

# Die Kosten von Luftverschmutzung und Treibhausgasemissionen im Kanton Zürich 2005

31. Juli 2006

**Erarbeitet durch:**

---



Forschung, Beratung, Projektmanagement

Lavaterstrasse 66, 8002 Zürich

Tel. + 41 44 286 75 75 Fax. +41 44 286 75 76

email: [econcept@econcept.ch](mailto:econcept@econcept.ch)

[www.econcept.ch](http://www.econcept.ch)

**AutorInnen:**

---

Walter Ott

lic. oec. publ., dipl. El. Ing. ETH, Raumplaner ETH/NDS,.

Martin Baur

Dr. rer. soc. oec.

Pia Steiner

lic. rer. pol.

Dateiname:  
Speicherdatum:

744\_be\_extkoluftzh\_schlussbericht\_06\_07\_31.doc  
31. Juli 2006

# Inhalt

<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>1</b>
Ausgangslage .....	1
Wie werden die externen Kosten ermittelt? .....	1
Wie hoch sind die externen Kosten der Luftverschmutzung und der Treibhausgasemissionen? .....	3
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>5</b>
<b>2 Vorgehen</b> .....	<b>7</b>
<b>3 Gesundheitsschäden</b> .....	<b>9</b>
3.1 Vorgehen .....	9
3.2 Berechnung der Gesundheitskosten für die Wohnbevölkerung .....	11
3.2.1 Grundlagen .....	11
3.2.2 Attributable Fälle und Kosten pro Fall.....	11
3.2.3 Kosten immissionsbedingter Krankheits- und Todesfälle am Wohnort .....	14
3.3 Berechnung der Gesundheitskosten für Beschäftigte .....	16
3.4 Gesamte Gesundheitskosten und Aufteilung auf Verursacher.....	18
<b>4 Gebäudeschäden</b> .....	<b>21</b>
4.1 Vorgehen .....	21
4.2 Daten und Ergebnisse .....	23
4.2.1 Effektiv getätigte Renovationsaufwendungen an verkehrsbelasteten Standorten .....	24
4.2.2 Immissionsbedingte Verkürzung der Lebensdauer der Gebäudehüllen abseits von Verkehrsachsen .....	26
4.2.3 Synthese zusätzliche Renovationskosten durch Luftverschmutzung.....	29

4.2.4	Erhöhte Reinigungsaufwendungen an verkehrsbelasteten Standorten .....	30
4.2.5	Gesamtkosten.....	32
<b>5</b>	<b>Waldschäden.....</b>	<b>33</b>
5.1	Vorgehen zur Schätzung der externen Kosten von Waldschäden im Kanton Zürich .....	33
5.2	Immissionsbedingte Waldschäden Schweiz.....	34
5.3	Waldschadenskosten im Kanton Zürich .....	36
5.4	Durchschnittliche Emissionszuschläge.....	37
<b>6</b>	<b>Ernteauffälle .....</b>	<b>39</b>
6.1	Vorgehen zur Schätzung der externen Kosten von Ernteauffällen im Kanton Zürich .....	39
6.2	Berechnung der relativen Ernteauffälle .....	41
6.3	Berechnung der absoluten Ernteauffälle .....	41
6.4	Durchschnittliche Emissionszuschläge.....	43
<b>7</b>	<b>Biodiversitätsschäden durch Luftverschmutzung.....</b>	<b>45</b>
7.1	Vorgehen.....	45
7.2	Berechnung der Schadenskosten .....	45
7.2.1	Schadensmodell - Dosis-/Wirkungsbeziehung zwischen Schadstoffdepositionen und Biodiversitätsveränderungen .....	45
7.2.2	Monetarisierung dieser Biodiversitätsveränderungen.....	46
7.2.3	Ergebnisse für die Schweiz.....	48
7.3	Berechnung der Schadenskosten für den Kanton Zürich.....	49
7.4	Aufteilung auf die einzelnen Verursachergruppen.....	51
<b>8</b>	<b>CO<sub>2</sub>- und Treibhausgasemissionen.....</b>	<b>53</b>
8.1	Vorgehen zur Schätzung der externen Kosten von CO <sub>2</sub> - und Treibhausgasemissionen im Kanton Zürich .....	53

---

8.2	Klimakosten im Kanton Zürich.....	53
<b>9</b>	<b>Zusammenfassung: Externe Kosten der Luftverschmutzung und der Treibhausgasemissionen im Kt. ZH.....</b>	<b>57</b>
9.1	Übersicht der externen Kosten Kanton Zürich.....	57
9.2	Externe Kosten von Luftschadstoffbelastung und Treibhausgasen nach Verursachergruppe.....	58
9.3	Zuteilung externe Kosten auf Schadstoffe.....	59
	<b>Literatur.....</b>	<b>61</b>

# Zusammenfassung

## Ausgangslage

Der Kanton Zürich plant, bis Ende 2006 einen neuen Massnahmeplan Lufthygiene zu verfassen, der auf aktualisierten Grundlagen und neuen Mengengerüsten basiert. Die Kosten und die Nutzen der im Massnahmenplan vorgeschlagenen Massnahmen werden ein bedeutendes Element der Massnahmenplanung sowie ein wichtiger Input für die politische Diskussion sein. Die aktuelle Luftschadstoff-situation verursacht beträchtliche (externe) Kosten, die zurzeit von den Verursachern nicht bezahlt werden und von den jeweils Geschädigten getragen werden müssen<sup>1</sup>. Diese (externen) Kosten der Luftverschmutzung sind gleichzeitig ein monetäres Mass für die Nutzen der Massnahmenplanung, welche bestrebt ist, die Luftschadstoff- und die Treibhausgasemissionen zu reduzieren, wodurch die entsprechenden Schäden und die verursachten externen Kosten sinken werden.

Die externen Kosten der Luftverschmutzung im Kanton Zürich wurden letztmals für das Jahr 1995 bestimmt. Sie lagen damals zwischen 323 und 812 Mio. CHF/a und die externen Klimakosten wurden auf 660 und 850 Mio. CHF/a geschätzt. Neue Datengrundlagen und neue methodische Ansätze sowie die seither veränderte Immissionssituation erfordern für den neuen Massnahmenplan eine Aktualisierung der externen Kosten von 1995.

## Wie werden die externen Kosten ermittelt?

In den letzten 10 Jahren wurden in verschiedenen Bereichen, insbesondere bei den Gesundheits- und Gebäudeschäden, bei den Waldschäden und bei den Klimakosten neue Grundlagen und Modelle erarbeitet. Diese nehmen einerseits stärker auf die heutige Emissions- und Immissionssituation Rücksicht und führten andererseits zu einer Neuformulierung gewisser Dosis-Wirkungsbeziehungen. Zusätzlich ist es in der Zwischenzeit möglich, die Auswirkungen der Luftschadstoffbelastung auf die Biodiversität zu monetarisieren und bei den immissionsbedingten Gesundheitskosten eine Erweiterung auf Arbeitspendler vorzunehmen, die in wenig belasteten Gemeinden wohnen, aber in belasteten Gemeinden arbeiten.

---

<sup>1</sup> Dazu ist zu bemerken, dass die Geschädigten gleichzeitig faktisch immer auch Verursacher sind. Weil die Kosten aber nicht verursachergerecht angelastet werden, erfolgen die Marktentscheidungen verzerrt, zu Ungunsten sauberer Luft bzw. zu Ungunsten von Tätigkeiten und Investitionsalternativen, die weniger Luftschadstoffe und Treibhausgase emittieren würden.

Für den Kanton Zürich werden für die folgenden Schadensbereiche die immissionsbedingten Kosten ermittelt:

- Immissionsbedingte Gesundheitskosten (*um Arbeitspendler erweitert*)
- Immissionsbedingte Gebäudeschäden
- Immissionsbedingte Waldschäden
- Immissionsbedingte Ernteauffälle
- Immissionsbedingte Biodiversitätsverluste (*neu*)
- Treibhausgasbedingte Klimakosten (Vermeidungskosten von Emissionen der Treibhausgase CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, Methan, Lachgas)

Wichtige Grundlagen sind die neuen Studien zu den gesamtschweizerischen externen Kosten in den Bereichen Gesundheitsschäden, Gebäudeschäden, Waldschäden, Ernteauffälle und Treibhausgasemissionen des Bundesamtes für Raumentwicklung (ARE) sowie ein neues Bewertungskonzept für die Ermittlung und Monetarisierung von immissionsbedingten Biodiversitätsverlusten, das im Rahmen eines EU-Projektes entwickelt wurde (NEEDS, Ott, Baur et al. 2006). Für die Zuordnung der immissionsbedingten Schadenskosten auf die verursachenden Emissionen gelten folgenden Emissionsmengen im Kanton Zürich für das Jahr 2005 (Angaben AWEL):

Verursacherguppen	t VOC/a	t SO <sub>2</sub> /a	t NH <sub>3</sub> /a	t NO <sub>x</sub> /a	t PM10/a	kt CO <sub>2</sub> /a
Abfallentsorgung	12	210	108	421	227	326
Feuerungen	582	2'083		2'348	142	4'030
Industrielle und gewerbliche Prozesse	826				74	
Landwirtschaft <sup>2</sup>	948	13	2'619	844	263	49
Strassenverkehr	2'892	11	166	6'992	634	2'052
Übrige mobile Quellen	1'482	31		3'223	522	477
Verteilung von Brenn- und Treibstoffen	559					
Verwendung von Lösungsmitteln	7'229					
<b>Total alle Verursacherguppen</b>	<b>14'591</b>	<b>2'348</b>	<b>2'893</b>	<b>13'828</b>	<b>1'862</b>	<b>6'934</b>

*Tabelle 1 Die Emissionen der wichtigsten Luftschadstoffe im Kanton Zürich im Jahr 2005 (AWEL/BAFU)*

Ausgehend von diesen schweizerischen Grundlagenarbeiten werden die immissionsbedingten externen Kosten auf die spezifische Situation im Kanton Zürich umgerechnet. Die Kostenangaben basieren auf dem Jahr 2000. Die Emissionen

<sup>2</sup> Beinhaltet sowohl Emissionen von Nutzflächen wie auch von landwirtschaftlichen Fahrzeugen.

und damit die Zuordnung der Kosten auf die Verursacher beruhen auf Angaben aus dem Jahr 2005.

## Wie hoch sind die externen Kosten der Luftverschmutzung und der Treibhausgasemissionen?

Die externen Kosten der Luftverschmutzung im Kanton Zürich betragen rund 818 Mio CHF/a (2000) und diejenigen der Treibhausgasemissionen des Kantons Zürich rund 257 Mio CHF/a (2005). Sie verteilen sich wie folgt auf die verschiedenen Schadensbereiche und die jeweiligen Verursacher (s. Tabelle 2):

	Externe Kosten Luftverschmutzung und Treibhausgasemissionen nach Verursachergruppe, Kanton Zürich 2000/2005					[Mio. CHF/a]	
	Gesundheit	Gebäude	Wald	Ernteauffälle	Biodiversität	Total Luftschadstoffe	Total Klima
Abfallentsorgung	67.7	15.9	0.6	0.8	2.6	88	11
Feuerungen	42.2	9.9	3.2	4.3	3.4	67	141
Industrie/Gewerbe	22.2	5.2	0	0	0	27	
Landwirtschaft	78.3	18.3	3.8	1.5	16.8	120	16
Verkehr	189.2	78.3	4.7	12.7	8	307	72
Übrige mobile Quellen	155.4	36.4	2.1	5.9	3	209	17
Brenn- /Treibstoffe	0	0	0	0	0		
Lösungsmittel	0	0	0	0	0		
<b>Total</b>	<b>555</b>	<b>164</b>	<b>14.4</b>	<b>25.2</b>	<b>33.8</b>	<b>818</b>	<b>257</b>

*Tabelle 2 Externe Kosten der Luftverschmutzung (2000) bzw. der Treibhausgasemissionen (2005) im Kanton Zürich nach Verursachergruppen*

Der Strassenverkehr und die übrigen mobilen Quellen sind für insgesamt 63% der gesamten externen Kosten der Luftverschmutzung im Kanton Zürich hauptverantwortlich (ohne externe Kosten Treibhausgasemissionen). Der nächst grössere Verursacher ist die Landwirtschaft mit einem Kostenanteil von 15%, gefolgt von der Abfallentsorgung mit 11%.

Wie die Aufteilung der gesamten externen Kosten im Kanton Zürich (inkl. Klimakosten) nach Verursachergruppen zeigt (s. Tabelle 43), dominieren bei den Kostenkategorien die Gesundheitskosten und daneben die Gebäudeschäden sowie die Kosten zur Vermeidung der Treibhausgasemissionen. Gesundheits- und Gebäudeschäden werden primär durch PM10-Immissionen (aber auch durch die übrigen Schadstoffe) verursacht. Gemäss diesen Kostenverhältnissen ist bei der

Reduktion der PM10-Immissionen die grösste Wirkung zu erwarten. Aufgrund der Emissionen stehen dabei Massnahmen beim Verkehr sowie bei den übrigen mobilen Quellen im Vordergrund, gefolgt von Massnahmen bei der Abfallentsorgung und in der Landwirtschaft (siehe Tabelle 3). Ein weiterer wichtiger Ansatzpunkt sind die NH<sub>3</sub>-Emissionen der Landwirtschaft. Die Landwirtschaft trägt insbesondere über die Überdüngung, sowie über die PM10-Emissionen der landwirtschaftlichen Maschinen zu hohen Schadenskosten bei.

Bei den Klimakosten (Reduktion der Treibhausgasemissionen) dominieren die Feuerungen mit 55% Anteil eindeutig vor dem Verkehr mit 18.5% Anteil an den Treibhausgasemissionen.

Zu den Schadstoffen mit der grössten Schadenswirkung in den Bereichen Gesundheits- und Gebäudeschadenskosten im Kanton Zürich gehört - wie oben erwähnt - PM10 (wobei die Gesundheitsschäden auch durch NO<sub>2</sub>-, SO<sub>2</sub>- und O<sub>3</sub>-Immissionen und die Gebäudeschäden auch durch NO<sub>2</sub> -, SO<sub>2</sub> - und O<sub>3</sub> - Immissionen mitverursacht werden). Für Waldschäden verantwortlich sind die Ozonbelastung (verursacht durch die Ozonvorläufer NO<sub>x</sub> - und VOC im Sommer), die Bodenversauerung durch SO<sub>2</sub> -, und NO<sub>2</sub> - Depositionen sowie die Überdüngung durch NO<sub>2</sub> - und NH<sub>3</sub>- Depositionen. SO<sub>2</sub>-, NO<sub>2</sub>- und NH<sub>3</sub>- Depositionen führen zudem zu Biodiversitätsverlusten.

Die Luftschadstoffe führen direkt zu Schäden an Personen und Gütern. Dagegen verursachen Treibhausgasemissionen nicht direkt Personen- und Güterschäden sondern beeinflussen diese indirekt über die Klimaveränderung. Die Reduktion von Treibhausgasemissionen führt aber in der Regel zu Synergien bei den Luftschadstoffen, weil die meisten Massnahmen zur Verminderung der Treibhausgasemissionen gleichzeitig auch die Luftschadstoffemissionen verringern.

Die Entwicklung der externen Kosten der Luftverschmutzung im Kanton Zürich seit der letzten Kostenschätzungen von 1995 ist nicht eindeutig. Die Kosten der Luftverschmutzung liegen heute mit 818 Mio CHF/a eher etwas höher als die damals geschätzten 323 bis 812 Mio CHF/a, dagegen sind die geschätzten Klimakosten mit 257 Mio CHF/a eindeutig geringer als die damaligen Klimakosten von 660 bis 850 Mio CHF im Jahr 1995. Die Ursachen der Kostendifferenzen gegenüber 1995 beruhen primär auf den besseren und aktualisierten Datengrundlagen sowie auf der Verbesserung der Methodik.

# 1 Einleitung

Die externen Kosten der Luftverschmutzung im Kanton Zürich wurden letztmals für das Jahr 1995 bestimmt (e c o n c e p t 1996). Die Kosten der Luftschadstoffbelastung betragen damals zwischen 323 und 812 Mio. CHF/a und die externen Klimakosten lagen zwischen 660 und 850 Mio. CHF/a. Diese Kosten sind mittlerweile veraltet, da in den letzten 10 Jahren in verschiedenen Bereichen (insbesondere bei Gesundheits- und Gebäudeschäden, Waldschäden, Klimakosten) neue Grundlagen und Modelle erarbeitet wurden, die einerseits stärker auf die heutige Emissions- und Immissionssituation Rücksicht nehmen und andererseits zu einer Neuformulierung gewisser Dosis-Wirkungsbeziehungen geführt haben. Zusätzlich werden gewisse Auswirkungen von Luftverschmutzung (z.B. Biodiversitätsschäden) geschätzt, die damals aus methodischen Gründen nicht quantifiziert werden konnten.

Das AWEL des Kantons Zürich plant, bis Ende 2006 einen neuen Massnahmenplan Lufthygiene zu verfassen, der auf aktualisierten Grundlagen und neuen Mengengerüsten basiert. Ein bedeutendes Element der Massnahmenplanung sowie ein wichtiger Input für die politische Diskussion sind die Kosten und die Nutzen der im Massnahmenplan vorgeschlagenen Massnahmen. Die externen Kosten der Luftverschmutzung sind eine Information zu den heute noch nicht berücksichtigten Kosten der aktuellen Luftschadstoffbelastung. Sie sind ein Grund für die Luftreinhaltepolitik und sie zeigen, wie gross die kostenmässigen Nutzen sein können, wenn die aktuelle Luftschadstoffbelastung mit der Massnahmenplanung reduziert werden können. Aus diesem Grund sind aktuelle Angaben, die auf den neuesten methodischen Erkenntnissen und den aktuellsten verfügbaren Daten zu den externen Kosten der Luftverschmutzung im Kanton Zürich beruhen, unerlässlich. Dabei muss aber beachtet werden, dass damit nicht alle Wirkungen der Luftverschmutzung erfasst und in Franken ausgedrückt sind. Die ermittelten externen Kosten umfassen nur diejenigen Bereiche, bei denen mit hinreichender Sicherheit ein Wirkungszusammenhang hergestellt und die Wirkungen überhaupt monetarisiert werden konnten und die Kostenschätzungen werden konservativ vorgenommen, d.h. es werden tendenziell die unteren Bandbreitengrenzen der ermittelten Kostenbandbreiten zugrundegelegt.



## 2 Vorgehen

Grundsätzlich werden die Kosten der Luftverschmutzung im Kanton Zürich, die für das Jahr 1995 ermittelt wurden (**e c o n c e p t** 1996), auf das Jahr 2005 aufdatiert. Die immissionsbedingten Kosten werden detailliert für die folgenden Bereiche dargestellt:

- Gesundheit (erweitert)
- Gebäudeschäden
- Waldschäden
- Ernteauffälle
- Biodiversitätsverluste (neu)
- Treibhausgasbedingte Klimakosten

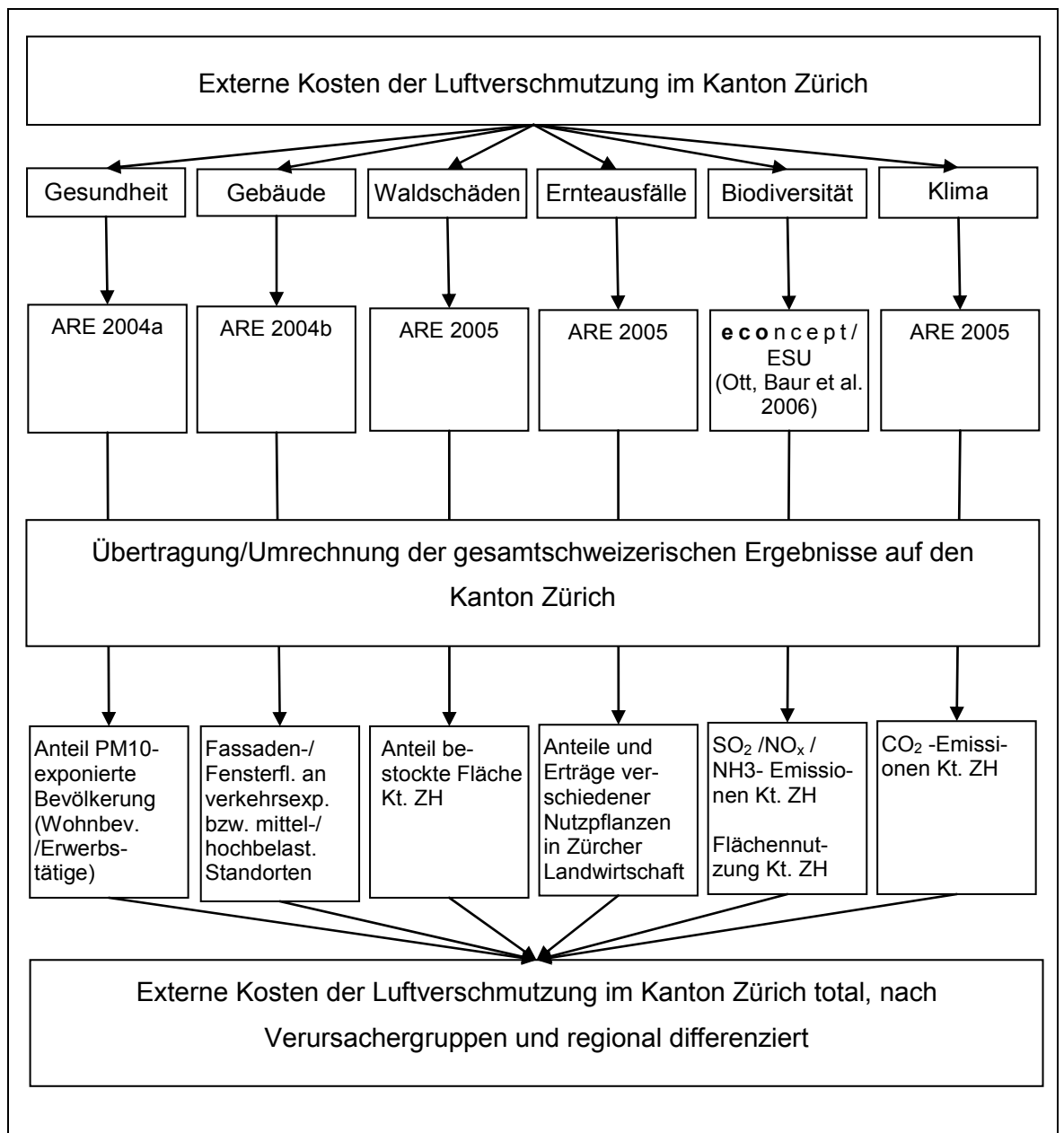
Eine wichtige Grundlage sind die neuen Studien zu den gesamtschweizerischen externen Kosten in den Bereichen Gesundheit, Gebäudeschäden, Waldschäden und Ernteauffälle des Bundesamtes für Raumentwicklung (ARE). Für den bisher nicht berücksichtigten Bereich "Immissionsbedingte Biodiversitätsverluste" wird durch **e c o n c e p t** ein neues Bewertungskonzept entwickelt, welches sich auf Arbeiten für ein EU-Projekt abstützt (Ott, Baur et al. 2006). Zusätzlich werden die externen Klimakosten infolge der CO<sub>2</sub>-Emissionen im Kanton Zürich ausgewiesen. Für die Zuordnung der immissionsbedingten Schadenskosten auf die verursachenden Emissionen gehen wir von den folgenden Emissionsmengen im Kanton Zürich für das Jahr 2005 aus (Angaben AWEL):

Verursacherguppen	t VOC/a	t SO <sub>2</sub> /a	t NH <sub>3</sub> /a	t NO <sub>x</sub> /a	t PM10/a	kt CO <sub>2</sub> /a
Abfallentsorgung	12	210	108	421	227	326
Feuerungen	582	2'083		2'348	142	4'030
Industrielle und gewerbliche Prozesse	826				74	
Landwirtschaft <sup>3</sup>	948	13	2'619	844	263	49
Strassenverkehr	2'892	11	166	6'992	634	2'052
Übrige mobile Quellen	1'482	31		3'223	522	477
Verteilung von Brenn- und Treibstoffen	559					
Verwendung von Lösungsmitteln	7'229					
<b>Total alle Verursacherguppen</b>	<b>14'591</b>	<b>2'348</b>	<b>2'893</b>	<b>13'828</b>	<b>1'862</b>	<b>6'934</b>

*Tabelle 3 Die Emissionen der wichtigsten Luftschadstoffe im Kanton Zürich im Jahr 2005 (AWEL/BAFU)*

<sup>3</sup> Beinhaltet sowohl Emissionen von Nutzflächen wie auch von landwirtschaftlichen Fahrzeugen.

Eine Übersicht über das konkrete Vorgehen liefert die folgende Figur:



Figur 1 Übersicht über das Vorgehen zur Bewertung der externen Kosten der Luftverschmutzung im Kanton Zürich

Für die Umrechnungen werden die aktuellsten verfügbaren Emissions- und Immissionsdaten und Bezugsgrößen verwendet. Die Kostenangaben stammen in der Regel aus dem Jahr 2000, so dass die Ergebnissen Kosten für das Jahr 2000 ausweisen, wenn auch weitgehend aufgrund der Emissionen von 2005. Die externen Kosten der Treibhausgasemissionen werden dagegen für das Jahr 2005 ermittelt.

## 3 Gesundheitsschäden

### 3.1 Vorgehen

Die Schadstoffbelastung der Luft wirkt sich negativ auf die Gesundheit aus. In vielen Studien wurden ein Anstieg der Mortalität und der Morbidität in der Bevölkerung bei zunehmender Luftbelastung nachgewiesen. Dabei hat sich gezeigt, dass insbesondere Atemwegs- und Herz-/Kreislaufkrankungen mit den Ausmass der Luftbelastung assoziiert sind. Zu den gesundheitsschädigenden Luftschadstoffen zählen insbesondere Partikel-Immissionen (PM10) sowie NO<sub>2</sub>-, SO<sub>2</sub>- und Ozonimmissionen. Die primären Wirkungen sind Atemwegs-, Herz-/Kreislauf- sowie längerfristig auch Krebserkrankungen.

Für das Jahr 2000 wurden die externen Gesundheitskosten durch Luftverschmutzung für die Schweiz ermittelt (ARE 2004a). In einem ersten Schritt wurde in (ARE 2004a) die Belastung (Exposition) der Bevölkerung durch Luftschadstoffe bestimmt (aufgrund der PM10-Belastung bei Verwendung von PM10 als Leitschadstoff). Basierend auf der ermittelten Exposition wurden die durch die Luftverschmutzung verursachten zusätzlichen Krankheits- und Todesfälle berechnet, die anschliessend mit Hilfe von spezifischen Kostensätzen pro Krankheits- und Todesfall monetarisiert wurden. Gemäss ARE (2004a) entstehen durch die gesamte Luftverschmutzung - verursacht durch Verkehr, Industrie, Gewerbe, Haushalte sowie Land- und Forstwirtschaft in der Schweiz Kosten von 4'203 Mio. CHF pro Jahr.

Die immissionsbedingten Gesundheitskosten des Kantons Zürich werden wie folgt aus den schweizerischen Gesundheitskosten der Luftschadstoffbelastung abgeleitet:

- PM10 wird wie in der gesamtschweizerischen Studie als Leitschadstoff verwendet, da der Zusammenhang zwischen Feinstaubbelastung und Gesundheitsbeeinträchtigungen epidemiologisch gut untersucht und nachgewiesen ist.
- Die Gesundheitskosten der Luftverschmutzung im Kanton Zürich werden aufgrund der geschätzten Anzahl der mit verschiedenen PM10-Belastungen exponierten Bevölkerung (BewohnerInnen und Erwerbstätige) aus den immissionsbedingten Gesundheitskosten der Schweiz abgeleitet (ARE 2004a).

- Der Anteil der Zürcher Bevölkerung und der Anteil Arbeitsplätze in den vier PM10-Immissionskategorien 0-10/10-20/20-30/30-40  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  wird als Grundlage für die Berechnungen verwendet (mittlere Jahresbelastungen).
- Den Bevölkerungsanteilen in diesen Immissionskategorien werden die attributablen Fälle<sup>4</sup> pro 10  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  PM10-Belastung und 100'000 EinwohnerInnen für verschiedene Krankheits- und Todesarten aus ARE (2004a) zugeordnet. Diese Krankheits- und Todesfälle werden mit den Kostensätzen aus ARE (2004a) monetarisiert.
- Zusätzlich zur PM10-Belastung am Wohnort soll auch die PM10-Belastung am Arbeitsort berücksichtigt werden. Um Doppelzählungen zu vermeiden, werden bei den Erwerbstätigen nur diejenigen Personen berücksichtigt, die in wenig belasteten Gebieten leben und in belasteten Gebieten arbeiten. Dazu werden die Gemeinden des Kantons Zürich aufgrund ihres Bevölkerungsanteils über und unter dem PM10-Immissionsgrenzwert in die Kategorien "nicht belastet" (mehr als 60% der Bevölkerung unter dem PM10-Jahresgrenzwert von 20 Mikrogramm/ $\text{m}^3$ ) und "belastet" eingeteilt (mehr als 40% der Bevölkerung über dem Grenzwert). Aufgrund der Pendlerstatistik werden in belasteten Gemeinden die Nettozupendler eruiert, die aus nicht belasteten Gemeinden stammen. Die Zupendler von ausserhalb des Kantons Zürich werden nicht berücksichtigt.
- Die gesamten externen Gesundheitskosten der Luftverschmutzung werden berechnet aus den externen Gesundheitskosten für die Wohnbevölkerung des Kantons Zürich sowie den externen Gesundheitskosten der Erwerbstätigen im Kanton Zürich, die in belasteten Gemeinden arbeiten und in nicht belasteten Gemeinden leben.
- Die Gesundheitskosten werden gemäss den jeweiligen Anteilen an den PM10-Emissionen im Kanton Zürich auf die Verursachergruppen Verkehr (ÖV/IV und Güter-/Personenverkehr) und Landwirtschaft/Feuerungen/ Industrie/Abfallentsorgung aufgeteilt.

---

<sup>4</sup> Attributable Fälle: Todes- bzw. Krankheitsfälle aufgrund der 7,5  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  PM10-Belastung übersteigenden Immissionsbelastung (mittlere Jahresbelastung).

## 3.2 Berechnung der Gesundheitskosten für die Wohnbevölkerung

### 3.2.1 Grundlagen

Die Belastung mit Luftschadstoffen führt zu zusätzlichen Krankheitsfällen und zu einer Reduktion der Lebenserwartung. Diese erhöhte Morbidität und Mortalität führt zu sozialen Kosten in der Form zusätzlicher Aufwendungen und Nutzenverlusten der Betroffenen sowie der Allgemeinheit.

Grundlage für die Berechnung der luftschadstoffbedingten Gesundheitskosten ist die aktuelle Schadstoffbelastung der Bevölkerung des Kantons Zürich im Jahr 2000. Im Einklang mit ARE (2004a) wird wie bereits erwähnt PM10 als Leit-schadstoff verwendet. Der Zusammenhang zwischen Feinstaubbelastung und Gesundheitsbeeinträchtigungen ist gut untersucht und nachgewiesen. Die folgende Tabelle zeigt die PM10-Belastung der Wohnbevölkerung im Kanton Zürich:

PM10 Belastung Wohnort (Mikrogramm/m <sup>3</sup> pro Jahr)	10-20	20-30	30-40	Total
Exponierte Bevölkerung	336'490	839'758	48'283	1'224'531

*Tabelle 4 PM10 Exposition der Wohnbevölkerung des Kantons Zürich im Jahr 2000 (mittlere Jahresbelastung, Quelle AWEL)*

Lediglich 27% der Bevölkerung des Kantons Zürich (336'490 von 1'224'531) leben in Gebieten mit einer PM10-Belastung, die unter dem Jahresmittelwert von 20 Mikrogramm/m<sup>3</sup> liegt, während 69% der Bevölkerung in PM10-belasteten und 4% in von PM10 sehr belasteten Gebieten leben.

### 3.2.2 Attributable Fälle und Kosten pro Fall

Wir verwenden das Konzept der attributablen Fälle. Dabei handelt es sich um den Anteil der Erkrankungen/Todesfälle, der auf eine bestimmte Schadstoffexposition der Bevölkerung zurückgeführt wird und der über das Risiko der nichtexponierten Bevölkerung hinausgeht (definiert als PM10-Belastung von weniger als 7,5 Mikrogramm/m<sup>3</sup> pro Jahr; für Details siehe ARE 2004a).

Grundsätzlich beruhen die folgenden Berechnungen auf vorsichtigen Annahmen bei Unsicherheit. Dies führt eher zu einer Unterschätzung der tatsächlichen Kos-

ten (at least Ansatz). Unsichere Dosis-Wirkungsbeziehungen zwischen Luftschadstoffbelastungen und Gesundheitsbeeinträchtigungen werden nicht berücksichtigt. Die Verwendung von PM10 als Leitschadstoff verhindert Mehrfachzählungen, die bei einer Summierung der attributablen Krankheits- und Todesfälle pro Luftschadstoff sonst auftreten würden. Das ist allerdings mit dem Nachteil verbunden, dass Gesundheitsschäden, die unabhängig vom Leitschadstoff auftreten, nicht in die Berechnungen einfließen. Auch aus diesem Grund ergeben die Kostenschätzungen eine untere Grenze der tatsächlichen Gesundheitskosten infolge der Luftverschmutzung.

Die attributablen Fälle wurden in ARE (2004a) ermittelt, indem verschiedene in- und ausländische Studien ausgewertet wurden. Diese Studienergebnisse beruhen alle auf linearen Dosis-Wirkungsbeziehungen und die attributablen Fälle können daher als Fälle pro 10 µg/m<sup>3</sup> PM10-Belastung über einer PM10-Belastung von 7,5 µg/m<sup>3</sup> und pro 100'000 EinwohnerInnen dargestellt werden. Die folgende Tabelle zeigt die hier verwendeten Resultate für attributable Krankheits- und Todesfälle aufgrund der PM10-Belastung:

<b>Gesundheitsschädigung</b>	<b>Attributable Fälle pro 10 Mikrogramm/m<sup>3</sup> PM10-Belastung und pro 100'000 Einwohner pro Jahr</b>
Erhöhte Gesamtsterblichkeit	44 Todesfälle
Erhöhte Säuglingssterblichkeit	0,3 Todesfälle
Spitalaufenthalte wegen Atemwegserkrankungen	60 Spitaltage
Spitalaufenthalte wegen Herz-/Kreislaufkrankungen	117 Spitaltage
Chronische Bronchitis bei Erwachsenen	12 Neuerkrankungen
Akute Bronchitis bei Kindern	479 Fälle
Asthmaanfälle bei Erwachsenen	486 Fälle
Tage mit eingeschränkter Aktivität	21'033 Tage

*Tabelle 5 Attributable Krankheits- und Todesfälle durch 10 Mikrogramm/m<sup>3</sup> PM10-Belastung pro 100'000 EinwohnerInnen pro Jahr (Quelle: ARE 2004a)*

Mithilfe der Auswertung nationaler und internationaler Studien wurden in ARE (2004a) Kostensätze zur Bewertung dieser Fälle hergeleitet. Die Gesundheitskosten umfassen einerseits Aufwendungen von Betroffenen und der Allgemeinheit zur Behandlung der immissionsbedingten Krankheitsfälle sowie Nutzenverluste der Betroffenen und der Allgemeinheit aufgrund der Krankheits- und Todesfälle. Konkret bestehen die Gesundheitskosten aus den folgenden Bestandteilen:

- Medizinische Behandlungskosten (stationäre und ambulante Behandlungen)
- Administrationskosten der Krankenversicherungen
- Produktionsausfall (Ausfall von Arbeitsleistung bzw. Wertschöpfung)
- Immaterielle Kosten (Verlust des Wohlbefindens, Leid, Schmerz etc.)

Die Aufwendungen der Betroffenen und der Allgemeinheit werden durch die so genannten Behandlungskosten (Daten von Krankenversicherungen etc.) bewertet. Die Nutzenverluste werden durch die Produktionsausfallkosten (Kosten verminderter/ausgefallener Arbeitsleistung durch Krankheit oder frühzeitigen Tod) sowie durch die Ermittlung der Zahlungsbereitschaft der Betroffenen für zusätzliche Lebensjahre oder zur Vermeidung von bestimmten Krankheiten erfasst. Die Behandlungskosten sowie mit den Produktionsausfallkosten werden über Marktpreise ermittelt. Mit der Erhebung von Zahlungsbereitschaften werden diejenigen Kosten der Krankheiten und Todesfälle geschätzt, für die keine Marktpreise vorhanden sind: Die immateriellen Kosten (Nutzenverluste durch Krankheiten und Todesfälle für Betroffene) sowie die individuell getragenen Vermeidungsmassnahmen. Da diese Kostenkategorien jeweils unterschiedliche Bestandteile der Gesundheitskosten repräsentieren, können die gesamten Kosten pro Krankheits-/Todesfall durch Addition dieser verschiedenen Kostenkategorien bestimmt werden.

Die folgende Tabelle zeigt eine Übersicht über die resultierenden Kostensätze pro immissionsbedingtem Krankheits- bzw. Todesfall:

<b>Kostensätze pro Krankheits- und Todesfall (in CHF)</b>				
	<b>Zahlungs- bereitschaft</b>	<b>Behandlungs- kosten</b>	<b>Produkti- onsausfall</b>	<b>Total</b>
Verlorenes Lebensjahr	85'473		4'397	<b>89'870</b>
Spitaltage Atemwegserkrankung	775	805	24	<b>1'603</b>
Spitaltage Herz-/Kreislauf- Erkrankung	775	1'030	24	<b>1'829</b>
Chronische Bronchitis Erwachse- ne pro Fall	410'462	6'803	169	<b>417'434</b>
Akute Bronchitis Kinder pro Fall	257	54		<b>312</b>
Asthmaanfälle Erwachsene pro Fall	61	1	12	<b>74</b>
Tage mit eingeschränkter Aktivität	185		12	<b>197</b>

*Tabelle 6* Verwendete Kostensätze zur Bewertung der immissionsbedingten Gesundheitskosten [CHF/Fall] (Quelle: ARE 2004a)

Mittels dieser Kostensätze können die durch die Luftverschmutzung im Kanton Zürich ausgelösten Gesundheitsbeeinträchtigungen bewertet werden.

### 3.2.3 Kosten immissionsbedingter Krankheits- und Todesfälle am Wohnort

In einem ersten Schritt werden die im Kanton Zürich aufgrund der PM10 Exposition der Zürcher Bevölkerung zu erwartenden zusätzlichen Krankheits- und Todesfälle pro Jahr berechnet. In einem zweiten Schritt werden die zusätzlichen Krankheits- und Todesfälle mit den Kostensätzen von Tabelle 6 bewertet.

In ARE (2004a) wird von einer jährlichen mittleren PM10-Referenzkonzentration von 7,5 Mikrogramm/m<sup>3</sup> ausgegangen. Gemäss WHO sind unterhalb dieser Konzentration keine negativen Gesundheitseffekte zu erwarten. Im Kanton Zürich gibt es keine Wohngebiete, die den Wert von 10 Mikrogramm PM10/m<sup>3</sup> unterschreiten, d.h. die gesamte Zürcher Bevölkerung muss bei der Berechnung der attributablen Fälle berücksichtigt werden.

Die Multiplikation der Bevölkerungszahl, die mit einer bestimmten PM10-Schadstoffexposition lebt, mit der Anzahl attributabler Fälle pro 100'000 EinwohnerInnen und der jeweiligen PM10-Belastung ergibt die folgenden zusätzlichen Krankheits- und Todesfälle aufgrund von Luftverschmutzung im Kanton Zürich:

	<b>Krankheits- und Todesfälle aufgrund der PM10-Belastung am Wohnort im Kt.ZH</b>
Erhöhung der Sterblichkeit	950 Todesfälle
Säuglingssterblichkeit	6 Todesfälle
Spitaltage wegen Atemwegserkrankungen	1298 Spitaltage
Spitaltage wegen Herz-/Kreislaufferkrank.	2531 Spitaltage
Chronische Bronchitis Erwachsene	259 Neuerkrankungen
Akute Bronchitis Kinder	10'365 Fälle
Asthmaanfälle Erwachsene	10'515 Fälle
Tage mit eingeschränkter Aktivität	455'153 Tage

*Tabelle 7 Krankheits- und Todesfälle aufgrund der PM10-Belastung am Wohnort im Kanton Zürich für das Jahr 2000.*

Die Multiplikation der immissionsbedingten Krankheits- und Todesfälle mit den in Tabelle 6 dargestellten Kostensätzen pro Krankheitsfall bzw. Todesfall ergibt die folgenden Gesundheitskosten:

	<b>Gesundheitskosten der PM10-Belastung am Wohnort im Kt. Zürich im Jahr 2000 (Mio. CHF/a)</b>
Frühzeitige Todesfälle	328,3
Spitaltage wegen Atemwegserkrankungen	2,1
Spitaltage wegen Herz-/Kreislaufkrank.	4,6
Chronische Bronchitis Erwachsene	108,1
Akute Bronchitis Kinder	3,2
Asthmaanfälle Erwachsene	0,8
Tage mit eingeschränkter Aktivität	89,7
<b>Total</b>	<b>536,8</b>

*Tabelle 8 Gesundheitskosten von Krankheitsfällen aufgrund der PM10-Belastung am Wohnort im Kanton Zürich im Jahr 2000.*

Die Berechnung der Kosten für die immissionsbedingten Todesfälle müsste theoretisch anhand von Sterbetafeln, mithilfe der Überlebenswahrscheinlichkeiten für bestimmte Altersklassen für eine Referenzsituation sowie für eine Situation mit einer bestimmten Luftverschmutzung vorgenommen werden (s. ARE 2004a, S. 133f.). Da spezifische Sterbetafeln für den Kanton Zürich nicht vorliegen, werden die Kosten der Todesfälle im Kanton Zürich aus den Kosten der Todesfälle für die gesamte Schweiz aus ARE (2004a) abgeleitet. Gemäss ARE (2004a, S. 67) sterben in der Schweiz pro Jahr 3'769 Personen frühzeitig aufgrund von Luftverschmutzung (3'746 vorzeitige Todesfälle von Erwachsenen und 23 Todesfälle bei Säuglingen). Dies führt für die gesamte Schweiz zu Gesundheitskosten von 1'313 Mio. CHF pro Jahr (bei Kosten von knapp 90'000 CHF pro verlorenes Lebensjahr und einer mittleren Verkürzung der Lebensdauer der vorzeitig Verstorbenen um 3,9 Jahre). Umgerechnet auf die 956 vorzeitigen Todesfälle aufgrund der PM10-Belastung im Kanton Zürich ergeben sich Kosten von 328 Mio. CHF pro Jahr.

Die gesamten Gesundheitskosten aufgrund PM10-Belastung bei der Wohnbevölkerung des Kantons Zürich beträgt pro Jahr **537 Mio. CHF**.

### 3.3 Berechnung der Gesundheitskosten für Beschäftigte

Die BewohnerInnen des Kantons Zürich sind nicht nur an ihrem Wohnort sondern auch am Arbeitsplatz PM10-Belastungen ausgesetzt. Diese Gesundheitsbeeinträchtigungen müssen bei einer Abschätzung der Gesundheitskosten durch die PM10-Belastung berücksichtigt werden.

Um keine Doppelzählungen vorzunehmen und das Ergebnis nicht zu überschätzen, werden nur bei denjenigen Personen zusätzliche Gesundheitskosten in Folge der Arbeitsplatzexposition angenommen, die in wenig belasteten Orten leben und an belasteten Orten arbeiten. Dazu werden die Gemeinden des Kantons Zürich aufgrund ihrer PM10-Belastung in die Kategorie "nicht belastet" (d.h. mehr als 60% der EinwohnerInnen in der PM10-Belastungskategorie 10 - 20 Mikrogramm/m<sup>3</sup> und somit unter dem Jahresgrenzwert von 20 Mikrogramm PM10/m<sup>3</sup> pro Jahr) und "belastet" eingeteilt (mehr als 40% der Arbeitsplätze in den PM10-Belastungskategorien 20-30 und 30-40 Mikrogramm/m<sup>3</sup> pro Jahr, d.h. über dem Jahresgrenzwert von 20 Mikrogramm PM10/m<sup>3</sup> pro Jahr).

Aufgrund der Pendlerstatistik des BFS können die Pendlerbewegungen zwischen diesen Gemeinden eruiert werden. Insgesamt arbeiten 76'089 Personen an belasteten Arbeitsplätzen und wohnen in nicht belasteten Gemeinden (Angaben für das Jahr 2000, VZ 2000).

Ein Vergleich der durchschnittlichen Belastung dieser 76'089 Personen am Wohnort sowie am Arbeitsort ergibt eine Mehrbelastung am Arbeitsort um durchschnittlich 10 Mikrogramm/m<sup>3</sup> pro Jahr.

Mittels der attributablen Fälle pro Zusatzbelastung (s. Tabelle 5) können für diese Personen die durch die PM10-Belastung am Arbeitsplatz entstehenden zusätzlichen Krankheits- und Todesfälle berechnet werden (s. folgende Tabelle, Erkrankungen von Kindern werden in diesem Zusammenhang nicht berechnet).

<b>Zusätzliche Krankheits- und Todesfälle aufgrund der PM10-Belastung am Arbeitsplatz im Kanton Zürich</b>	
Erhöhung der Sterblichkeit	33 Todesfälle
Spitaltage wegen Atemwegserkrankungen	45 Spitaltage
Spitaltage wegen Herz-/Kreislaufferkrankungen	89 Spitaltage
Chronische Bronchitis Erwachsene	9 Neuerkrankungen
Asthmaanfälle Erwachsene	369 Fälle
Tage mit eingeschränkter Aktivität	16'003 Tage

*Tabelle 9 Krankheits- und Todesfälle aufgrund der PM10-Belastung von Beschäftigten mit einer geringen Wohnortsbelastung an ihrem Arbeitsplatz im Kanton Zürich*

Die Multiplikation mit den in Tabelle 6 dargestellten Kostensätzen pro Krankheitsfall ergibt die folgenden zusätzlichen Gesundheitskosten infolge der Arbeitsplatzexposition:

<b>Gesundheitskosten der PM10-Belastung am Arbeitsplatz im Kt. ZH im Jahr 2000 (Mio. CHF/a)</b>	
Frühzeitige Todesfälle	11,33
Spitaltage wegen Atemwegserkrankungen	0,07
Spitaltage wegen Herz-/Kreislaufferkrank.	0,16
Chronische Bronchitis Erwachsene	3,76
Asthmaanfälle Erwachsene	0,03
Tage mit eingeschränkter Aktivität	3,15
<b>Total</b>	<b>18,50</b>

*Tabelle 10 Gesundheitskosten von Krankheits- und Todesfällen aufgrund der PM10-Belastung von Beschäftigten mit einer geringen Wohnortsbelastung an ihrem Arbeitsplatz im Kanton Zürich (im Jahr 2000).*

Durch die PM10-Belastung von BewohnerInnen in wenig belasteten Gebieten am Arbeitsplatz entstehen im Kanton Zürich pro Jahr Gesundheitskosten von **18,5 Mio. CHF**. Diese Kosten können als untere Grenze der zusätzlichen Gesundheitskosten durch Luftverschmutzung am Arbeitsplatz im Kanton Zürich interpretiert werden.

tiert werden, da Zupendler von ausserhalb des Kantons in dieser Rechnung nicht berücksichtigt wurden.

### 3.4 Gesamte Gesundheitskosten und Aufteilung auf Verursacher

Die gesamten Gesundheitskosten durch die PM10-Belastung am Wohnort und am Arbeitsplatz betragen im Kanton Zürich mindestens **555 Mio. CHF/a (im Jahr 2000)**.

Die folgende Tabelle zeigt die Aufteilung dieser Gesundheitskosten auf die einzelnen Verursacher von PM10-Emissionen. Der Strassenverkehr und die übrigen mobilen Quellen sind für mehr als 62% der Gesundheitskosten durch Luftverschmutzung im Kanton Zürich verantwortlich. Die weiteren Verursacher sind die Abfallentsorgung (inklusive KVA und Abfallverbrennung von Forst- und Landwirtschaft sowie von Bauabfällen), Landwirtschaft (landwirtschaftliche Maschinen), Feuerungen sowie industrielle und gewerbliche Prozesse.

Verursachergruppen	Emissionen [t PM10/a]	Anteil an PM10- Emissionen	Gesundheits- kosten [Mio. CHF/a]
Abfallentsorgung	227	12.2%	67.7
Feuerungen	142	7.6%	42.2
Industrielle und gewerbliche Prozesse	74	4.0%	22.2
Landwirtschaft	263	14.1%	78.3
Strassenverkehr	634	34.1%	189.2
Übrige mobile Quellen	522	28.0%	155.4
Verteilung von Brenn- und Treib- stoffen	0	0%	0
Verwendung von Lösungsmitteln	0	0%	0
<b>Total alle Verursachergruppen</b>	<b>1'862</b>	<b>100%</b>	<b>555</b>

*Tabelle 11 Immissionsbedingte Gesundheitskosten im Kanton Zürich pro Verursachergruppe im Jahr 2000*

Gesundheitsbeeinträchtigungen können nicht nur durch PM10-Immissionen sondern auch durch Stickstoffdioxid- (NO<sub>2</sub>-), Ammoniak- (NH<sub>3</sub>-), Schwefeldioxid-

(SO<sub>2</sub>-) Immissionen und flüchtige organische Verbindungen (VOC) verursacht werden, wobei diese Luftschadstoffe je ihre eigene Art haben, die menschliche Gesundheit zu beeinträchtigen. PM10 als Leitschadstoff ist lediglich ein Indikator für eine Luftbelastungssituation mit bestimmten Anteilen der anderen Luftschadstoffe. Die Berechnung von Emissionszuschlägen mittels Division der Gesundheitskosten durch die PM10-Emissionen im Kanton Zürich würde aus diesem Grund zu keinen plausiblen Resultaten führen.



## 4 Gebäudeschäden

### 4.1 Vorgehen

Die Luftschadstoffe NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub> und PM10 führen zu einer vorzeitigen Alterung der Gebäudehüllen (höhere Renovationsfrequenzen) sowie zu grösserem Reinigungs- und Unterhaltsaufwand an Gebäuden. In ARE (2004b) wurden die Gebäudeschäden für die Schweiz für das Jahr 2000 berechnet. Die verkehrsbedingten Gebäudeschäden für die ganze Schweiz betragen im Jahr 2000 265 Mio. CHF. Dabei belaufen sich die zusätzlichen Renovationskosten auf 218 Mio. CHF/a und die zusätzlichen Reinigungskosten auf 47 Mio. CHF/a. Diese Kosten fallen überwiegend in den Städten (125 Mio. CHF/a = 47%) sowie den Agglomerationen (110 Mio. CHF/a = 42%) an. Hauptverursacher ist der Strassenverkehr. Nicht berücksichtigt werden Schäden an Kulturgütern und historischen Gebäuden.

Die Gebäudeschäden setzen sich also aus den folgenden 3 Elementen zusammen:

- Zusätzliche Renovationsaufwendungen infolge erhöhter Renovationstätigkeit an verkehrsbelasteten Standorten.
- Immissionsbedingte Verkürzung der Lebensdauer bzw. Verkürzung der Erneuerungszyklen an nicht verkehrsexponierten Lagen erhöhen die Kapitalkosten der betroffenen Gebäudehüllenelemente.
- Immissionsbedingte Erhöhung von Reinigungsaufwendungen und -frequenzen erhöhen die Gebäudeunterhaltskosten an verkehrsbelasteten Standorten.

Erfasst werden die Kosten an Gebäudefassaden. Nicht berücksichtigt sind allfällige Schäden an Kunst- und Baudenkmälern.

Diese Ergebnisse aus ARE (2004b) werden wie folgt auf den Kanton Zürich umgerechnet:

- Berechnung der immissionsbedingten Renovations- und Reinigungskosten an verkehrsexponierten Lagen mittels dem Ausmass und der Immissionsbelastung verkehrsexponierter Fassaden- und Fensterflächen im Kanton Zürich (Daten Wüest&Partner).

- Die schweizerischen Durchschnittswerte aus ARE (2004b) für die Anteile verkehrsexponierter Flächen in 8 Agglomerationstypen werden auch für den Kanton Zürich verwendet.
- Die immissionsbedingten Renovationskosten an **nicht verkehrsexponierten** Lagen werden über die Verkürzung der Lebensdauer der Fassadenelemente infolge der Immissionsbelastung und die Ermittlung der resultierenden zusätzlichen Kapitalkosten verglichen mit der Fassadenlebensdauer in wenig belasteten Gebieten ('Land') bestimmt.
- Berechnung der immissionsbedingten **Reinigungskosten** an **verkehrsexponierten** Lagen mittels dem Ausmass und der Immissionsbelastung der Fensterflächen an verkehrsexponierten Lagen im Kanton Zürich (Daten Wüest&Partner).
- Die verwendeten Kostensätze zur Bestimmung der zusätzlichen Renovations- und Reinigungskosten stammen aus ARE (2004b).

Die räumliche Systemabgrenzung beruht auf insgesamt 8 verschiedenen schweizerischen Gemeindetypen (ARE 2004b, S. 11), die sich auf die Agglomerationsdefinition des Bundesamtes für Statistik abstützen und für die bereits Daten zur Immissionssituation sowie zur Verkehrsexposition bestehen. Es handelt sich dabei um:

- Metropolen
- Agglomerationsgemeinden von Metropolen
- Kerngemeinden innerhalb von Metropolitanräumen
- Sonstige Agglomerationsgemeinden innerhalb von Metropolitanräumen
- Kerngemeinden
- Agglomerationsgemeinden ausserhalb von Metropolitanräumen
- Einzelstädte
- Ländliche Gemeinden

Die in der Schweiz rückläufige Belastung mit NO<sub>2</sub>- und SO<sub>2</sub>-Immissionen sowie der Einsatz verbesserter Materialien im Fassadenbau und ein verbesserter Korrosionsschutz haben zu einer deutlichen Reduktion der Korrosionsgefahr bei Metallbauteilen der Fassaden geführt. Zum Hauptverursacher von Fassadenverschmutzung und Korrosionsprozessen wurden in den letzten Jahren PM10-Immissionen. PM10 reagiert in der Regel nicht direkt mit Materialien an der Gebäudefassade, führt aber zu einer deutlich wahrnehmbaren Verschmutzung. Neben der direkten Verschmutzung wirkt PM10 durch die Anreicherung verschiede-

ner korrosiver Schadstoffe auf den Oberflächen der Russpartikel als Katalysator für Korrosionsprozesse an Oberflächen. Dies und die gute Dokumentation der schweizerischen PM10-Emissions- und Immissionsbelastung führen dazu, dass PM10 als Leitschadstoff für Gebäudeschäden und Fassadenverschmutzung betrachtet wird.

## 4.2 Daten und Ergebnisse

Immissionen von PM10 führen zu Verschmutzung und Korrosion von Fassaden- und Fensterflächen bei Gebäuden. Diese Schäden führen für die GebäudebesitzerInnen zu erhöhten Kosten aufgrund einer Verkürzung der Lebensdauer der Gebäudehülle bzw. infolge der Erhöhung der Renovationsfrequenzen sowie zu verkürzten Reinigungszyklen und daher höheren Reinigungsaufwendungen.

Diese Kosten können wie folgt erfasst werden:

- Bewertung der Verkürzung der Lebensdauer der Gebäudehülle an verkehrsbelasteten und nicht verkehrsbelasteten Standorten.
- An verkehrsbelasteten Standorten werden die Kosten direkt durch einen Vergleich mit der Situation abseits von Verkehrsachsen erfasst (Ansatz 1).
- An nicht verkehrsbelasteten Standorten wird der Zusammenhang zwischen Zustand der Gebäudehülle und Luftschadstoffemissionen (PM10) durch eine empirische Analyse erfasst (Ansatz 2).

Berechnungsansatz 1 wird nur für die Berechnung der Gebäudeschäden an verkehrsexponierten Standorten verwendet, während Berechnungsansatz 2 sowohl für verkehrs- wie auch für nicht verkehrsexponierte Standorte geeignet ist. Um eine Doppelzählung zu vermeiden, werden die Resultate von Berechnungsansatz 1 für die Quantifizierung der Gebäudeschäden an verkehrsexponierten Standorten genutzt, während die Resultate des Ansatzes 2 für die Berechnung der Kosten an nicht-verkehrsexponierten Standorten verwendet werden.

- Direkte Erfassung der höheren Reinigungsfrequenzen und der Kosten an verkehrsexponierten Standorten.

#### **4.2.1 Effektiv getätigte Renovationsaufwendungen an verkehrsbelasteten Standorten**

Immissionsbedingte Schäden an der Gebäudefassade treten vor allem an Hauptachsen mit hohem Verkehrsaufkommen auf. Als Indikator für die Verkehrsexposition werden die PM10-Immissionen verwendet: Gebiete mit mehr als 20  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  PM10 (Jahresbelastung) gelten als verkehrsexponiert.

An verkehrsbelasteten Standorten lassen sich mit einem genügend grossen Datensatz veränderte Renovationszyklen (zusätzliche verkehrsbedingte Renovationen) an Gebäuden im Vergleich zu Nebenstrassen beobachten. Insofern können an Hauptachsen die Folgen der verkehrsbedingten Luftverschmutzung für den Gebäudebestand unmittelbar mittels empirisch bestimmter Durchschnittskostensätzen für verschiedene Renovationsmassnahmen quantifiziert werden.

Um diese Kostenberechnungen zu unternehmen, werden die folgenden Daten verwendet:

- Renovationsquote an verkehrsbelasteten Standorten (ARE 2004b)
- Anteil verkehrsexponierter Fassadenfläche im Kanton Zürich (ARE 2004b)
- Durchschnittliche Kostensätze für Fassadenrenovationen (ARE 2004b)
- Gesamte Fassadenfläche inkl. Türen und Fenster im Kanton Zürich (Wüest&Partner)

##### **a) Renovationsquote an verkehrsbelasteten Standorten**

Die luftverschmutzungsbedingte Renovationstätigkeit wurde in ARE (2004b) durch eine Querschnittsanalyse ermittelt. Dabei wurden die in der Gebäudedatenbank von Wüest&Partner vorhandenen Angaben zu den Fassadenzuständen verwendet, um die Renovationsquoten in mit PM10-Immissionen belasteten und nicht belasteten Gebieten zu bestimmen. Die resultierende Renovationsquote ist an verkehrsbelasteten Standorten um 0,5 Prozentpunkte höher als an nicht verkehrsbelasteten Standorten (ARE 2004b, S. 44).

##### **b) Anteil verkehrsexponierter Fassadenflächen im Kanton Zürich**

Die Verbindung der Schweizer Arealstatistik mit einem differenzierten Immissionskataster für PM10 erlaubt eine Bestimmung des Anteils verkehrsexponierter Fassadenfläche für 8 Gemeindetypen der Schweiz (ARE 2004b, S. 54ff.). Die folgende Tabelle zeigt den Anteil verkehrsexponierter Flächen insgesamt:

Gemeindetyp	Verkehrsexponierte Flächen
Metropolen	31,2%
Agglomerationsgemeinden von Metropolen	17,1%
Kerngemeinden innerhalb von Metropolitanräumen	22,2%
Sonstige Agglomerationsgemeinden innerhalb von Metropolitanräumen	16,5%
Kerngemeinden	22,4%
Agglomerationsgemeinden ausserhalb von Metropolitanräumen	13,7%
Einzelstädte	22,1%
Ländliche Gemeinden	8,4%

*Tabelle 12 Verkehrsexponierte Fassadenfläche nach 8 Gemeindetypen (ARE 2004b, S. 57).*

### c) Durchschnittliche Kostensätze für Fassadenrenovierungen

In ARE (2004b, S. 62-63) werden verschiedene bauteilspezifische Kostensätze präsentiert, die schon in früheren Studien verwendet wurden und von Bauexperten immer noch als zutreffend beurteilt werden. Für die Berechnung der Renovationskosten wird ein Wert von 245 CHF/m<sup>2</sup> Fassadenfläche verwendet.

### d) Gesamte Fassadenfläche im Kanton Zürich

Die Fassadenflächen für den Kanton Zürich stammen aus der Gebäudedatenbank von Wüest&Partner (Stand 2004). Tabelle 13 zeigt die Fassadenfläche inklusive Fenster und Türen im Kanton ZH, unterteilt nach den 8 Gemeindetypen:

Gemeindetyp	Gesamte Fassadenfläche inklusive Fenster und Türen, Kanton Zürich, 2004 [m <sup>2</sup> ]
Metropolen	31'104'718
Agglomerationsgemeinden von Metropolen	53'362'550
Kerngemeinden innerhalb von Metropolitanräumen	9'427'671
Sonstige Agglomerationsgden. in Metropolitanräumen	7'046'233
Kerngemeinden	0
Agglomerationsgden. ausserhalb von Metropolitanräumen	0
Einzelstädte	0
Ländliche Gemeinden	61'158'079
<b>Total Kanton Zürich</b>	<b>107'100'079</b>

*Tabelle 13 Fassadenfläche im Kanton Zürich nach Gemeindetyp 2004 (Wüest&Partner)*

## e) Resultate

Mit den in den letzten Abschnitten beschriebenen Daten können die zusätzlichen Renovationskosten aufgrund verkürzter Renovationszyklen an verkehrsexponierten Standorten berechnet werden.

Berechnung der immissionsbedingten Renovationskosten 2000					
Gemeindetyp	Fassadenfläche [m <sup>2</sup> ]	Verkehrsexponierte Flächen [%]	Anteil verkehrsbedingte Renovationen [%]	Renovationskosten [CHF/m <sup>2</sup> ]	Kosten pro Jahr [Mio CHF/a]
Metropolen	31'104'718	31,2	0,5	245	11,89
Agglomerationsgden. von Metropolen	53'362'550	17,1	0,5	245	11,18
Kerngemeinden innerhalb Metropolitanräumen	9'427'671	22,2	0,5	245	2,56
Sonstige Agglomerationsgden. innerhalb von Metropolitanräumen	7'046'233	16,5	0,5	245	1,43
Kerngemeinden	0	22,4	0,5	245	0
Agglo-Gde. ausserhalb Metropolitanräumen	0	13,7	0,5	245	0
Einzelstädte	0	22,1	0,5	245	0
Ländliche Gemeinden	6'158'907	8,4	0,5	245	0,63
<b>Total</b>	<b>107'100'079</b>				<b>27,69</b>

*Tabelle 14 Berechnung zusätzlicher Renovationskosten aufgrund von immissionsbedingt verkürzten Renovationszyklen an verkehrsexponierten Standorten*

Die zusätzlichen Renovationskosten an verkehrsexponierten Standorten betragen **27,7 Mio. CHF pro Jahr**.

### 4.2.2 Immissionsbedingte Verkürzung der Lebensdauer der Gebäudehüllen abseits von Verkehrsachsen

Abseits von Verkehrsachsen treten ebenfalls Gebäudeschäden auf, die durch Luftschadstoffemissionen entstanden sind. Für die Quantifizierung dieser Schäden muss ein Zusammenhang zwischen durchschnittlicher Schadstoffbelastung und Zustand der Gebäudefassade hergestellt werden. Dieser Zusammenhang kann mittels einer Schätzgleichung modelliert werden, die den Zustand der Gebäudehülle in Abhängigkeit von der Luftschadstoffbelastung und dem Gebäude-

alter beschreibt (ARE 2004b, S. 39ff.). Ergebnis der Schätzgleichung ist der Zeitraum, in dem bei einer bestimmten PM10-Immissionssituation ein für eine Fassadenrenovation relevanter Fassadenzustand erreicht wird (Fassadenzustand 2,5 gemäss Wüest&Partner; ARE 2004b, S. 65; s. folgende Tabelle).

Gemeindetyp	Verkürzung der Lebensdauer der Fassaden aufgrund PM10-Immissionsbelastung			
	Durchschnittliche PM10-Immissionen pro Jahr [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ]	Zeitraum, bis ein renovationsbedürftiger Fassadenzustand erreicht wird [Jahre]	Durchschnittliche Lebenserwartung Fassaden [Jahre]	Verkürzung der Lebensdauer [Jahre]
Metropolen	22,0	31,7	45	13,3
Agglomerationen von Metropolen	18,6	37,5	45	7,5
Kerngemeinden innerhalb Metropolitanräumen	17,6	39,5	45	5,5
Sonstige Agglomerationsgden. in Metropolitanräumen	16,4	42,5	45	2,5
Kerngemeinden	14,2	49,2	45	-
Agglomeration ausserhalb Metropolitanräumen	12,4	56,2	45	-
Einzelstädte	7,2	96,1	45	-
Land	10,9	63,9	45	-

*Tabelle 15 Verkürzung der Lebensdauer der Fassaden in Abhängigkeit vom Gemeindetyp bzw. von der Immissionssituation (ARE 2004b, S. 65)*

Wie die Tabelle zeigt treten luftverschmutzungsbedingte Schäden an Fassaden hauptsächlich in den Städten und ihren Agglomerationen auf. Die dort zu beobachtende Verkürzung der Lebensdauer der Fassaden führt zu erhöhten Kapitalkosten (Zinskosten und Abschreibungen). Die jährlichen Kapitalkosten werden mit Hilfe der folgenden Gleichung für den Zustand im belasteten Gebiet sowie für den Referenzzustand ohne relevante Luftbelastung berechnet:

$$K = I \cdot (r / (1 - (1+r)^{-T}))$$

K: jährliche Kapitalkosten

I: Investition

r: realer Zinssatz (Annahme 2%)

T: Lebensdauer

Die folgende Tabelle zeigt die Resultate der Berechnungen für alle Standorte (verkehrsexponiert und nicht-verkehrsexponiert):

Fassadenbauart	Fassaden- fläche [m <sup>2</sup> ]	Kosten Bauteile [CHF/m <sup>2</sup> ]	Lebens- dauer normal [Jahre]	Lebens- dauer Belastung [Jahre]	Kosten Referenz [CHF]	Kosten Belastung [CHF]	Differenz [CHF]
<b>Metropolen</b>							
verputzt	16'884'190	92	45	31.7	52'673'349	66'637'883	13'964'534
roh	1'883'907	214	45	31.7	13'670'868	17'295'230	3'624'362
Glas/Metall	630'385	409	45	31.7	8'742'828	11'060'689	2'317'861
vorgehängt	3'975'073	224	45	31.7	30'193'673	38'198'491	8'004'818
Türen/Tore	838'709	409	45	31.7	11'632'082	14'715'929	3'083'848
Fenster	6'892'455	604	45	31.7	141'167'184	178'592'826	37'425'642
Total Metro	31'104'718				258'079'984	326'501'048	68'421'064
<b>Agglomeration von Metropolen</b>							
verputzt	24'401'595	92	45	37.5	76'125'281	85'664'674	9'539'392
roh	5'104'450	214	45	37.5	37'041'244	41'682'947	4'641'703
Glas/Metall	1'238'801	409	45	37.5	17'180'974	19'333'952	2'152'978
vorgehängt	9'251'728	224	45	37.5	70'273'851	79'079'990	8'806'139
Türen/Tore	1'536'263	409	45	37.5	21'306'486	23'976'439	2'669'953
Fenster	11'829'713	604	45	37.5	242'289'186	272'650'869	30'361'683
Total Agglo Metrop.	53'362'550				464'217'022	522'388'871	58'171'849
<b>Kerngemeinden in Metropolitanräumen</b>							
verputzt	4'637'127	92	45	39.5	14'466'373	15'724'777	1'258'405
roh	753'935	214	45	39.5	5'471'046	5'946'963	475'917
Glas/Metall	201'941	409	45	39.5	2'800'723	3'044'354	243'630
vorgehängt	1'513'802	224	45	39.5	11'498'468	12'498'699	1'000'232
Türen/Tore	266'315	409	45	39.5	3'693'530	4'014'823	321'294
Fenster	2'054'552	604	45	39.5	42'080'126	45'740'603	3'660'477
Total Kernge- meind.	9'427'671				80'010'267	86'970'220	6'959'953
<b>Sonstige Agglomeration</b>							
verputzt	3'348'087	92	45	42.5	10'444'975	10'827'145	382'170
roh	594'325	214	45	42.5	4'312'816	4'470'617	157'801
Glas/Metall	114'000	409	45	42.5	1'581'070	1'638'920	57'850
vorgehängt	1'322'317	224	45	42.5	10'043'995	10'411'493	367'498
Türen/Tore	216'377	409	45	42.5	3'000'945	3'110'746	109'801
Fenster	1'451'126	604	45	42.5	29'721'104	30'808'565	1'087'462
Total Sonst. Agglo.	7'046'233				59'104'904	61'267'486	2'162'582
<b>Gesamttotal</b>							0
verputzt	49'270'998	92	45		153'709'979	178'854'479	25'144'501
roh	8'336'617	214	45		60'495'974	69'395'757	8'899'783
Glas/Metall	2'185'127	409	45		30'305'596	35'077'915	4'772'319
vorgehängt	16'062'920	224	45		122'009'986	140'188'673	18'178'687
Türen/Tore	2'857'664	409	45		39'633'042	45'817'937	6'184'896
Fenster	22'227'847	604	45		455'257'601	527'792'863	72'535'263
<b>Gesamttotal</b>	<b>100'941'172</b>				<b>861'412'176</b>	<b>997'127'625</b>	<b>135'715'449</b>

Tabelle 16 Kapitalkosten aufgrund der Lebensdauerverkürzung der Gebäudehülle

Die luftschadstoffbedingte Verkürzung der Lebensdauer der Fassade im Kanton Zürich verursacht Kosten von 136 Mio. CHF pro Jahr.

Es ist zu beachten, dass die empirisch nachweisbare Lebensdauerverkürzung der Gebäudehülle auf der Basis von Jahresdurchschnittswerten der PM10-Immissionen abgeschätzt wurde. Diese Durchschnittsimmissionen repräsentieren allerdings nicht die Situation an stark verkehrsbelasteten Standorten (Hauptverkehrsachsen). Dort werden in der Regel deutlich höhere Immissionswerte gemessen. Die Kosten von luftverschmutzungsbedingten Gebäudeschäden an verkehrsexponierten Standorten werden in Kapitel 4.2.1 berechnet. Um den oben genannten Einwänden Rechnung zu tragen und eine Doppelzählung mit den Resultaten aus Kapitel 4.2.1 zu vermeiden, werden in diesem Kapitel die Kosten der Lebensdauerverkürzung nur für die Schäden an nicht verkehrsexponierten Standorten (s. Tabelle 12) berechnet (aus ARE 2004b, S. 58ff.).

Gemeindetyp	Kosten durch die Verkürzung der Lebensdauer der Gebäudehülle (Zunahme jährl. Kapitalkosten an nicht verkehrsexponierten Standorten)		
	Zusätzliche Kapitalkosten im Kanton Zürich [Mio. CHF/a]	Anteil nicht verkehrsexponierter Standorte [%]	Gesamtkosten an nicht verkehrsexponierten Standorten [Mio. CHF/a]
Metropolen	68,4	68,8	47,1
Agglomerationsgemeinden von Metropolen	58,2	82,9	48,2
Kerngemeinden	6,9	77,8	5,4
Sonstige Agglomerationsgemeinden	2,2	83,5	1,8
<b>Gesamttotal</b>	<b>135,7</b>		<b>102,5</b>

*Tabelle 17 Kosten durch die immissionsbedingte Verkürzung der Lebensdauer der Gebäudehülle an nicht verkehrsexponierten Standorten (Quellen: ARE 2004b, eigene Berechnungen)*

Die gesamten Gebäudeschäden durch die immissionsbedingte Verkürzung der Lebensdauer an nicht-verkehrsexponierten Standorten betragen daher **102,5 Mio. CHF pro Jahr**.

### 4.2.3 Synthese zusätzliche Renovationskosten durch Luftverschmutzung

Die folgende Tabelle zeigt die Resultate der Berechnungen für verkehrsexponierte und nicht-verkehrsexponierte Standorte.

Gemeindetyp	Immissionsbedingte Schadenskosten an der Gebäudehülle [in Mio. CHF/a]		
	Verkürzung der Renovationszyklen an verkehrsexponierten Standorten	Verkürzung der Lebensdauer an nicht-verkehrsexponierten Standorten	Zusätzliche Kapitalkosten Gebäudehülle total
Metropolen	11,9	47,1	59,0
Agglomeration Metropole	11,2	48,2	59,4
Kerngemeinde	2,6	5,4	8,0
Sonstige Agglomeration Metropolitanraum	1,4	1,8	3,2
Kerngemeinden	0	0	0
Sonstige Agglomeration ausserhalb Metropolraum	0	0	0
Einzelstädte	0	0	0
Land	0,6	0	0,6
<b>Total</b>	<b>27,7</b>	<b>102,5</b>	<b>130,2</b>

*Tabelle 18 Immissionsbedingte Schadenskosten infolge erhöhter Aufwendungen für Erneuerungen und Renovationen der Gebäudehülle im Kanton Zürich (Jahr 2000)*

Insgesamt resultieren jährliche Schadenskosten an Gebäuden in der Höhe von **130 Mio. CHF.** durch höhere Aufwendungen für die Fassadenerneuerung (Verkürzung Erneuerungszyklen und/oder höhere Kosten).

#### **4.2.4 Erhöhte Reinigungsaufwendungen an verkehrsbelasteten Standorten**

Zusätzlich zur Erhöhung der Renovationsfrequenz treten an Gebäuden verkehrsbedingte Verschmutzungen auf, die dazu führen, dass die Aussenfassaden häufiger gereinigt werden müssen. Dabei werden die Aufwendungen für die regelmässige Reinigung von Fenstern, Türen, Storen, Läden sowie Metall- und Glasfassaden berücksichtigt (verputzte Fassaden werden in der Regel nicht gereinigt sondern renoviert).

##### **a) Benötigte Daten**

In ARE (2004b) wurde der Einfluss der verkehrsbedingten Luftverschmutzung auf die Reinigungszyklen abgeschätzt. Zusätzlich wurden durch Befragungen bei

Reinigungsinstituten die durchschnittlichen Kosten für die Reinigung verschiedener Materialien ermittelt. Da bei Wohngebäuden nur wenig brauchbare Informationen vorliegen, konzentriert sich die Schätzung der zusätzlichen Reinigungskosten auf Geschäftsgebäude. Zusätzlich wird nur die Reinigung von Fenstern betrachtet, da diese bei Geschäftsgebäuden deutlich häufiger gereinigt werden als die restlichen Fassaden (ARE 2004b, S. 49).

Um die Kostenschätzung durchführen zu können, wird von folgenden Annahmen ausgegangen (ARE 2004b, S. 50):

- Gemäss Experten ist an verkehrsexponierten Standorten pro Jahr eine zusätzliche Reinigung von Glassfassaden und Fenstern aufgrund der Luftverschmutzung notwendig.
- Der durchschnittliche Kostensatz pro m<sup>2</sup> gereinigte Fläche von Fenstern und Glasfassaden beträgt 4,50 CHF.
- Es werden nur Geschäftsgebäude berücksichtigt und dort lediglich die Fenster sowie die Metall- und Glasfassaden (Angaben von Wüest&Partner).

## b) Ergebnisse

Die folgende Tabelle fasst die Resultate der Berechnungen zusammen:

Gemeindetyp	Zusätzliche Kosten Fenster- & Fassadenreinigung aufgrund von Luftverschmutzung					
	Glas/Metall [m <sup>2</sup> ]	Fenster [m <sup>2</sup> ]	Glasfläche total [m <sup>2</sup> ]	Verkehrsexponier- te Flächen [%]	Kostensatz [CHF/m <sup>2</sup> ]	Kosten pro Jahr [CHF/a]
Metropolen	630'385	143'546	773'931	31,2	4,50	1,09
Agglomerationen von Metropolen	1'238'801	3'486'653	4'725'454	17,1	4,50	3,64
Kerngemeinden innerhalb Metro- politanräumen	201'941	726'127	928'068	22,2	4,50	0,93
Sonstige Agglo innerhalb Metro- politanräumen	114'00	389'036	503'036	16,5	4,50	0,37
Kerngemeinden	0	0	0	22,4	4,50	0
Agglomeration ausserhalb Metro- politanräumen	0	0	0	13,7	4,50	0
Einzelstädte	0	0	0	22,1	4,50	0
Land	63'256	390'055	453'311	8,4	4,50	0,17
<b>Total</b>	<b>2'248'382</b>	<b>5'135'416</b>	<b>7'383'799</b>			<b>6,20</b>

*Tabelle 19 Jährliche Kosten der Fensterreinigung an Geschäfts- und Verwaltungsgebäuden (Jahr 2000)*

Die zusätzlichen Reinigungskosten aufgrund der Luftschadstoffbelastung betragen im Kanton Zürich **6,2 Mio. CHF pro Jahr**. Diese Ergebnisse stellen eine Untergrenze der zusätzlichen Reinigungskosten dar, da die Wohngebäude nicht berücksichtigt wurden und da davon ausgegangen wird, dass nur an verkehrsexponierten Standorten immissionsbedingte Verkürzungen von Reinigungszyklen auftreten.

#### 4.2.5 Gesamtkosten

Die gesamten Gebäudeschadenskosten der Luftverschmutzung im Kanton Zürich betragen **164 Mio. CHF pro Jahr**: 28 Mio. CHF (Renovationskosten an verkehrsexponierten Standorten) plus 130 Mio. CHF (Renovationskosten an nicht-verkehrsexponierten Standorten) plus 6 Mio. CHF (Reinigungskosten). Diese Kosten können als untere Grenze der tatsächlichen Gebäudeschadenskosten durch die Luftverschmutzung im Kanton Zürich betrachtet werden, da an verkehrsbelasteten Standorten nur verkehrsbedingte Schäden berücksichtigt werden und ausserdem bei den Reinigungskosten lediglich Geschäftsgebäude betrachtet werden.

Die folgende Tabelle zeigt die Aufteilung dieser Schadenskosten auf die einzelnen Verursacher von PM10-Emissionen. Der Strassenverkehr und die übrigen mobilen Quellen sind für knapp 70% der Gebäudeschadenskosten im Kanton Zürich verantwortlich. Die weiteren Verursacher sind die Abfallentsorgung, die Landwirtschaft, Feuerungen sowie gewerbliche und industrielle Prozesse.

Verursacherguppen	Emissionen [t <sub>PM10</sub> /a]	Anteil an PM10- Emissionen [%]	Kosten ver- kehrsexp. Standorte [Mio. CHF/a]	Kosten nicht- verkehrsexp. Standorte [Mio. CHF/a]	Total Gebäu- descha- denskosten [Mio. CHF/a]
Abfallentsorgung	227	12.2		15.9	15.9
Feuerungen	142	7.6		9.9	9.9
Industrielle und gewerbliche Prozesse	74	4.0		5.2	5.2
Landwirtschaft	263	14.1		18.3	18.3
Strassenverkehr	634	34.1	34 (28+6)	44.3	78.3
Übrige mobile Quellen	522	28.0		36.4	36.4
Verteilung von Brenn- und Treibstoffen	0	0		0	0
Verwendung Lösungsmittel	0	0		0	0
<b>Total</b>	<b>1'862</b>	<b>100</b>	<b>34</b>	<b>130</b>	<b>164</b>

Tabelle 20 Immissionsbedingte Gebäudeschadenskosten (Kt. ZH 2000)

## 5 Waldschäden

### 5.1 Vorgehen zur Schätzung der externen Kosten von Waldschäden im Kanton Zürich

Luftschadstoffemissionen haben unterschiedliche Folgen für den Wald, wie verändertes Wachstum von Stamm, Trieben und Wurzeln, gestörter Nährstoffhaushalt, verminderte Standfestigkeit der Bäume, Kronenverlichtungen etc. Für die Schäden verantwortlich sind die bodennahe Ozonbelastung verursacht durch NO<sub>x</sub>- und VOC-Emissionen im Sommer, sowie die Bodenversauerung durch SO<sub>2</sub>-NO<sub>2</sub>- und NH<sub>3</sub>- Depositionen und die Eutrophierung durch NH<sub>3</sub>- und NO<sub>x</sub>-Depositionen.

Die Berechnung der Kosten der Luftverschmutzung im Kanton Zürich wird im Bereich der Waldschäden auf Basis des Berichts "Externe Kosten des Strassen- und Schienenverkehrs 2000" (ARE 2005) durchgeführt. Die dort ermittelten externen Kosten werden nach Massgabe der Emissionsanteile den einzelnen Verursachern angelastet. Zu diesem Zweck müssen die Anteile der Verursacher an den Emissionen der einzelnen Schadstoffe bekannt sein. Im Bereich Waldschäden werden die externen Kosten anhand der Emissionen der folgenden Schadstoffe und Verursachergruppen abgeschätzt:

Verursachergruppen	Stickstoffoxide NO <sub>x</sub>		Ammoniak NH <sub>3</sub>		Schwefeldioxid SO <sub>2</sub>	
	[t/a]	[%]	[t/a]	[%]	[t/a]	[%]
Abfallentsorgung	421	3.0%	108	3.7%	210	8.9%
Feuerungen	2'348	17.0%			2'083	88.7%
Landwirtschaft	844	6.1%	2'619	90.5%	13	0.6%
Strassenverkehr	6'992	50.6%	166	5.7%	11	0.5%
Übrige mobile Quellen	3'223	23.3%			31	1.3%
<b>Total</b>	<b>13'828</b>	<b>100.0%</b>	<b>2'893</b>	<b>100.0%</b>	<b>2'348</b>	<b>100.0%</b>

Tabelle 21: Die Emissionen der für Waldschäden wichtigsten Luftschadstoffe im Kanton Zürich im Jahr 2005 nach Verursachergruppen (Quelle: AWEL Kanton Zürich).

Die Anteile der verschiedenen Verursachergruppen an den externen Waldschadenskosten werden gemäss ihrem Anteil an den jeweiligen NO<sub>x</sub>-Emissionen (für

Ozon) sowie ihren Anteilen an den  $\text{NO}_x$ -,  $\text{NH}_3$ - und  $\text{SO}_2$ -Emissionen (für Versauerung) bestimmt. Da mehrere Schadstoffe für die Schädigung verantwortlich sind, wird eine Gewichtung der Schadstoffe vorgenommen. Der Anteil der Stickstoffoxide an der Bodenversauerung beträgt schweizweit rund 28%, derjenige von Ammoniak 47% und derjenige von Schwefeldioxid 25% (BUWAL 2005, S. 51). Daraus lassen sich die Anteile der verschiedenen Verursachergruppen an der Bodenversauerung berechnen.

Da die Ursache-Wirkungsbeziehungen im Bereich der Waldschäden sehr unsicher sind, werden in einem ersten Schritt die gesamtschweizerischen Kostenschätzungen von (ARE 2005) auf den Kanton Zürich übertragen. Diese Übertragung wird pro Schadstoff durchgeführt nach Massgabe des Anteils der produktiven Waldfläche sowie der Holznutzung im Kanton Zürich an den gesamtschweizerischen Daten<sup>5</sup> (vgl. Tabelle 23). In einem zweiten Schritt werden diese Gesamtkosten pro Schadstoff nach Massgabe der Emissionsanteile im Kanton Zürich auf die Verursachergruppen im Kanton Zürich aufgeteilt.

## 5.2 Immissionsbedingte Waldschäden Schweiz

Detaillierte und quantifizierbare Zusammenhänge zwischen Immissionsbelastungen, Schadstofffrachten und Waldschäden sind heute erst teilweise bekannt. Aus diesem Grund sind verschiedene Experten überzeugt, dass eine fundierte Berechnung der Waldschadenskosten zum heutigen Zeitpunkt nicht möglich ist. In (ARE 2005) wird trotzdem eine grobe Abschätzung vorgenommen, die auf den einigermaßen gesicherten Schadenskosten für die Forstwirtschaft (vermindertes Holzwachstum, erhöhtes Windwurfisiko) sowie auf teilweise nicht definitiv erhärteten Dosis-Wirkungsbeziehungen beruht.

Die durch Schadstoffe verursachten Waldschäden generieren Kosten durch:

- sinkende Holzerträge (reduziertes Holzwachstum)
- Zusatzkosten bei Windwurf für die Räumung
- bei Windwurf Mindererträge bei der Holzverwertung
- erhöhte Aufwendungen für Forstschutz, Verjüngungs- und Waldpflege-massnahmen.

---

<sup>5</sup> Dieser Verteilschlüssel wurde vom BUWAL in Zusammenarbeit mit den Kantonen für das Produkt Waldwirtschaft im Rahmen der Umsetzung der Neuen Finanzausgleichsordnung entwickelt.

Auch Aufwendungen für zusätzliche Massnahmen zur Naturgefahrenprävention können möglicherweise stark erhöht sein, lassen sich jedoch zum heutigen Zeitpunkt nicht quantifizieren. Die Schadenskosten in den übrigen Bereichen - beispielsweise Einnahmenausfälle im Tourismus oder in der Berglandwirtschaft - sind nach den Ergebnissen der genannten Studie vernachlässigbar. Deshalb werden nur das verminderte Holzwachstum sowie das erhöhte Windwurfrisiko berücksichtigt.

Die gesamten externen Kosten der in (ARE 2005) ermittelten Waldschäden infolge Luftverschmutzung in der Schweiz betragen im Jahr 2000 196 Mio. CHF. Diese Kosten teilen sich wie folgt auf die einzelnen Schadstoffe bzw. Verursachergruppen auf:

	Anteile in %	Verkehr Mio. CHF/a	Andere anthro- pogene Quellen Mio. CHF/a	Total Mio. CHF/a
<b>Holzernteverluste durch Ozon, Anteil NO<sub>x</sub></b>	<b>100%</b>	<b>50.4</b>	<b>40.5</b>	<b>90.9</b>
<b>Holzernteverluste durch Bodenversauerung insgesamt</b>	<b>100%</b>	<b>15.1</b>	<b>64.5</b>	<b>79.6</b>
<i>Anteil Stickstoffoxide NO<sub>x</sub></i>	<i>28%</i>	<i>4.23</i>	<i>18.06</i>	<i>22.29</i>
<i>Anteil Ammoniak NH<sub>3</sub></i>	<i>47%</i>	<i>7.10</i>	<i>30.32</i>	<i>37.42</i>
<i>Anteil Schwefeldioxid SO<sub>2</sub></i>	<i>25%</i>	<i>3.78</i>	<i>16.13</i>	<i>19.91</i>
<b>Windwurfkosten durch Bodenversauerung insgesamt</b>	<b>100%</b>	<b>4.8</b>	<b>20.6</b>	<b>25.4</b>
<i>Anteil Stickstoffoxide NO<sub>x</sub></i>	<i>28%</i>	<i>1.34</i>	<i>5.77</i>	<i>7.11</i>
<i>Anteil Ammoniak NH<sub>3</sub></i>	<i>47%</i>	<i>2.26</i>	<i>9.68</i>	<i>11.94</i>
<i>Anteil Schwefeldioxid SO<sub>2</sub></i>	<i>25%</i>	<i>1.20</i>	<i>5.15</i>	<i>6.35</i>
<b>Total</b>		<b>70.4</b>	<b>125.6</b>	<b>196</b>

*Tabelle 22: Externe Kosten der Waldschäden im Jahr 2000 in Mio. CHF nach Verursachergruppen und Emissionen (ARE 2005 und BUWAL 2005).*

Diese Daten dienen als Basis für die Berechnungen der immissionsbedingten Waldschadenskosten im Kanton Zürich.

### 5.3 Waldschadenskosten im Kanton Zürich

Auf Basis der Resultate von (ARE 2005) wird der Anteil des Kantons Zürich an der gesamtschweizerischen Waldfläche aufgrund eines Verteilschlüssels mit den Kriterien Holznutzung<sup>6</sup> und produktive Waldfläche ermittelt. Der Anteil der Holznutzung wird doppelt gewichtet, da dieses Kriterium die tatsächliche Nutzung besser wiedergibt als das Kriterium der produktiven Waldfläche, das eher eine Aussage zum Nutzungspotenzial macht. Wie die folgende Tabelle zeigt, weist der Kanton Zürich mit dem gewählten Verteilschlüssel einen Anteil von 7.4% an den gesamtschweizerischen externen Kosten durch Waldschäden infolge Luftverschmutzung auf.

	Holznutzung		Produktive Waldfläche		Anteil (2xA+B)/3
	Φ 95-99	A	Φ 95-99	B	
	m3	%	ha	%	
<b>Schweiz</b>	4'525'847	100.00%	1'067'067	100%	<b>100%</b>
<b>Kt. Zürich</b>	396'028	8.8%	48'557	4.5%	<b>7.4%</b>

Tabelle 23: Verteilschlüssel zur Ermittlung des Anteils des Kantons Zürich an den gesamtschweizerischen externen Kosten durch von Waldschäden durch Luftverschmutzung (Schweizerische Forststatistik 1995 - 1999).

Dies ergibt für den Kanton Zürich folgende Anteile an den gesamtschweizerischen externen Kosten durch Waldschäden infolge der Luftverschmutzung:

	Kosten Schweiz [Mio. CHF/a]	Kosten Kt. ZH [Mio. CHF/a] (=7.4% Kosten Schweiz)
Anteil Stickstoffoxide NO <sub>x</sub>	120	8.9
Anteil Ammoniak NH <sub>3</sub>	49	3.6
Anteil Schwefeldioxid SO <sub>2</sub>	26	1.9
<b>Total</b>	<b>196</b>	<b>14.4</b>

Tabelle 24: Immissionsbedingte externe Waldschadenskosten im Jahr 2000 in der Schweiz und im Kanton Zürich (ARE/BUWAL 2005, Schweizerische Forststatistik 1995 - 1999).

<sup>6</sup> Basis 1995-99, d.h. Periode ohne übermässige Zwangsnutzung

Aufgrund dieser Resultate und der Tabelle aus Abschnitt 5.1 ergeben sich für die Verursachergruppen und die einzelnen Schadstoffe im Kanton Zürich folgende externe Kosten:

Emissionsanteile im Kanton Zürich in %						
	Abfallent- sorgung	Feue- rungen	Landwirt- schaft	Strassen- verkehr	Übrige mo- bile Quellen	Total
<b>Anteil NO<sub>x</sub></b>	3.0%	17.0%	6.1%	50.6%	23.3%	100.0%
<b>Anteil NH<sub>3</sub></b>	3.7%	0.0%	90.5%	5.7%	0.0%	100.0%
<b>Anteil SO<sub>2</sub></b>	8.9%	88.7%	0.6%	0.5%	1.3%	100.0%

Anteile an Waldschadenskosten im Kt. ZH in 1'000 CHF/a (gerundet)						
	Abfallent- sorgung	Feuerun- gen	Landwirt- schaft	Strassen- verkehr	Übrige mobi- le Quellen	Total
<b>Anteil NO<sub>x</sub></b>	270	1'505	541	4'483	2'066	8'865
<b>Anteil NH<sub>3</sub></b>	136		3'293	209	-	3'638
<b>Anteil SO<sub>2</sub></b>	173	1'717	11	9	25	1'935
<b>Total</b>	<b>579</b>	<b>3'222</b>	<b>3'845</b>	<b>4'701</b>	<b>2'091</b>	<b>14'438</b>

*Tabelle 25: Zuteilung der externen Waldschadenskosten im Kanton Zürich im Jahr 2005 auf die Verursachergruppen und auf die Schadstoffe (AWEL Kanton Zürich, ARE 2005)*

Diese Grobschätzung zeigt, dass die bedeutendsten externen Kosten von Waldschäden infolge Luftverschmutzung durch den Strassenverkehr (4.7 Mio. CHF/a), die Feuerungen (3.2 Mio. CHF/a) und die Landwirtschaft (3.8 Mio. CHF/a) verursacht werden. Übrige mobile Quellen wie z.B. Baumaschinen sind mit einem Anteil von rund 2.1 Mio. CHF/a ebenfalls bedeutende Verursacher von externen Kosten im Waldbereich. Die Abfallentsorgung verursacht mit gut 0.6 Mio. CHF/a am wenigsten externe Kosten durch Waldschäden.

## 5.4 Durchschnittliche Emissionszuschläge

Auf der Basis der durchgeführten Berechnungen zu den Waldschadenskosten im Kanton Zürich und den Emissionsmengen der einzelnen Schadstoffe im Kanton Zürich lassen sich die folgenden durchschnittlichen Emissionszuschläge für die Waldschadenskosten berechnen:

Schadstoff	Emissionen t/a	Anteilmässige Kos- ten in Mio. CHF/a	Emissionszuschlag CHF/kg
Anteil NO <sub>x</sub>	13'828	8.9	0.65/kg
Anteil NH <sub>3</sub>	2'893	3.6	1.20/kg
Anteil SO <sub>2</sub>	2'348	1.9	0.80/kg

*Tabelle 26: Durchschnittliche Emissionszuschläge für die Waldschadenskosten im Kanton Zürich pro kg NO<sub>x</sub>, NH<sub>3</sub> und SO<sub>2</sub>.*

## 6 Ernteauffälle

### 6.1 Vorgehen zur Schätzung der externen Kosten von Ernteauffällen im Kanton Zürich

Luftschadstoffe haben diverse negative Auswirkungen auf Nutzpflanzen, wobei die Schädigungen durch bodennahes Ozon (O<sub>3</sub>) besonders ausgeprägt und gut untersucht sind.<sup>7</sup> Die beiden Vorläufersubstanzen von Ozon sind NO<sub>x</sub> und VOC. Für Ernteverluste in ländlichen Gebieten sind die Stickstoffoxide (NO<sub>x</sub>) die hauptverantwortliche Substanz für die Ozonbildung (vgl. ARE 2005, S. 65). Die Auswirkungen der Ozondosis auf den Ernteertrag sind für verschiedene Nutzpflanzenarten (Weizen, Gerste, Hafer, Roggen, Körnermais, Zuckerrüben, Kartoffeln, Raps, Sonnenblumen, Trauben/Reben, Karotten, Tomaten, Gemüse und Früchte) bekannt. Die aktuellste Bewertung der Ernteauffälle aufgrund der Luftverschmutzung wird in (ARE 2005) verwendet. Die Ernteverluste durch Ozon betragen nach den Berechnungen dieser Studie im Jahr 2000 für die gesamte Schweiz 134 Mio. CHF.

Die Berechnung der externen Kosten durch Ernteauffälle im Kanton Zürich erfolgt auf Basis der durchschnittlichen Ozonimmissionswerte im Kanton Zürich in ländlichen, eher tieferen Lagen. Um die Variation der Ozonimmissionen zu berücksichtigen, wird ein Durchschnittswert über mehrere Jahre verwendet (2000 bis 2005). Es wird von drei verfügbaren Messstationen (Stadt Zürich, Bachtel, Wallisellen) die Messstation Wallisellen gewählt, weil diese den oben stehenden Kriterien am nächsten kommt. Die folgende Tabelle zeigt die Messresultate der Station Wallisellen von 2000-2005:

Ozonimmissionen Kanton Zürich	2000	2001	2002	2003	2004	2005	Ø
AOT40 forest (ppb*h) <sup>8</sup>	13'747	10'056	16'695	27'772	16'708	14'717	16'616
Jahresmittel (ppb)	40	43	44	52	47	46	45

Tabelle 27 Ozonimmissionen im Kanton Zürich 2000-2005 (Messstation Wallisellen, Quelle AWEL Kanton Zürich)

<sup>7</sup> Die Auswirkungen von Luftschadstoffen auf Nutzpflanzen bzw. deren unterschiedliche Reaktion auf Schadstoffe wurden ausführlich bereits 1996 im Schlussbericht von **e c o n c e p t** zur Berechnung der externen Kosten der Luftverschmutzung im Kanton Zürich beschrieben.

<sup>8</sup> AOT = accumulated exposure over threshold, der AOT40 ist ein Index, der die Summe aller 1-Stunden-Ozonkonzentrationen über 40 ppb während einer gewissen Periode darstellt (Masseneinheit ist ppb\*h oder ppm\*h. ppb=parts per billion (Teile pro Milliarde), ppm = parts per million).

Mithilfe von Dosis-Wirkungsbeziehungen werden die relativen Ernteauffälle im Kanton Zürich pro Hektare (in %) für verschiedene Nutzpflanzen bestimmt. Grundlage für diese Berechnungen sind die Werte für Dosis-Wirkungsbeziehungen für Nutzpflanzen der Studie (ARE/BUWAL 2005). Die Grundformel für den Zusammenhang zwischen dem Ernteertrag von Nutzpflanzen und der Ozonkonzentration lautet dabei für alle Pflanzen gleich:

**Relativer Ernteertrag in % = 100 + m \* AOT40 (in ppm\*h).**

(m = prozentuale Reduktion des Ernteertrags pro zusätzlicher ppm\*h Ozonbelastung)

Mit dieser Formel und den Ozonimmissionsdaten des Kantons Zürich wird berechnet, um wie viel Prozent der Ernteertrag im Vergleich zu einem unbelasteten Standort sinkt. Da die Ernteerträge nur auf gesamtschweizerischer Ebene vorliegen, werden die Ernteerträge für den Kanton Zürich mittels des Anteils der Anbauflächen des Kantons pro Nutzpflanzenart sowie den durchschnittlichen Erträgen der Pflanzen geschätzt. Auf Basis der durchschnittlichen Produzentenpreise für das Jahr 2000 werden die absoluten Ernteauffälle in CHF berechnet.

Die resultierenden Schadenskosten werden mithilfe der jeweiligen Anteile an den NO<sub>x</sub>-Emissionen (als eine Vorläufersubstanz für die Ozonbildung) auf die verschiedenen Verursacher (Verkehr Strasse/Schiene bzw. Personen/Güter, Industrie, Haushalte, Landwirtschaft) aufgeteilt. Es werden wiederum die bereits für die übrigen Berechnungen verwendeten Daten benützt. Die untenstehende Tabelle zeigt die Aufteilung der NO<sub>x</sub>-Emissionen im Kanton Zürich auf die einzelnen Verursacherguppen:

Verursacherguppen	NO <sub>x</sub> - Emissionen Kt. ZH	
	t/a	%
Abfallentsorgung	421	3.0%
Feuerungen	2'348	17.0%
Landwirtschaft	844	6.1%
Strassenverkehr	6'992	50.6%
Übrige mobile Quellen	3'223	23.3%
Total	13'828	100.0%

*Tabelle 28: Die Emissionen der wichtigsten Luftschadstoffe im Kanton Zürich im Jahr 2005 nach Verursacherguppen (AWEL Kanton Zürich).*

Die durch Ernteverluste resultierenden externen Kosten der Luftverschmutzung im Kanton Zürich werden pro Kilogramm NO<sub>x</sub> berechnet.

## 6.2 Berechnung der relativen Ernteauffälle

Auf Basis des Durchschnittswerts der Ozonimmissionen im Kanton Zürich der letzten 5 Jahre (16.6 ppm\*h) wird berechnet, um wie viel Prozent der Ernteertrag im Vergleich zu einem unbelasteten Standort sinkt. In die Formel zur Berechnung des relativen Ernteertrags werden die in der Studie (ARE/BUWAL 2005) verwendeten Werte für die Dosis-Wirkungs-Beziehungen bei einzelnen Pflanzen eingesetzt. Diese anerkannten Werte wurden in einer Forschungsarbeit der UNECE mittels Begasungsversuchen ermittelt (Holland 2002). Die folgende Tabelle zeigt, um wie viel % der Ernteertrag pro zusätzlicher ppm\*h Ozonbelastung sinkt:

Nutzpflanzenart	Reduktion des Ernteertrags pro zusätzliche ppm*h (Steigung m)	Relativer Ernteertrag im Kanton ZH aufgrund Ozonimmissionen der letzten 5 Jahre, [in %]
	[in %]	
Weizen	-1.1	82
Körnermais	-0.36	94
Zuckerrüben	-0.58	90
Kartoffeln	-0.56	91
Raps	-0.55	91
Sonnenblumen	-1.2	80
Trauben	-0.3	95
Gemüse <sup>9</sup>	-0.95	84

Tabelle 29: Relativer Ernteertrag der häufigsten Nutzpflanzen im Kt. Zürich im Vergleich zu nicht durch Ozon belasteten Standorten (Quelle: ARE 2005)

## 6.3 Berechnung der absoluten Ernteauffälle

Da die Ernteerträge (in Tonnen) nur auf gesamtschweizerischer Ebene vorliegen, werden die Ernteerträge für den Kanton Zürich mittels des kantonalen Anteils an den schweizerischen Anbauflächen pro Nutzpflanzenart geschätzt. Die nationalen Ernteerträge werden multipliziert mit dem %-Anteil der Anbaufläche im Kan-

<sup>9</sup> (ARE/BUWAL 2005) unterscheidet Karotten, Tomaten und übriges Frischgemüse. In den vorliegenden Berechnungen werden diese Kategorien unter der Bezeichnung "Gemüse" zusammengefasst.

ton Zürich an der gesamtschweizerischen Anbaufläche. Dadurch ergeben sich folgende Ernteerträge in Tonnen für den Kanton Zürich:

Kultur	Fläche			Ernteerträge	
	CH in ha	ZH in ha	ZH in % CH	CH in t	ZH in t/a
Weizen	84'428	8'794	10%	561'164	56'116
Körnermais	21'099	2'667	13%	212'391	27'611
Zuckerrüben	17'539	2'678	15%	1'408'448	211'267
Kartoffeln	13'578	1'061	8%	600'600	48'048
Raps	14'875	1'806	12%	39'060	4'687
Sonnenblumen	5'446	713	13%	11'666	1'517
Trauben	13'079	567	4%	166'825	6'673
Gemüse <sup>10</sup>	8'590	1'505	18%	151'940	27'349

Tabelle 30: Anbauflächen (2003) und Ernteerträge (2000) in der Schweiz und im Kanton Zürich (Quellen: BFS 2005, Schweizerischer Bauernverband SBV: diverse Statistiken Internet, ARE 2005).

Die folgende Tabelle zeigt die absoluten Ernteaussfälle in CHF, die auf der Basis der durchschnittlichen Produzentenpreise für das Jahr 2000 berechnet werden.

Kultur	Ernteerträge Kt. ZH [t/a]	Relativer Ernteaussfall Kt. ZH [%]	Ernteaussfall Kt. ZH [t/a]	Produzen- tenpreis [CHF/100kg]	Ernteaussfall Kt. ZH in [Mio. CHF/a]
Weizen	56'116	18	12'551	66.35	8.33
Körnermais	27'611	6	1'757	47.65	0.84
Zuckerrüben	211'267	10	22'532	11.58	2.61
Kartoffeln	48'048	9	4'930	36.12	1.78
Raps	4'687	9	471	68.92	0.32
Sonnenblumen	1'517	20	378	62.98	0.24
Trauben	6'673	5	350	250	0.88
Gemüse	27'349	16	5'126	200	10.25
<b>Total</b>	<b>383'268</b>		<b>48'094</b>		<b>25.2</b>

Tabelle 31: Ernteaussfälle durch erhöhte Ozonimmissionen im Kanton Zürich in Tonnen und CHF (Quellen: ARE 2005, BFS 2005)

<sup>10</sup> (ARE 2005) unterscheidet Karotten, Tomaten und übriges Frischgemüse. In den vorliegenden Berechnungen werden diese Kategorien zusammengefasst behandelt unter der Bezeichnung "Gemüse".

In den verwendeten Produzentenpreisen sind auch die staatlichen Subventionen und Direktzahlungen an die Landwirtschaft enthalten. Zur Berechnung der volkswirtschaftlichen Kosten werden diese staatlichen Beiträge abgezogen. Der PSE (Producer Support Estimate) der OECD ist ein Index, der den Anteil der staatlichen Unterstützung an die landwirtschaftliche Produktion der verschiedenen OECD-Länder wiedergibt. Für das Jahr 2004 wurde für die Schweiz ein PSE in Höhe von 68% geschätzt (OECD 2005). Unter Berücksichtigung des PSE betragen die landwirtschaftlichen Produktionsverluste durch erhöhte Ozonimmissionen rund 8 Mio. CHF jährlich.

Aufgrund dieser Berechnungen ergeben sich aufgeteilt auf die Verursachergruppen im Kanton Zürich folgende externe Kosten durch Ernteverluste:

	Verursachergruppen					Total
	Abfallent- sorgung	Feuerun- gen	Landwirt- schaft	Strassen- verkehr	Übrige mobile Quellen	
Anteil NO <sub>x</sub> in %	3.0%	17.0%	6.1%	50.6%	23.3%	100.0%
Schadenskosten inkl. Subventionen in 1'000 CHF	757	4'292	1'540	12'774	5'881	25'244
Volkswirtsch. Kos- ten (ohne Subventi- onen) in 1'000 CHF	241	1'370	492	4'080	1'878	8'061

Tabelle 32: Ernteauffälle aufgrund erhöhter Ozonimmissionen im Kanton Zürich in % und 1'000 CHF aufgeteilt nach Verursachergruppen für das Jahr 2005.

## 6.4 Durchschnittliche Emissionszuschläge

Auf der Basis der durchgeführten Berechnungen zu den Ernteverlusten im Kanton Zürich lassen sich die folgenden durchschnittlichen Emissionszuschläge für die Berücksichtigung der Ernteverluste berechnen:

Schadstoff	Emissi- onen t/a	Inkl. Subventionen		Volkswirtschaftliche Kosten	
		Ernteauffälle Kt. ZH Mio. CHF/a	Emissions- zuschlag CHF/kg	Ernteauffälle Kt. ZH Mio. CHF/a	Emissionszu- schlag CHF/kg
NO <sub>x</sub>	13'828	25.2	1.8	8	0.58

Tabelle 33: Durchschnittlicher Emissionszuschlag für die Ernteverluste im Kanton Zürich pro kg NO<sub>x</sub>



## 7 Biodiversitätsschäden durch Luftverschmutzung

### 7.1 Vorgehen

Die Luftschadstoffe  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$  und  $\text{NH}_3$  können zu Versauerung und Überdüngung von Böden und Gewässern führen und somit die Artenvielfalt reduzieren.

Für die Schweiz liegen bisher keine Studien vor, die die Biodiversitätsverluste aufgrund der Luftverschmutzung bewerten. Auch auf internationaler Ebene existieren bislang keine Studien für spezifische Länder, auf die zurückgegriffen werden könnte. Auf europäischer Ebene liegen momentan (Juli 2006) provisorische Ergebnisse aus dem EU-Forschungsprojekt NEEDS vor, welches sich unter anderem mit der Bewertung von externen Kosten in bisher vernachlässigten Bereichen wie Biodiversität beschäftigt.

**e c o n c e p t** hat im Rahmen von NEEDS einen Ansatz zur Bewertung von Biodiversitätsverlusten aufgrund von Luftschadstoffdepositionen entwickelt, der hier für den Kanton Zürich angewendet wird. Mit den für die Schweiz im Rahmen von NEEDS berechneten externen Kosten für Biodiversitätsverluste durch Luftschadstoffdepositionen (in CHF pro kg Deposition) werden die Kosten des Verlustes von Artenvielfalt im Kanton Zürich berechnet.

### 7.2 Berechnung der Schadenskosten

Die folgenden Ausführungen beziehen sich auf den noch unveröffentlichten Schlussbericht, der von **e c o n c e p t** im Rahmen des NEEDS-Projektes verfasst wurde (Ott, Baur et al. 2006). Es handelt sich dabei um eine Zusammenfassung der wichtigsten Punkte. Das detaillierte Vorgehen ist in Ott, Baur et al. (2006) zu finden.

#### 7.2.1 Schadensmodell - Dosis-/Wirkungsbeziehung zwischen Schadstoffdepositionen und Biodiversitätsveränderungen

Als Grundlage für die Berechnungen verwenden wir ein holländisches Schadensmodell, welches für marginale Depositionsveränderungen von  $\text{SO}_x$ ,  $\text{NO}_x$  und  $\text{NH}_3$  in Böden die resultierende Veränderung der Artenvielfalt ermittelt (Eco-indicator 1999 und Ott, Baur et al. 2006).

Die Veränderung der Artenvielfalt wird mit einem Indikator, der so genannten PDF (potentially disappeared fraction), ausgedrückt. Dieser Indikator zeigt, wie viel der ursprünglich in einem Habitattyp vorkommenden typischen Arten<sup>11</sup> durch die Deposition von Luftschadstoffen höchstwahrscheinlich verschwinden.

Die folgenden Tabelle zeigt das Dosis-Wirkungsmodell für die Niederlande:

Emission	Depositionszunahme (kg/(m <sup>2</sup> * Jahr) auf natürlichem Boden	Durchschnittliche PDF für NL mit/ohne Depositionszunahme	Schaden pro kg Deposition (PDF*m <sup>2</sup> *Jahr/ kg)
Referenzwert	ohne	0.746429 (a) ohne zus. Deposition	--
SO <sub>x</sub>	0.000064	0.74654 (b)	1.73
NO <sub>x</sub>	0.000046	0.746867 (c)	9.52
NH <sub>3</sub>	0.000017	0.74687 (d)	25.94

*Tabelle 34 Verwendetes Dosis-Wirkungsmodell (Eco-indicator 1999)*

Der Referenzwert gibt den Biodiversitätsschaden mit den aktuellen Luftschadstoffemissionen und allen anderen Umwelteinflüssen an. Ein PDF von 0,746429 bedeutet, dass bereits 74,6% der Arten in den NL verschwunden sind.

Das vorliegende Schadensmodell ist dann in der Lage, für kleine Depositionsänderungen die zugehörigen Biodiversitätsschäden zu berechnen. Eine Erhöhung der Deposition von SO<sub>x</sub> um 0,000064 kg/m<sup>2</sup> /Jahr führt beispielsweise zu einem Biodiversitätsschaden von 0,000111 PDF. Der resultierende Schaden pro kg Deposition von SO<sub>x</sub> pro m<sup>2</sup> beträgt 1,73 PDF.

## 7.2.2 Monetarisierung dieser Biodiversitätsveränderungen

Um den "Wert" eines PDF zu bestimmen, wird der Wiederherstellungskostenansatz verwendet. Dabei werden die Wiederherstellungskosten für bestimmte Habitattypen mit grosser Artenvielfalt berechnet. Aus verschiedenen deutschen Studien liegen die Wiederherstellungskosten für verschiedene Habitattypen vor. Die zu diesen Habitattypen und entsprechenden Habitatveränderungen gehörenden PDF-Werte sind bekannt (Koellner 2001). Somit können die Kosten pro PDF berechnet werden.

<sup>11</sup> Konzept der target species: Für jeweiligen Habitattyp charakteristische vaskuläre Pflanzen.

**Beispiel:** Eine gewisse Landnutzungsänderung, z.B. eine Umwandlung von konventioneller Landwirtschaft in Biolandwirtschaft führt zu einer Erhöhung der Artenvielfalt. Die Veränderung der Artenvielfalt für diese Landnutzungsänderung ist bekannt und beträgt 0,47 PDF, d.h. die Artenvielfalt steigt um 47%.

Würde man theoretisch versuchen, aus einer konventionellen Landwirtschaftsfläche eine Biolandwirtschaftsfläche herzustellen, müssen gewisse Massnahmen vorgenommen werden. Die Kosten dieser Massnahmen sind bekannt, sie betragen 0,46 €/m<sup>2</sup> (Bosch & Partner 1993 und 1998, Ott, Baur et al. 2006).

Die Division von 0,46 €/m<sup>2</sup> durch 0,47 PDF führt zu Kosten von 0,98 €/PDF/m<sup>2</sup>, d.h. die Kosten des Biodiversitätsverlusten infolge einer Umwandlung von Biolandwirtschaft in konventionelle Landwirtschaft betragen 0,98 € pro PDF und m<sup>2</sup>.

Die Kosten werden nur für "spürbare" Biodiversitätsverbesserungen berücksichtigt, d.h. wir betrachten nur Biodiversitätsverbesserungen von mindestens 20%, da wir davon ausgehen, dass für kleinere Verbesserungen der Artenvielfalt keine Zahlungsbereitschaft existiert, da diese nicht wahrgenommen werden.

Die folgende Tabelle zeigt die Kosten pro PDF für Deutschland 2004 für Landnutzungsänderungen, die die Biodiversität um mindestens 20% verbessern (Ott, Baur et al. 2006):

Landnutzungsänderung	Kosten pro PDF (€/m <sup>2</sup> *PDF) (ΔPDF > 20%)
Normale Landwirtschaft --> Biolandwirtschaft	0.98
Normale Landwirtschaft --> Bioplantagen	11.12
Normale Landwirtschaft --> Intensive Weiden	1.94
Normale Landwirtschaft --> Weniger intensive Weiden	2.99
Normale Landwirtschaft --> Bioweiden	1.95
Normale Landwirtschaft --> Laubwald	7.30
Normale Landwirtschaft --> Waldrand	8.08
Integrierte Landwirtschaft --> Biolandwirtschaft	0.49
Integrierte Landwirtschaft --> Bioplantagen	8.95
Integrierte Landwirtschaft --> Intensive Weiden	1.29
Integrierte Landwirtschaft --> Weniger intensive Weiden	1.00
Integrierte Landwirtschaft --> Bioweiden	0.72
Integrierte Landwirtschaft --> Laubwald	5.87
Integrierte Landwirtschaft --> Waldrand	7.45
Biolandwirtschaft --> Bioweiden	0.63

Landnutzungsänderung	Kosten pro PDF (€/m <sup>2</sup> *PDF) (ΔPDF > 20%)
Biolandwirtschaft --> Waldrand	13.82
Bioplantagen --> Waldrand	12.46
Intensive Weiden --> Biolandwirtschaft	1.65
Intensive Weiden --> Bioweiden	2.44
Intensive Weiden --> Waldrand	9.74
Weniger intensive Weiden --> Bioweiden	1.62
Weniger intensive Weiden --> Waldrand	10.70

*Tabelle 35 Kosten pro PDF für verschiedene Landnutzungsänderungen (Quelle: Ott, Baur et al. 2006)*

Für die Monetarisierung der Schäden von Luftschadstoffen werden diejenigen Landnutzungsänderungen mit den geringsten Kosten für die "Produktion" von Biodiversität bzw. von ΔPDF verwendet (Minimalkostenansatz). Dabei handelt es sich um den Übergang von integrierter Landwirtschaft in Biolandwirtschaft mit Kosten von 0,49 €/PDF/m<sup>2</sup>.

### 7.2.3 Ergebnisse für die Schweiz

Mit den deutschen Wiederherstellungskosten von 0,49 €/PDF/m<sup>2</sup> und dem holländischen Schadensmodell werden die externen Kosten von Biodiversitätsverlusten durch die Luftverschmutzung für die Schweiz berechnet.

Die deutschen Wiederherstellungskosten werden mittels PPS (Purchasing Power Standard) in CHF umgerechnet. Als Schadensmodell wird das holländische Modell verwendet, dieses wird aber an die Umweltsituation der Schweiz angepasst, indem die Dosis-Wirkungsbeziehungen zwischen Depositionsveränderungen und Biodiversitätsveränderungen mittels eines Indikators, der den aktuellen Zustand der Versauerung und Überdüngung in der Schweiz abbildet, gewichtet wird.

Dabei handelt es sich um den Acidification/Eutrophication Pressure Index, der von ten Brink (2001) im Rahmen der UNECE konstruiert wurde. Dieser Index beschreibt, wie stark ein Land bereits durch Versauerung und Überdüngung beeinflusst ist. Der Index umfasst eine Skala von 0 (Schwefel- und Nitratdepositionen sind unter dem critical load) bis 1000 (Schwefel- und Nitratdepositionen übersteigen den critical load um das 5-fache). Der Index beträgt für die Schweiz 608 für Versauerung und 731 für Überdüngung. Die Dosis-Wirkungsbeziehung

zwischen Depositionsänderung und Biodiversitätsänderung wird nun mittels dieses Index gewichtet. Die Grundidee dahinter ist, dass die Kosten zusätzlicher Luftverschmutzung von der aktuellen Umweltsituation abhängen. Die resultierenden Schadenskosten sind umso höher, je schlechter die aktuelle Umweltsituation ist, da zusätzliche Depositionen zu umso stärkeren Schäden führen, je mehr die Pufferkapazität der Böden bereits erschöpft ist. Um diese Überlegungen bei den Berechnungen zu berücksichtigen, wird die Dosis-Wirkungsbeziehung aus dem holländischen Modell mit den schweizerischen Index gewichtet. Der Index für die Niederlande wird dabei auf 1 festgesetzt, der entsprechende Index für die Schweiz beträgt dann 0,613 für Versauerung und 0,741 für Überdüngung.

Die Berechnung für die Schweizer Schadenskosten wird im Folgenden anhand der Berechnung für SO<sub>x</sub>-Depositionen beispielhaft dargestellt:

Gemäss Tabelle 34 beträgt der Biodiversitätsschaden von 1 kg SO<sub>x</sub>-Deposition 1,73 PDF\*m<sup>2</sup>. Dieser Schaden wird mit den minimalen Wiederherstellungskosten pro PDF von 0,96 CHF/PDF\*m<sup>2</sup> (mittels Purchasing Power Standard auf die Schweiz übertragene Wiederherstellungskosten von 0,49 €/PDF\*m<sup>2</sup> für Deutschland und Wechselkurs von 1,55 CHF/€) multipliziert. Unter Verwendung des Anteils von 68% an natürlicher Fläche in der Schweiz (CORINE, Depositionen von SO<sub>x</sub> richten nur auf natürlicher Fläche Biodiversitätsschäden an), sowie gewichtet mit dem Versauerungsindex von 0,613 resultiert die folgende Gleichung:

Externe Kosten von 1 kg SO<sub>x</sub>-Deposition = 1,73 PDF\*m<sup>2</sup> /kg<sub>Deposition</sub> \* 0,96 CHF/PDF\*m<sup>2</sup> \* 0,68 \* 0,613 = **0,71 CHF/kg**

Die Berechnung für NO<sub>x</sub> und NH<sub>3</sub> geschieht analog, die Resultate für NO<sub>x</sub> betragen **4,32 CHF/kg**, für NH<sub>3</sub> **12,91 CHF/kg**.

### 7.3 Berechnung der Schadenskosten für den Kanton Zürich

Für den Kanton Zürich müssen diese Ergebnisse an die natürliche Fläche im Kanton angepasst werden, da Schadstoffdepositionen auf überbauten Flächen und Flächen mit geringer Biodiversität zu keinen Biodiversitätsverlusten führen. Der Kanton Zürich weist weniger natürliche Fläche auf als die übrige Schweiz (68%). Gemäss statistischem Amt des Kantons Zürich beträgt der Anteil natürliche Fläche im Kanton Zürich (Gesamtfläche ohne Siedlungen und Landwirtschaft) 36,5%, die natürliche Fläche im Kanton Zürich beträgt also nur 53,7% des schweizerischen Durchschnitts. Eine Verwendung der schweizerischen Kosten

würde also die externen Kosten von Biodiversitätsschäden im Kanton Zürich überschätzen. Daher werden die schweizerischen Kosten mit 0,537 multipliziert und entsprechen den resultierenden Kosten bei einem Anteil natürlicher Fläche von 36,5%.

Die folgende Tabelle zeigt die resultierenden externen Kosten von Biodiversitätsverlusten pro kg Deposition des entsprechenden Schadstoffs für die Schweiz 2004:

Externe Kosten von Biodiversitätsverlusten	Kosten Schweiz CHF/kg	Kosten Kanton Zürich CHF/kg
SO <sub>x</sub>	0.71	<b>0.38</b>
NO <sub>x</sub>	4.32	<b>2.32</b>
NH <sub>3</sub>	12.91	<b>6.92</b>

*Tabelle 36 Minimale externe Kosten von Biodiversitätsverlusten für einzelne Luftschadstoffe (Quelle: Ott, Baur et al. 2006, eigene Berechnungen mit Wechselkurs von 1€ = 1,55 CHF)*

Diese Kostensätze müssten nun mit den Depositionsmengen der 3 Schadstoffe im Kanton Zürich multipliziert werden. Da die entsprechenden Depositionsmengen für den Kanton Zürich nicht vorliegen, werden die Kosten im Kanton Zürich mit gesamtschweizerischen Depositionsdaten abgeschätzt.

Gemäss BUWAL (2005, S. 51) betragen die SO<sub>x</sub>-Depositionen in der Schweiz pro Jahr 29'800 Tonnen, die Depositionen von NO<sub>2</sub> betragen 29'100 Tonnen und die Depositionen von NH<sub>3</sub> 48'300 Tonnen. Diese Depositionen können nun mit den gesamtschweizerischen Emissionen der 3 Schadstoffe verglichen werden, um zu bestimmen, welcher Anteil der drei emittierten Schadstoffe jeweils wieder innerhalb der Schweiz deponiert wird.

Aufgrund schweizerischen Emissions- und Depositionsdaten zeigt sich, dass bei SO<sub>x</sub> ein Import von Schadstoffen in die Schweiz erfolgen muss, während bei den NO<sub>x</sub> ein Export erfolgt und bei den NH<sub>3</sub> die Bilanz nahezu ausgeglichen ist (siehe Tabelle 37). Etwas vereinfachend gehen wir davon aus, dass die Zürcher Emissionen im Kanton Zürich wirksam werden (damit wird der Export von NO<sub>x</sub> vernachlässigt bzw. die Wirkung der exportierten NO<sub>x</sub> auch dem Kanton Zürich angerechnet, was aus Verursacheroptik gerechtfertigt ist).

Die folgende Tabelle zeigt die Emissionen und Depositionen von SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub> und NH<sub>3</sub> im Kanton Zürich und in der Schweiz. Die Kosten von Biodiversitätsverlusten

aufgrund Versauerung und Überdüngung wegen Luftverschmutzung betragen **33,8 Mio. CHF**.

Schadstoff	Emissionen CH 2000 (t/a)	Depositionen CH 2000 (t/a)	Emissionen ZH 2000 (t/a)	Angerechnete Depo- sitionen Kt. ZH 2000 (t/a)	Kosten Depositionen Kt. ZH 2000 [Mio CHF/a]
SO <sub>x</sub>	17'690	29'800	2'665	2'665	1,01
NO <sub>x</sub>	97'330	29'100	15'947	15'947	37,00
NH <sub>3</sub>	52'720	48'300	3'165	3'165	21,90
<b>Total</b>					<b>59,91</b>

*Tabelle 37 Emissionen und Depositionen verschiedener Luftschadstoffe in der Schweiz und im Kanton Zürich (Quellen: Eurostat, AWEL, BUWAL 2005, eigene Berechnungen)*

## 7.4 Aufteilung auf die einzelnen Verursacherguppen

Die Ergebnisse können gemäss obiger Schätzung des Zusammenhangs zwischen Emissionen und Depositionen wie folgt auf die einzelnen Verursacherguppen aufgeteilt werden:

2000	Stickstoffoxide		Ammoniak		Schwefeldioxid		Total
Verursacherguppen	Deposition (=Emission) [t/a]	Externe Kosten [kCHF]	Deposition (=Emission) [t/a]	Externe Kosten [kCHF]	Deposition (=Emission) [t/a]	Externe Kosten [kCHF]	Kosten Biodiv. [kCHF]
Abfallentsorgung	374	868	350	2'422	192	73	3'363
Feuerungen	2'689	6'240	0	0	2'194	832	7'072
Landwirtschaft	153	355	2'628	18'184	0	0	18'539
Strassenverkehr	8'814	20'450	187	1'294	238	90	21'834
Übrige mobile Quellen	3'917	9'087	0	0	40	15	9'102
<b>Total</b>	<b>15'947</b>	<b>37'000</b>	<b>3'165</b>	<b>21'900</b>	<b>2'664</b>	<b>1'010</b>	<b>59'910</b>

*Tabelle 38: Externe Kosten von Biodiversitätsschäden aufgrund von Luftverschmutzung im Kanton Zürich nach Verursacherguppen (Emissionen für das Jahr 2000, gemäss AWEL, Rest eigene Berechnungen)*

Die Landwirtschaft und der Strassenverkehr sind die Hauptverursacher von Biodiversitätsverlusten durch Luftverschmutzung im Kanton Zürich. Beim Strassenverkehr entstehen grosse Schäden durch die Emission von NO<sub>x</sub>, bei der Landwirtschaft entstehen die Schäden praktisch ausschliesslich durch die Emission von Ammoniak.

## 8 CO<sub>2</sub>- und Treibhausgasemissionen

### 8.1 Vorgehen zur Schätzung der externen Kosten von CO<sub>2</sub>- und Treibhausgasemissionen im Kanton Zürich

Die CO<sub>2</sub>- und Treibhausgas-Emissionen werden nicht direkt zu den Luftschadstoffen gezählt. Die Treibhausgasemissionen verursachen jedoch potenziell hohe künftige Klimakosten und stellen ein weiteres, relevantes Element bei der Ermittlung von Schäden und externen Kosten von in die Luft abgegebenen Emissionen dar. Daher werden auch die externen Klimakosten für den Kanton Zürich geschätzt und zusätzlich zu den externen Kosten der Luftverschmutzung ausgewiesen.

Die jährlichen Klimakosten des Verkehrs in der Schweiz belaufen sich gemäss ARE (2005) kurzfristig auf 504 bis 1'008 Mio. CHF (unter Verwendung von durchschnittlichen Vermeidungskosten von 35 CHF pro Tonne CO<sub>2</sub>-Äquivalent zur Erreichung der Kyotoziele für 2008-2012). Bei einer langfristigen Betrachtungsweise gemäss UNFCCC-Stabilisierungsszenarien (Vermeidungskosten von 80 CHF pro Tonne CO<sub>2</sub>-Äquivalent) werden die Klimakosten (inklusive ungedeckte Schadenskosten) in der Schweiz auf maximal 2'030 Mio. CHF pro Jahr geschätzt.

Die externen Klimakosten des Kantons Zürich werden mit den in (ARE 2005) ausgewiesenen durchschnittlichen **Vermeidungskosten von 35 CHF pro Tonne CO<sub>2</sub>-Äquivalent** für sämtliche relevanten Bereiche berechnet. Die Berechnungen werden auf Basis der kantonalen CO<sub>2</sub>-Emissionen der Bereiche Verkehr, Abfallentsorgung, Feuerungen, sowie der Emissionen der übrigen mobilen Quellen durchgeführt. Für die Schätzung der externen Klimakosten werden auch die jeweiligen Emissionen von CH<sub>4</sub> (Methan) und N<sub>2</sub>O (Lachgas) in CO<sub>2</sub>-Äquivalenten berücksichtigt. Diese Stoffe werden der Landwirtschaft zugeordnet, die hauptsächlich für die Emissionen dieser Treibhausgase verantwortlich ist.

### 8.2 Klimakosten im Kanton Zürich

Auf gesamtschweizerischer Ebene betragen die Emissionen im Jahr 2000 für Methan 3.74 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äquivalente und für Lachgas 3.19 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äquivalente. Ausgehend von den gesamtschweizerischen Daten werden mithilfe landwirtschaftlicher Kennzahlen die Emissionen im Kanton Zürich geschätzt. Zur Schätzung der Methan-Emissionen dient der Grossviehbestand in Grossviehein-

heiten (GVE) als Kennzahl, die Lachgas-Emissionen werden auf Basis des Anteils der landwirtschaftlichen Nutzfläche berechnet.

	Schweiz	Kanton Zürich	Kanton Zürich in % CH
GVE 2003 <sup>12</sup>	1'287'027	70'950	5.5%
CH <sub>4</sub> in CO <sub>2</sub> -Äquivalenten 2000	3.74 Mio. t	205'700 t	5.5%
Landwirtschaftliche Nutzfläche 2003	936'274 ha	62'091 ha	6.6%
N <sub>2</sub> O in CO <sub>2</sub> -Äquivalenten 2000	3.19 Mio. t	210'540 t	6.6%

*Tabelle 39: Geschätzter Anteil des Kantons Zürich an den Emissionen von CH<sub>4</sub> und N<sub>2</sub>O in CO<sub>2</sub>-Äquivalenten (Quellen: BUWAL: Emissionsperspektiven 2010, Website Schweizerischer Bauernverband SBV).*

Die folgende Tabelle zeigt die CO<sub>2</sub>-Emissionen im Kanton Zürich sowie den geschätzten Anteil des Kantons an den Emissionen von Methan und Lachgas.

Verursacherguppen	kt CO <sub>2</sub> -Äquivalente 2005
Abfallentsorgung (KVA)	326
Feuerungen	4'030
Strassenverkehr	2'052
Übrige mobile Quellen	477
Landwirtschaft CO <sub>2</sub>	49
Landwirtschaft (CH <sub>4</sub> / N <sub>2</sub> O)	416 (*)
<b>Total aller Quellgruppen</b>	<b>7'350</b>

(\* Schätzung für die Landwirtschaft basierend auf Zahlen für das Jahr 2003)

*Tabelle 40: CO<sub>2</sub>-Emissionen im Kanton Zürich im Jahr 2005 in kt CO<sub>2</sub>-Äquivalenten pro Jahr unterteilt nach Verursacherguppen (Quelle: AWEL Kanton Zürich, BUWAL 2005: Emissionsperspektiven 2010, eigene Berechnungen).*

<sup>12</sup> GVE = Grossvieheinheit: Eine GVE entspricht dem Futterverzehr und dem Anfall von Mist und Gülle von einer 650 kg schweren Kuh.

Bei Vermeidungskosten in Höhe von 35 CHF/t CO<sub>2</sub>-Äquivalent ergeben sich für den Kanton Zürich Schadenskosten in Höhe von insgesamt 257,3 Mio. CHF pro Jahr. Untenstehende Tabelle zeigt die jährlichen Kosten der Treibhausgasemissionen im Kanton Zürich, aufgeteilt auf die Verursachergruppen:

Verursachergruppen	kt CO <sub>2</sub> Äquivalent / a	Kosten Kt. Zürich
	2005	Mio. CHF
Abfallentsorgung (KVA)	326	11.4
Feuerungen	4'030	141.1
Strassenverkehr	2'052	71.8
Übrige mobile Quellen	477	16.7
Landwirtschaft	465 (*)	16.3
<b>Total aller Quellgruppen</b>	<b>7'351</b>	<b>257.3</b>

(\* Schätzung für die Landwirtschaft basierend auf Zahlen für das Jahr 2003)

*Tabelle 41: Schadenskosten verursacht durch Treibhausgasemissionen im Kanton Zürich in Mio. CHF pro Jahr, unterteilt nach Verursachergruppen für das Jahr 2005 (Quelle: AWEL Kanton Zürich, ARE/BUWAL 2005, BUWAL 2005, eigene Berechnungen)*



## 9 Zusammenfassung: Externe Kosten der Luftverschmutzung und der Treibhausgasemissionen im Kt. ZH

### 9.1 Übersicht der externen Kosten Kanton Zürich

Die folgende Tabelle zeigt zusammengefasst die externen Kosten aufgrund der Luftverschmutzung und der Treibhausgasemissionen im Kanton Zürich.

	Externe Kosten von Luftverschmutzung und Treibhausgasemissionen im Kanton Zürich 2000/2005 [Mio. CHF/a]
Gesundheitsschäden	555
Gebäudeschäden	164
Waldschäden	14
Ernteaufälle	25
Biodiversitätsschäden	60
<b>Total Schäden Luftschadstoffe Kt. Zürich 2000</b>	<b>818</b>
<b>Kosten Treibhausgasemissionen Kt. ZH 2005</b>	<b>257</b>

*Tabelle 42 Externe Kosten der Luftverschmutzung im Jahr 2000 und der Treibhausgasemissionen im Jahr 2005 im Kanton Zürich*

Die gesamten externen Kosten der Luftverschmutzung im Kanton Zürich betragen im Jahr 2000 mindestens **818 Mio. CHF/a**. Zusätzlich entstehen Klimakosten von **257 Mio. CHF/a** (2005).

Die Entwicklung der externen Kosten der Luftverschmutzung im Kanton Zürich seit der letzten Kostenschätzungen von 1995 ist nicht eindeutig. Die Kosten der Luftverschmutzung liegen mit 818 Mio CHF/a eher etwas höher als die damals geschätzten 323 bis 812 Mio. CHF/a, dagegen sind die geschätzten Klimakosten mit 257 Mio CHF/a eindeutig geringer als die damaligen Klimakosten von 660 bis 850 Mio. CHF im Jahr 1995. Die Ursachen der Kostendifferenzen gegenüber 1995 beruhen primär auf den besseren und aktualisierten Datengrundlagen sowie auf der Verbesserung der Methodik. Die zwischenzeitliche Reduktion der Luftschadstoffemissionen manifestiert sich deshalb im Kostenvergleich 1995 <--> 2000/2005 nicht (dafür müsste mit derselben Methodik und denselben Kos-

tensätzen wie 1995 eine Pilotrechnung für 2000 gemacht werden). Bei den CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten sind gegenüber 1995 eindeutige Kostensenkungen festzustellen, was schon wegen den in der Zwischenzeit erfolgten Zunahme der Treibhausgasemissionen auf eine veränderte Kostenschätzmethode zurückzuführen ist.

## 9.2 Externe Kosten von Luftschadstoffbelastung und Treibhausgasen nach Verursachergruppe

Die folgende Tabelle zeigt eine Aufteilung der gesamten externen Kosten der Luftverschmutzung im Kanton Zürich nach Verursachergruppen:

Externe Kosten Luftverschmutzung und Treibhausgasemissionen nach Verursachergruppe, Kanton Zürich 2000/2005 [Mio. CHF/a]							
	Gesundheit	Gebäude	Wald	Ernteauffälle	Biodiversität	Total Luftschadstoffe	Total Klima
Abfallentsorgung	67.7	15.9	0.6	0.8	2.6	88.3	11.4
Feuerungen	42.2	9.9	3.2	4.3	3.4	66.6	141.1
Industrie/Gewerbe	22.2	5.2	0	0	0	27.4	
Landwirtschaft	78.3	18.3	3.8	1.5	16.8	120.5	16.3
Verkehr	189.2	78.3	4.7	12.7	8	306.8	71.8
Übrige mobile Quellen	155.4	36.4	2.1	5.9	3	208.8	16.7
Brenn- /Treibstoffe	0	0	0	0	0		
Lösungsmittel	0	0	0	0	0		
<b>Total</b>	<b>555</b>	<b>164</b>	<b>14.4</b>	<b>25.2</b>	<b>33.8</b>	<b>818.4</b>	<b>257.3</b>

*Tabelle 43 Externe Kosten der Luftverschmutzung (2000) bzw. der Treibhausgasemissionen (2005) im Kanton Zürich nach Verursachergruppen*

Der Strassenverkehr und die übrigen mobilen Quellen sind für insgesamt 63% der gesamten externen Kosten der Luftverschmutzung im Kanton Zürich hauptverantwortlich. Der nächst grössere Verursacher ist die Landwirtschaft mit einem Kostenanteil von 15%, gefolgt von der Abfallentsorgung mit 11%.

Wie die Aufteilung der gesamten externen Kosten im Kanton Zürich nach Verursachergruppen zeigt (s. Tabelle 43), dominieren bei den Kostenkategorien die Gesundheitskosten und daneben die Gebäudeschäden und der Beitrag an die Treibhausgasemissionen. Gesundheits- und Gebäudeschäden werden primär durch PM10-Immissionen (aber auch durch die übrigen Schadstoffe) verursacht. Gemäss diesen Kostenverhältnissen ist bei der Reduktion der PM10-Immissionen die grösste Wirkung zu erwarten. Aufgrund der Emissionen stehen

dabei Massnahmen beim Verkehr sowie bei den übrigen mobilen Quellen im Vordergrund, gefolgt von Massnahmen bei der Abfallentsorgung und in der Landwirtschaft. (siehe Tabelle 3). Ein weiterer wichtiger Ansatzpunkt sind die  $\text{NH}_3$ -Emissionen der Landwirtschaft. Die Landwirtschaft trägt insbesondere über die Überdüngung, sowie über die  $\text{PM}_{10}$ -Emissionen der landwirtschaftlichen Maschinen zu hohen Schadenskosten bei.

Bei den Klimakosten (Reduktion der Treibhausgasemissionen) dominieren die Feuerungen mit 55% Anteil eindeutig vor dem Verkehr mit 18.5% Anteil an den Treibhausgasemissionen.

### 9.3 Zuteilung externe Kosten auf Schadstoffe

Zu den Schadstoffen mit der grössten Schadenswirkung in den Bereichen Gesundheits- und Gebäudeschadenskosten im Kanton Zürich gehört  $\text{PM}_{10}$  (wobei die Gesundheitsschäden auch durch  $\text{NO}_2$ -,  $\text{SO}_2$ - und  $\text{O}_3$ -Immissionen und die Gebäudeschäden auch durch  $\text{NO}_2$ -,  $\text{SO}_2$ - und  $\text{O}_3$ -Immissionen mitverursacht werden). Für Waldschäden verantwortlich sind die Ozonbelastung (verursacht durch die Ozonvorläufer  $\text{NO}_x$ - und VOC im Sommer), die Bodenversauerung durch  $\text{SO}_2$ -, und  $\text{NO}_2$ -Depositionen sowie die Überdüngung durch  $\text{NO}_2$ - und  $\text{NH}_3$ -Depositionen.  $\text{SO}_2$ -,  $\text{NO}_2$ - und  $\text{NH}_3$ -Depositionen führen zudem zu Biodiversitätsverlusten.

Die Luftschadstoffe führen direkt zu Schäden an Personen und Gütern. Dagegen verursachen Treibhausgasemissionen nicht direkt Personen- und Güterschäden sondern beeinflussen diese indirekt über die Klimaveränderung. Die Reduktion von Treibhausgasemissionen führt in der Regel zu Synergien bei den Luftschadstoffen, weil die meisten Massnahmen zur Verminderung der Treibhausgasemissionen gleichzeitig auch die Luftschadstoffemissionen verringern.

Die Verwendung von  $\text{PM}_{10}$  als Leitschadstoff bei den Gesundheits- und bei den Gebäudeschäden verunmöglicht die Zuteilung der ermittelten externen Kosten der Luftschadstoffbelastung auf die einzelnen Schadstoffe. Es sei nochmals darauf hingewiesen, dass sowohl bei den Gesundheitskosten als auch bei den Gebäudeschäden die Schadenswirkung zwar zur Hauptsache aber doch nicht ausschliesslich von den  $\text{PM}_{10}$ -Immissionen ausgehen. Stickstoffdioxid- und Schwefeldioxid-Immissionen gefährden die Gesundheit ebenfalls und beide Schadstoffe haben ein Säurepotenzial, das die Gebäudehüllen ebenfalls angreift. Sollte eine Zurechnung der externen Kosten auf die einzelnen Schadstoffe vorgenommen werden, müssten sogenannte Äquivalenzfaktoren für Gesundheits- und für Ge-

bäudeschäden geschätzt werden, welche angeben, in welchem Verhältnis jeweils eine bestimmte Konzentration dieser Schadstoffe an den jetzt voll dem PM10 zugewiesenen Schadenswirkungen steht.

Im Treibhausgasbereich gibt es für die verschiedenen Treibhausgase diese sogenannten CO<sub>2</sub> -Äquivalenzfaktoren, welche ein einfaches Addieren der Wirkungen der verschiedenen Treibhausgase ermöglichen.

## Literatur

- ARE 2004a: Ecoplan/Infras/ISPM: Externe Gesundheitskosten durch verkehrsbedingte Luftverschmutzung, ARE, BUWAL, BAG, Bern 2004.
- ARE 2004b: Infras: Verkehrsbedingte Gebäudeschäden in der Schweiz, ARE, BUWAL Zürich 2004.
- ARE 2005: Externe Kosten des Strassen- und Schienenverkehrs 2000, Klima und nicht erfasste Umweltbereiche sowie vor- und nachgelagerte Prozesse, INFRAS im Auftrag des Bundesamts für Raumentwicklung und des Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft BUWAL, Zürich, 2005.
- AWEL Kt. Zürich: Diverse Statistiken zu Schadstoffemissionen und Verbrauchergruppen.
- BFS 2005: Die Landwirtschaft der Schweiz 2005, Bundesamt für Statistik BFS, Bern 2005.
- BUWAL 2005: Stickstoffhaltige Luftschadstoffe in der Schweiz, Statusbericht der eidg. Kommission für Lufthygiene (EKL), Schriftenreihe Umwelt SRU 384, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft BUWAL, Bern, 2005.
- e c o n c e p t** 1996: Ott W.: Die Kosten der Luftverschmutzung im Kanton Zürich", Im Auftrag des ATAL des Kt. Zürich, Zürich 1996
- Eco-indicator 1999: Goedkoop, M., Spriensma, R.: The Eco-Indicator 99. A damage oriented method for Life Cycle Impact Assessment: Methodology Report, Pre Consultants, Amersfoort 2000.
- EMEP 2003: Expert Emissions used in EMEP models, <http://www.emep.int>
- Holland 2002: Holland, M., et al.: Economic Assessment of Crop Yield Losses from Ozone Exposure, The UNECE International Cooperative Programme on Vegetation, University of Wales, Bangor 2002.
- OECD 2005: Agricultural Policies in OECD countries: Monitoring and Evaluation 2005, OECD 2005.

- Ott, Baur et al. 2006: Ott, W., Baur, M., Kaufmann, Y. **e c o n c e p t**; Frischknecht, R., Steiner, R. ESU-Services: Assessment of Biodiversity Losses, Deliverable D.4.2., New Energy Externalities Developments for Europe (NEEDS), Zurich, May 2006 (unveröffentlicht)
- ten Brink 2000: ten Brink, B.: Biodiversity Indicators for the OECD Environmental Outlook and Strategy: A Feasibility Study, RIVM report, Bilthoven 2000.