</sub>
1'100	40	80	550	1600	65	44	88	610	1800	72

## 2.5 Blitze

Blitze sind elektrische Entladungen in der Atmosphäre. In unmittelbarer Umgebung der Entladungskanäle herrschen extrem hohe Temperaturen (bis zu 30'000 °C), welche die Bildung von Stickoxiden (NO<sub>x</sub>) verursachen.

Aufgrund von Messungen, theoretischen Berechnungen und Laborexperimenten wurde für die globalen NO<sub>x</sub>-Emissionen durch Blitze ein Wert von rund 30 Mio. t/a errechnet [25]. Bezogen auf die gesamte Erdoberfläche ergibt dies einen mittleren globalen Emissionsfaktor von rund 0.6 kg/ha/a.

Mit der groben Annahme, dass dieser Emissionsfaktor auch für die Schweiz anwendbar ist, ergeben sich NO<sub>x</sub>-Emissionen von 2'400 t/a.

Tab. 2.5 Emissionsdaten für Blitze

Fläche (ha)	Emissionsfaktor (kg/ha/a)	Emissionen (t/a)
	NO <sub>x</sub>	NO <sub>x</sub>
4'128'000	0.59	2'400

### 3 Zusammenstellung der natürlichen Emissionen

In der nachfolgenden Tabelle 3 sind alle in Kapitel 2 berechneten natürlichen Emissionen in der Schweiz zusammengestellt.

Für Schwefeldioxid (SO<sub>2</sub>), Stickoxide (NO<sub>x</sub>), Kohlenmonoxid (CO), Ammoniak (NH<sub>3</sub>) und Lachgas (N<sub>2</sub>O) betragen die Emissionen aus natürlichen Quellen weniger als 3'000 Tonnen pro Jahr. Grössere Mengen, nämlich 95'000 und 57'000 Tonnen pro Jahr, werden hingegen an flüchtigen organischen Verbindungen (NMVOC) resp. an Methan (CH<sub>4</sub>) emittiert. Eine Diskussion der Emissionsmengen aus natürlichen Quellen ist allerdings erst sinnvoll, wenn diese Daten mit den anthropogenen Emissionen verglichen werden (Kapitel 4).

**Tab. 3** Natürliche Emissionen in der Schweiz in Tonnen pro Jahr

	SO <sub>2</sub> t/a	NO <sub>x</sub> t/a	NMVOC t/a	CO t/a	NH <sub>3</sub> t/a	CH <sub>4</sub> t/a	N <sub>2</sub> O t/a
Laubwald	0	35	2'400	0	0	6'400	260
Nadelwald	0	97	92'000	0	0	44'000	720
Natürliche Grasflächen	0	28	510	0	260	2'100	210
Seen	0	9	0	0	0	0	150
Flüsse	0	2	0	0	0	0	30
Feuchtgebiete	0	0	0	0	0	1'200	43
Wildtiere gross	0	0	0	0	98	910	0
Wildtiere klein	0	0	0	0	310	2'800	0
Waldbrände	44	88	610	1'800	0	72	0
Blitze	0	2'400	0	0	0	0	0
<b>Total natürliche Emissionen</b>	<b>44</b>	<b>2'700</b>	<b>95'000</b>	<b>1'800</b>	<b>660</b>	<b>57'000</b>	<b>1'400</b>

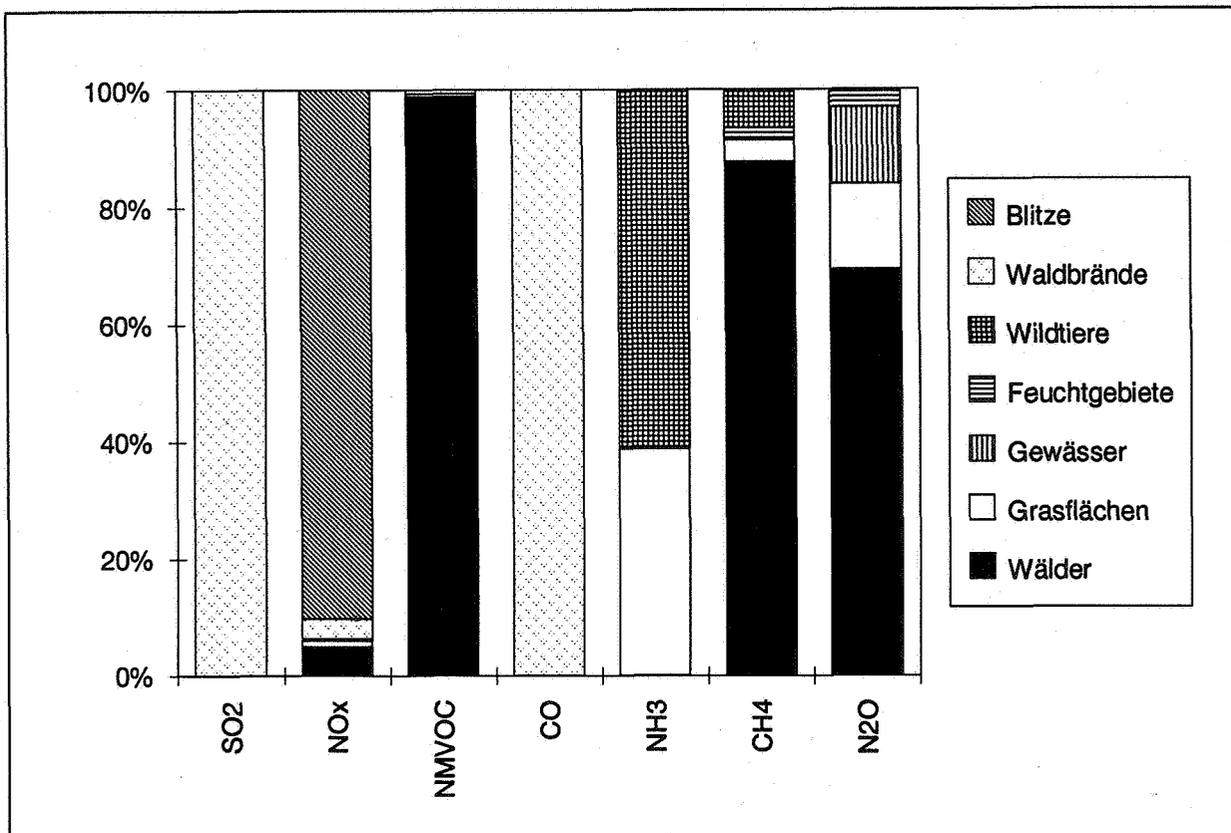
Mit Ausnahme des Ammoniaks stammen die Emissionen aller Stoffe jeweils hauptsächlich von einer Quellenart, wie die folgende Aufstellung zeigt:

Schadstoff	Hauptquelle
Schwefeldioxid (SO <sub>2</sub> )	Waldbrände
Stickoxide (NO <sub>x</sub> )	Blitze
Flüchtige organische Verbindungen (NMVOC)	Nadelwald
Kohlenmonoxid (CO)	Waldbrände
Methan (CH <sub>4</sub> )	Wälder (vor allem Nadelwald)
Lachgas (N <sub>2</sub> O)	Wälder (Nadel- und Laubwald)

Die Ammoniak (NH<sub>3</sub>)-Emissionen werden zu etwa zwei Dritteln von den Wildtieren (vor allem kleine Wildtiere) und zu einem Drittel von den natürlichen Grasflächen verursacht.

Figur 3 zeigt die Anteile der einzelnen Quellengruppen an den gesamten natürlichen Emissionen in Prozenten auf.

Fig. 3 Anteile der einzelnen Quellengruppen an den natürlichen Emissionen in Prozenten



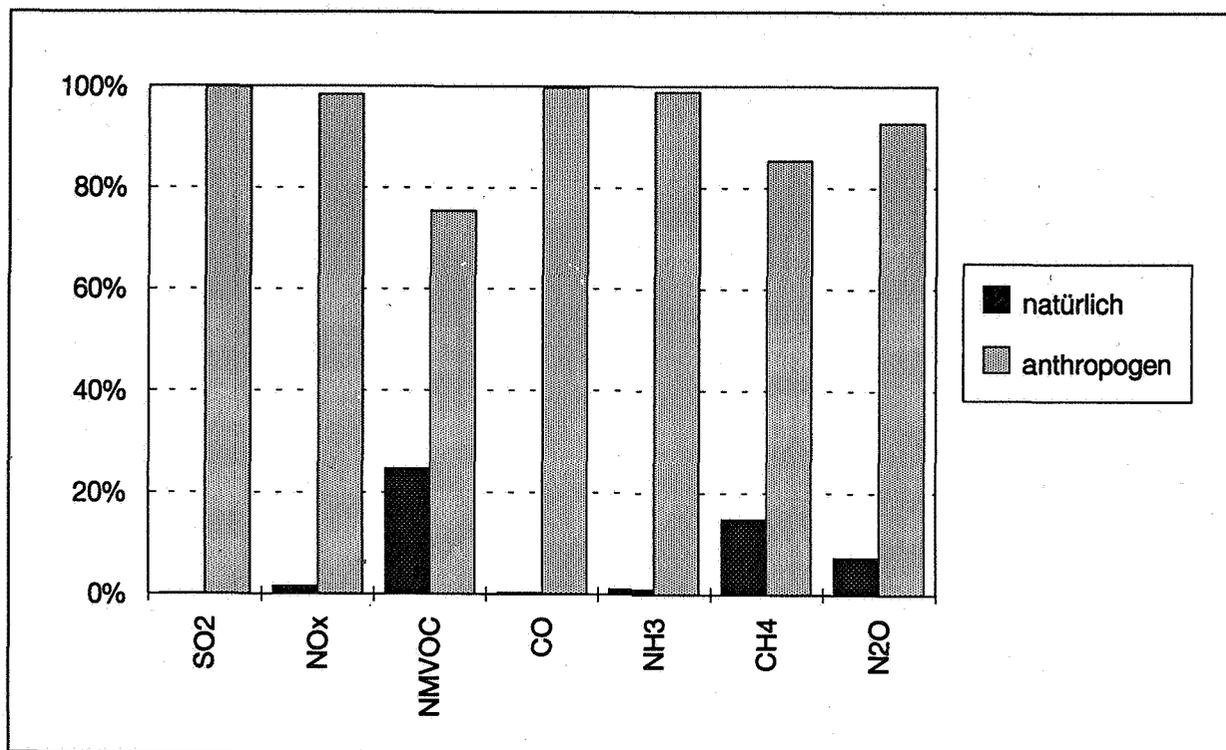
## 4 Vergleich mit den anthropogenen Emissionen

Tabelle 4 und Figur 4 stellen die in diesem Bericht berechneten natürlichen Emissionen den anthropogenen Emissionen [1] gegenüber.

**Tab. 4** Natürliche und anthropogene Emissionen in der Schweiz für das Jahr 1990

	SO <sub>2</sub> t/a	NO <sub>x</sub> t/a	NMVOC t/a	CO t/a	NH <sub>3</sub> t/a	CH <sub>4</sub> t/a	N <sub>2</sub> O t/a
Total natürlich	44	2'700	95'000	1'800	660	57'000	1'400
Total anthropogen	42'500	166'000	292'000	707'000	62'100	332'000	18'000
Gesamtemissionen	42'500	168'000	387'000	708'000	62'800	389'000	19'400

**Fig. 4** Anteile der natürlichen und der anthropogenen Emissionen in Prozent der Gesamtemission für das Jahr 1990



Bei den Schadstoffen Schwefeldioxid ( $\text{SO}_2$ ), Stickoxide ( $\text{NO}_x$ ), Kohlenmonoxid ( $\text{CO}$ ) und Ammoniak ( $\text{NH}_3$ ) tragen die Emissionen aus den natürlichen Quellen weniger als 2 % zu den Gesamtemissionen bei. Bei den Lachgas ( $\text{N}_2\text{O}$ )- und den Methan ( $\text{CH}_4$ )-Emissionen betragen die Anteile der natürlichen Quellen 7 % resp. 15 %. Der grösste Beitrag an die Gesamtemissionen wird bei den flüchtigen organischen Verbindungen (NMVOC) mit einem Anteil von 25 % gefunden.

### **Einfluss der natürlichen und der anthropogenen Emissionen auf die Bildung von bodennahem Ozon**

Das bodennahe Ozon entsteht durch die Vorläuferstoffe Stickoxide ( $\text{NO}_x$ ) und flüchtige organische Verbindungen (NMVOC). Da bei den  $\text{NO}_x$  die natürlichen Emissionen gegenüber den anthropogenen weniger als 2 % betragen, haben diese auf die Ozonbildung einen vernachlässigbaren Einfluss. Hingegen könnte der Beitrag der natürlichen NMVOC-Emissionen von Bedeutung sein. Dies soll nachfolgend genauer untersucht werden.

Die Bildung von Ozon ist, als chemischer Prozess, von den lokalen Konzentrationen der Vorläuferstoffe abhängig. Diese werden von der Emissionsmenge beeinflusst, welche aus einer bestimmten Flächeneinheit stammt, dem sogenannten "flächenbezogenen Emissionsfaktor". Da die Bildung von Ozon besonders im Sommer von Bedeutung ist, werden hier die flächenbezogenen NMVOC-Emissionsfaktoren der natürlichen und der anthropogenen Emissionen für das Sommerhalbjahr berechnet.

Die natürlichen NMVOC-Emissionen stammen zu über 99 % von den Wäldern, weshalb die anderen Quellen hier vernachlässigt werden können. Aus [5] kann abgeleitet werden, dass ca.  $\frac{2}{3}$  der von den Bäumen abgegebenen NMVOC-Menge im Sommerhalbjahr, d.h. während der Vegetationsperiode, emittiert wird. Dies ergibt aus dem Nadel- und Laubwald zusammen eine Emissionsmenge von 63'000 t NMVOC für das Sommerhalbjahr. Wird diese Emissionsmenge durch die gesamte Waldfläche dividiert, so findet man einen flächenbezogenen NMVOC-Emissionsfaktor von 53 kg/ha.

Bei den anthropogenen NMVOC-Emissionen kann von einem relativ konstanten Jahresverlauf ausgegangen werden. Die anthropogene Emissionsmenge beträgt also für das Sommerhalbjahr ca. die Hälfte der jährlichen Emissionsmenge, d.h. für 1990 146'000 t. Es kann weiter angenommen werden, dass die anthropogenen Emissionen zum weitaus grössten Teil im Siedlungsgebiet auftreten. Der mittlere flächen-

bezogene Emissionsfaktor für das Sommerhalbjahr kann daher aus der anthropogenen Emissionsmenge im Sommer und der schweizerischen Nettosiedlungsfläche von 242'000 ha [20] berechnet werden und beträgt für das Sommerhalbjahr 1990 600 kg/ha.

Die Gegenüberstellung der natürlichen und anthropogenen flächenbezogenen Emissionsfaktoren von 53 kg/ha resp. 600 kg/ha zeigt, dass im schweizerischen Mittel die flächenbezogenen anthropogenen NMVOC-Emissionen im Sommerhalbjahr um rund einen Faktor 10 grösser sind als die natürlichen.

Es muss hier betont werden, dass es sich bei diesem Faktor 10 nur um eine grobe Abschätzung des gesamtschweizerischen Mittels handelt. Dieses Verhältnis verschiebt sich in städtischen bzw. in ländlichen Gebieten in die eine oder in die andere Richtung. Während in städtischen Gebieten das Verhältnis zwischen anthropogenen und natürlichen Emissionen mehr als einen Faktor 20 betragen kann, können in ländlichen Gebieten die natürlichen Emissionen sogar überwiegen [26]. Allerdings wird in ländlichen Gebieten die Ozonbildung praktisch ausschliesslich durch die vorhandenen  $\text{NO}_x$ -Konzentrationen und nur in geringem Masse durch die NMVOC-Konzentrationen bestimmt. Die natürlichen Quellen spielen also weder in der Stadt noch auf dem Land eine entscheidende Rolle bei der Bildung von bodennahem Ozon.

## 5 Schlussfolgerungen

Bei allen untersuchten Schadstoffen sind die Emissionen aus natürlichen Quellen erheblich kleiner als die vom Menschen verursachten Emissionen.

Die natürlichen Emissionen von Schwefeldioxid ( $\text{SO}_2$ ), Stickoxiden ( $\text{NO}_x$ ), Kohlenmonoxid ( $\text{CO}$ ) und Ammoniak ( $\text{NH}_3$ ) sind mit weniger als 2 % an den Gesamtemissionen des betreffenden Stoffes beteiligt. Die natürlichen Lachgas ( $\text{N}_2\text{O}$ )-Emissionen tragen 7 % zu den Gesamtemissionen bei.

Die natürlichen Emissionen von Methan ( $\text{CH}_4$ ) und von flüchtigen organischen Verbindungen (NMVOC) belaufen sich auf 57'000 resp. 95'000 Tonnen pro Jahr. Dies macht für das Jahr 1990 für Methan 15 % und für die NMVOC 25 % der Gesamtemission des betreffenden Stoffes aus. Diese Emissionen stammen vor allem aus dem Wald, insbesondere aus dem Nadelwald. Hinsichtlich der emittierten Mengen sind die anthropogenen NMVOC-Emissionen somit um einen Faktor 3 grösser als die natürlichen. Werden hingegen die flächenbezogenen Emissionsfaktoren während des Sommerhalbjahres betrachtet - wie dies für die Ozonbildung relevant ist - so überwiegen die anthropogenen Emissionen im schweizerischen Mittel um einen Faktor 10, im Siedlungsgebiet gar um noch mehr. Die natürlichen NMVOC-Emissionen spielen deshalb bei der Bildung von bodennahem Ozon in der Schweiz gegenüber den anthropogenen Emissionen eine untergeordnete Rolle, wie dies übrigens auch durch Ozonmodelle bestätigt wird [27].

Mit den durchgeführten Untersuchungen wird einmal mehr deutlich, dass eine Verbesserung der Luftqualität nur durch eine Verminderung der anthropogenen Emissionen erzielt werden kann. Dies nicht nur, weil die natürlichen Emissionen ohnehin nicht verändert werden können, sondern auch, weil in der Schweiz die vom Menschen verursachten Emissionen die natürlichen Emissionen bei weitem überwiegen.



## Abkürzungen

CH <sub>4</sub>	Methan
CO	Kohlenmonoxid
CO <sub>2</sub>	Kohlendioxid
CORINAIR	Standardisiertes gesamteuropäisches Emissionsinventar der Europäischen Union (Coordination d'Information Environnementale; Teilprojekt Air)
ha	Hektare
kg/ha/a	Kilogramm pro Hektare und Jahr
N <sub>2</sub> O	Lachgas
NH <sub>3</sub>	Ammoniak
NMVOG	Flüchtige organische Verbindungen, ohne Methan und FCKW (Nichtmethan-VOC)
NO <sub>x</sub>	Stickoxide (NO und NO <sub>2</sub> )
SO <sub>2</sub>	Schwefeldioxid
t/a	Tonne pro Jahr



**Literaturhinweise**

- 1 BUWAL (1995) Vom Menschen verursachte Luftschadstoff-Emissionen in der Schweiz von 1900 - 2010. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft. Schriftenreihe Umwelt Nr. 256
- 2 BUWAL (1996) Emissionen von Luftschadstoffen in der Schweiz von 1900 bis 2010 - Anthropogene Emissionen im Detail. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft. Umwelt-Materialien, in Vorbereitung
- 3 BUWAL (1987) Emissionen von luftverunreinigenden Stoffen aus natürlichen Quellen in der Schweiz. Bundesamt für Umweltschutz. Schriftenreihe Umweltschutz Nr. 75
- 4 BUWAL (1996). Swiss Greenhouse Inventory 1990 - 1994, UN Framework Convention on Climate Change. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft
- 5 Andreani-Aksoyoglu S. und Keller J. (1995) Estimates of monoterpene and isoprene emissions from the forests in Switzerland. J. Atmos. Chem. Vol. 20, p. 71
- 6 Eidg. Anstalt für das forstliche Versuchswesen (1988) Schweizerisches Landesforstinventar. Ergebnisse der Erstaufnahme 1982-1986. Bericht Nr. 305. Eidg. Anstalt für das forstliche Versuchswesen, Birmensdorf
- 7 BUWAL/BFS (1992). Jahrbuch der schweizerischen Wald- und Holzwirtschaft 1990. Bundesamt für Statistik
- 8 Dutch Ministry of Health and Environmental Protection (1980) Handbook of emission factors. Government Publishing Office, The Hague, Netherland
- 9 Robertson K. (1991) Emissions of N<sub>2</sub>O in Sweden - natural and anthropogenic sources. Ambio (1991) Vol. 20, No. 3 - 4, p. 151
- 10 Eidg. Forschungsanstalt für Agrikulturchemie und Umwelthygiene (1990) FAC-Oktobertagung 1988: Stickstoff in der Landwirtschaft, Luft und Umwelt. Schriftenreihe FAC Nr. 7
- 11 Umweltbundesamt Wien (1993) Ammoniak-Emissionen in Oesterreich 1990. Reports, UBA-92-068

- 12 Bundesamt für Statistik (1992). Die Bodennutzung der Schweiz. Arealstatistik 1979/85, Kategorienkatalog
- 13 BUWAL (1995) Handbuch Emissionsfaktoren für stationäre Quellen. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft. Vollzug Umwelt
- 14 Mengis M., Gächter R. und Wehrli B. (1996) Sources and sinks of nitrous oxide (N<sub>2</sub>O) in deep lakes. Eingereicht bei Biogeochemistry
- 15 Stadelmann F. X. (1984) Natürliche Denitrifikations- resp. Stickoxidverluste in der Schweiz. Bericht der Eidg. Forschungsanstalt für Agrikulturchemie und Umwelthygiene
- 16 Seiler W. (1984) Contribution of biological processes to the global budget of CH<sub>4</sub> in the atmosphere. In: Current Perspectives in Microbial Ecology, American Society for Microbiology, Washington D.C.
- 17 BUWAL (1993) Capt S., Sektion Jagd und Wildforschung. Persönliche Mitteilung
- 18 IPCC/OECD (1994) Greenhouse Gas Inventory Workbook. Final draft. Volume 2
- 19 Battelle Ingenieurtechnik GmbH Eschborn (1994) Methanfreisetzung bei der Erdgasnutzung und Vergleich mit anderen Emittenten
- 20 Bundesamt für Statistik (1993) Statistisches Jahrbuch der Schweiz. Kapitel 2 (Raum, Landschaft, Umwelt)
- 21 Chung Y.-S. (1984) On the forest fires and the analysis of air quality data and total atmospheric ozone. Atmospheric Environment Vol. 18. No. 10
- 22 US EPA (1985) Emission factors, Ap. 42 5/83
- 23 CORINAIR Inventory (1992) Default Emission Factors Handbook (2nd edition)
- 24 Schön et al. (1993) Emission der Treibhausgase Distickstoffoxid und Methan in Deutschland. Phase 1. Forschungsbericht des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. Luftreinhaltung, Forschungsbericht 104 02 682, UBA-FB 93-121. E.Schmid Verlag

- 25 Brewer D.A. (1984) Tropospheric sources of NO<sub>x</sub>: Lightning and biology. Atmospheric Environment Vol. 18, No. 9
- 26 BUWAL (1996) Troposphärisches Ozon - Aktuelle Forschungsergebnisse und ihre Konsequenzen für die Luftreinhaltung. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft. Schriftenreihe Umwelt (in Vorbereitung)
- 27 Andreani-Aksoyoglu S. und Keller. J. (1996) Air quality modelling in Switzerland in view of the ecological assessment of energy systems. PSI Annual Report 1995 / Annex V, p. 102