

AWEL Kanton Zürich, UGZ Stadt Zürich, Fachstelle Umwelt
Winterthur

Die Kosten der Luftverschmutzung für den Kanton Zürich, die Stadt Zürich und die Stadt Winterthur

Schlussbericht
1. Oktober 2013

1288_schlube_koluverschmu_zhzhwi_20131001.docx

Erarbeitet durch

econcept AG, Gerechtigkeitsgasse 20, CH-8002 Zürich
www.econcept.ch / + 41 44 286 75 75

Autoren/innen

Stephanie Bade, lic. oec. publ., Ökonomin
Daniel Montanari, MA UZH in Wirtschaftswissenschaften, Ökonom
Walter Ott, lic. oec. publ., dipl. El. Ing. ETH, Raumplaner ETH/NDS, Ökonom

Dateiname: 1288_schlube_koluverschmu_zhzhwi_20131001.docx Speicherdatum: 1. Oktober 2013

Inhalt

	Zusammenfassung	i
Z-1	Inhalt und Umfang des Projektes	i
Z-2	Ergebnisse für den Kanton Zürich	iii
Z-3	Ergebnisse für die Stadt Zürich	vi
Z-4	Ergebnisse für die Stadt Winterthur	viii
1	Einleitung	11
1.1	Ausgangslage und Auftrag	11
1.2	Analyserahmen und Aussagekraft	11
2	Gesundheitsschadenskosten	15
2.1	Vorgehen und Quellen	15
2.2	Berechnungen und Teilergebnisse	17
2.2.1	Exponierte Bevölkerung	17
2.2.2	Attributable Fälle	18
2.2.3	Kosten pro Fall	19
2.2.4	Berechnung Gesamtkosten	20
2.3	Ergebnisse	21
2.3.1	Kanton Zürich	21
2.3.2	Städte Zürich und Winterthur	23
3	Gebäudeschadenskosten	25
3.1	Vorgehen und Quellen	25
3.2	Berechnungen und Teilergebnisse	27
3.2.1	Luftschadstoffbedingte Kapitalkosten durch kürzere Lebenszeiten von Fassaden	27
3.2.2	Luftschadstoffbedingte Reinigungskosten	32
3.3	Ergebnisse	33
3.3.1	Kanton Zürich	33
3.3.2	Städte Zürich und Winterthur	34
4	Waldschadenskosten	35
4.1	Vorgehen und Quellen	35
4.2	Berechnungen und Teilergebnisse	36
4.2.1	Vermindertes Holzwachstum durch Ozonimmissionen	36
4.2.2	Vermindertes Holzwachstum durch Bodenversauerung	39

4.2.3	Verstärkter Windwurf	39
4.3	Ergebnisse	40
4.3.1	Kanton Zürich	40
4.3.2	Städte Zürich und Winterthur	41
5	Biodiversitätsverluste	43
5.1	Vorgehen und Quellen	43
5.2	Berechnungen und Teilergebnisse	43
5.2.1	Dosis-Wirkungsbeziehungen zwischen Schadstoffdepositionen und Biodiversitätsveränderungen	43
5.2.2	Monetarisierung der Biodiversitätsveränderungen	44
5.2.3	Berechnung Gesamtkosten	44
5.3	Ergebnisse	45
6	Ernteauffälle	47
6.1	Vorgehen und Quellen	47
6.2	Berechnungen und Teilergebnisse	48
6.2.1	Berechnung der relativen Ernteauffälle	48
6.2.2	Berechnung der absoluten Ernteauffälle	49
6.3	Ergebnisse	50
7	Gesamtkosten der Luftverschmutzung und volkswirtschaftlicher Nutzen von Luftreinemassnahmen	53
7.1	Gesamtkosten der Luftverschmutzung	53
7.1.1	Kanton Zürich	53
7.1.2	Stadt Zürich	54
7.1.3	Stadt Winterthur	55
7.2	Volkswirtschaftlicher Nutzen der Verbesserung der Luftqualität	55
8	Aufteilung auf die Verursacherguppen	57
8.1	Vorgehen	57
8.2	Kanton Zürich	57
8.3	Stadt Zürich	59
8.4	Stadt Winterthur	60
	Anhang	61
A-1	Emissionen 2010 und 2000	61
A-2	Immissionen	63
A-3	Gesundheitskosten	66
A-4	Gebäudeschadenskosten	67
A-5	Ernteauffälle	73
A-6	Aufteilung der Kosten auf die Verursacherguppen	74

Zusammenfassung

Z-1 Inhalt und Umfang des Projektes

Ausgangslage und Auftrag

Die Kosten der Luftverschmutzung für den Kanton Zürich wurden letztmals für das Jahr 2000 ermittelt (econcept 2006). Die damalige Studie wies der Luftverschmutzung Kosten von 818 Mio. CHF zu, wobei der Verkehr und übrige mobile Quellen als die grössten Emittenten identifiziert wurden. Als grösste Schadensbereiche erwiesen sich die Gesundheit der belasteten Bevölkerung sowie die Gebäudefassaden, insbesondere an verkehrsbelasteten Standorten.

Inzwischen sind die damals ermittelten Werte veraltet: Zum einen hat sich die Belastungssituation verändert oder kann teilweise besser erfasst werden, zum anderen haben sich die Kosten für Gesundheitsdienste, Gebäuderenovationen und für vieles andere in den vergangenen zehn Jahren verändert.

Da das AWEL damals wie heute bei der Planung von Lufthygienemassnahmen auch ihr Kosten-Nutzenverhältnis berücksichtigt, besteht ein Bedürfnis nach aktuellen Kostenwerten. Aus diesem Grund werden die Kosten der Luftverschmutzung mit der vorliegenden Arbeit für das Jahr 2010 neu ermittelt. Ausserdem wird die Veränderung der Kosten zwischen 2000 und 2010 dargestellt sowie die Bedeutung der verschiedenen Kostentreiber quantifiziert.

Aufgrund neu verfügbarer oder veränderter Grundlagen und um die Veränderung der Kosten zwischen 2000 und 2010 konsistent darzustellen, werden im Rahmen des Projektes die luftschadstoffbedingten Kosten im Jahr 2010 *und* im Jahr 2000 neu berechnet. Hierzu wird in den verschiedenen Schadensbereichen eine literaturbasierte Überprüfung der Berechnungsmethodik bzw. der Dosis-Wirkungs-Relationen¹ durchgeführt. Nicht möglich sind hingegen eigene empirische Untersuchungen zur Überprüfung oder Modifikation der Berechnungsmethodik.

Das konkrete Vorgehen beschreiben wir für jeden Schadensbereich im entsprechenden Berichtskapitel.

Analyserahmen und Aussagekraft

Perimeter

Wir betrachten die Wirkung von Luftschadstoffen im Kanton Zürich sowie in den Städten Zürich und Winterthur.

Schadstoffe

Seit der letztmaligen Ermittlung der Kosten der Luftverschmutzung (econcept 2006) haben sich die Prioritäten bei den Luftschadstoffen etwas verschoben: Schwefeldioxide sind

¹ Zum Beispiel Relation zwischen PM10-Konzentration und Erosion von Gebäudefassaden

zurzeit nicht mehr in relevanten Konzentrationen vorhanden und werden deswegen nicht mehr betrachtet. Relevant sind hingegen die folgenden Schadstoffe:

- Feinstaub (PM₁₀)
- Stickstoffoxide (NO_x)
- Ozon (O₃)
- Ammoniak (NH₃)

Schadensbereiche

Die aufgeführten Schadstoffe entfalten negative Wirkungen in den folgenden Bereichen:

- Gesundheit (der Wohnbevölkerung)
- Gebäude
- Wald
- Biodiversität
- Ernteertrag

Allerdings sind die verschiedenen Luftschadstoffe in den verschiedenen Schadensbereichen unterschiedlich relevant. Ebenso ist ihre Wirkung in den verschiedenen Schadensbereichen unterschiedlich gut untersucht, so dass nicht für jeden Luftschadstoff und jeden Schadensbereich Dosis-Wirkung-Relationen bekannt bzw. quantifiziert sind.

Territorialprinzip

Wie auch auf nationaler Ebene üblich, verwenden wir bei der Zuordnung der Kosten der Luftverschmutzung zu den verschiedenen Verursachergruppen das Territorialprinzip: Wir nehmen an, dass alle Immissionen innerhalb der Kantons Grenzen durch Emissionen innerhalb der Kantons Grenzen verursacht werden. Da aufgrund von räumlichen und meteorologischen Gegebenheiten davon ausgegangen werden kann, dass Schadstoffimporte und -exporte sich ungefähr die Waage halten, ist diese Annahme für den Kanton Zürich vertretbar.

Untersuchungszeitraum

Die vorliegende Studie verwendet (sofern nicht explizit anders deklariert) Emissions- und Immissionsdaten aus den Jahren 2000 und 2010.² Beide Jahre zeichnen sich durch im langfristigen Trend unauffällige Immissionsmessenwerte und Emissionszahlen aus. Die ermittelten Kosten beruhen folglich auf einer üblichen Belastungssituation und sind *nicht* durch Extremwerte geprägt, welche beispielsweise durch aussergewöhnlich lange Schönwetterperioden erreicht werden könnten.

² Die verwendeten Emissions- und Immissionswerte für das Jahr 2000 stimmen nur teilweise mit den in econcept (2006) publizierten Werten überein, da zwischenzeitlich die zugrundeliegenden Modelle modifiziert wurden. Wenn nicht explizit anders deklariert, liegen den in diesem Bericht gezeigten Ergebnissen die aktuellen Modelle (OSTLUFT 2013) zugrunde.

At-least-Ansatz

Grundsätzlich wird bei allen folgenden Berechnungen ein «at-least-Ansatz» verwendet. Das heisst, alle Annahmen und Methoden sind so gewählt, dass eher eine Unterschätzung als eine Überschätzung der luftschadstoffbedingten Gesundheitskosten erfolgt.

Teilweise Entkoppelung der Emissions- und Kostenentwicklung

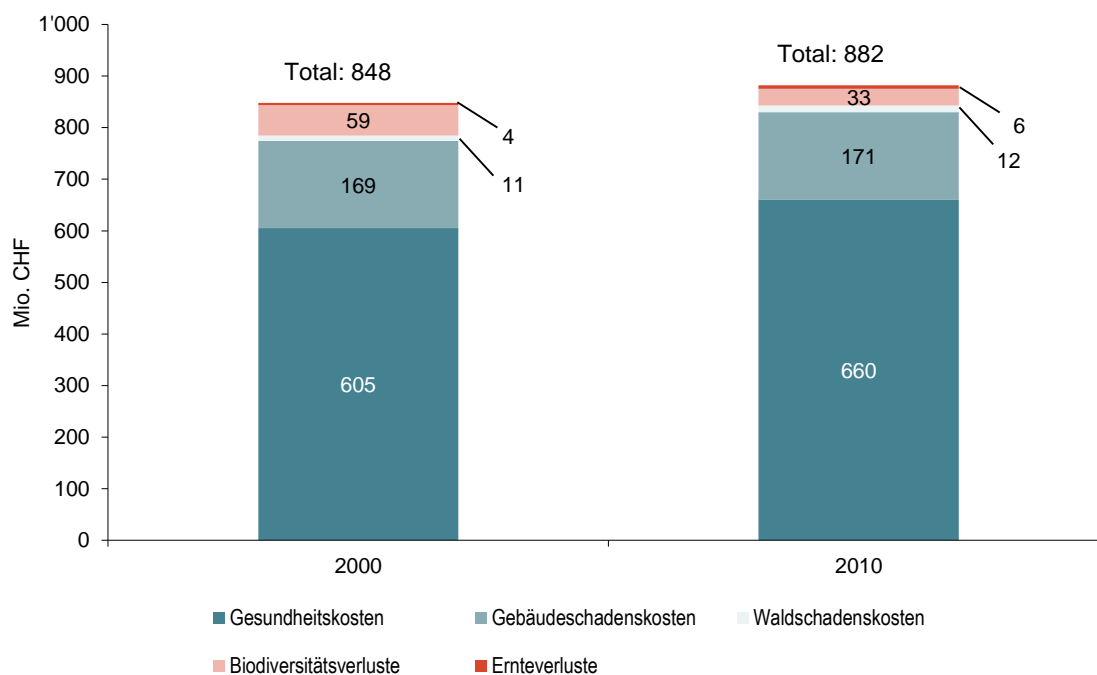
Während sich die Luftqualität zwischen 2000 und 2010 tendenziell weiter verbessert hat, haben die luftschadstoffbedingten Schadenskosten zugenommen. Zum einen sind in der Regel die Schadenkosten pro Fall oder Ereignis (Gesundheitskosten, Kosten für Gebäudesanierungen, etc.) gestiegen. Zum anderen haben die betroffene Bevölkerung sowie die belasteten Gebäudeflächen zugenommen. *Die Entwicklung der luftschadstoffbedingten Kosten in den einzelnen Bereichen und insgesamt kann folglich deutlich von der Entwicklung der Emissions- und/oder Immissionssituation abweichen.*

Z-2 Ergebnisse für den Kanton Zürich

Die Kosten der Luftverschmutzung

Die Belastung durch Luftschadstoffe verursacht im Kanton Zürich im Jahr 2010 Kosten von insgesamt 882 Mio. CHF.

«Luftschadstoffbedingte Kosten im Kanton Zürich»



Figur 1: Luftschadstoffbedingte Kosten im Kanton Zürich im Jahr 2010 [Mio. CHF].

Im Kanton Zürich setzten sich die luftschadstoffbedingten Kosten aus Gesundheits-, Gebäude-, und Waldschadenskosten sowie aus Kosten durch Biodiversitätsverluste und Ernteauffälle zusammen. Weitaus am relevantesten sind mit 660 Mio. CHF die Gesundheitskosten. Sie allein entsprechen 75% der Gesamtschadenssumme. An zweiter Stelle stehen die Gebäudeschadenskosten mit 171 Mio. CHF bzw. 19% der Schadenssumme. Ebenfalls ins Gewicht fallen mit 33 Mio. CHF Biodiversitätsverluste. Waldschäden und Ernteauffälle haben für den Gesamtkanton eine geringe Bedeutung, wobei sie allerdings für den im Einzelnen betroffenen Wald- oder Landwirtschaftsbetrieb durchaus relevant sein können.

Die luftschadstoffbedingten Kosten sind im Kanton Zürich von 848 Mio. CHF im Jahr 2000 auf 882 Mio. CHF im Jahr 2010 angestiegen, obwohl die Immissionen und Depositionen der meisten³ verwendeten Leitschadstoffe (PM₁₀, NO_x, NH₃, AOT40f-Ozonmesswert⁴) zwischen 2000 und 2010 abgenommen haben. Dies ist einerseits bedingt durch den Anstieg der Kostensätze (z.B. Behandlungskosten im Gesundheitswesen), andererseits haben sowohl die Bevölkerung als auch die Gebäudeflächen im Kanton Zürich zugenommen.

Die Verursacherguppen im Kanton Zürich

Figur 2 zeigt die Aufteilung der luftschadstoffbedingten Kosten nach Verursacherguppen und Schadensbereiche.

Den grössten Anteil an den luftschadstoffbedingten Gesamtkosten im Kanton Zürich hat mit 385 Mio. CHF im Jahr 2010 der Verkehr, bedingt durch seine hohe Anteile an den kantonalen PM₁₀- und NO_x-Emissionen. Dabei verursacht der Strassenverkehr deutlich höhere Kosten als der Luft- und Schienenverkehr. An zweiter Stelle steht mit 181 Mio. CHF die Gruppe «Land-/Forstwirtschaft», wobei das Vieh (insbesondere durch NH₃) mit 102 Mio. CHF und die landwirtschaftlichen Fahrzeuge mit 48 Mio. CHF ins Gewicht fallen. An dritter und vierter Stelle folgen «Haushalte, Gewerbe und Dienstleistungen» sowie «Industrie». Bei diesen Gruppen verursachen Feuerungen, Baumaschinen sowie industrielle und gewerbliche Prozesse die grössten Kostenanteile.

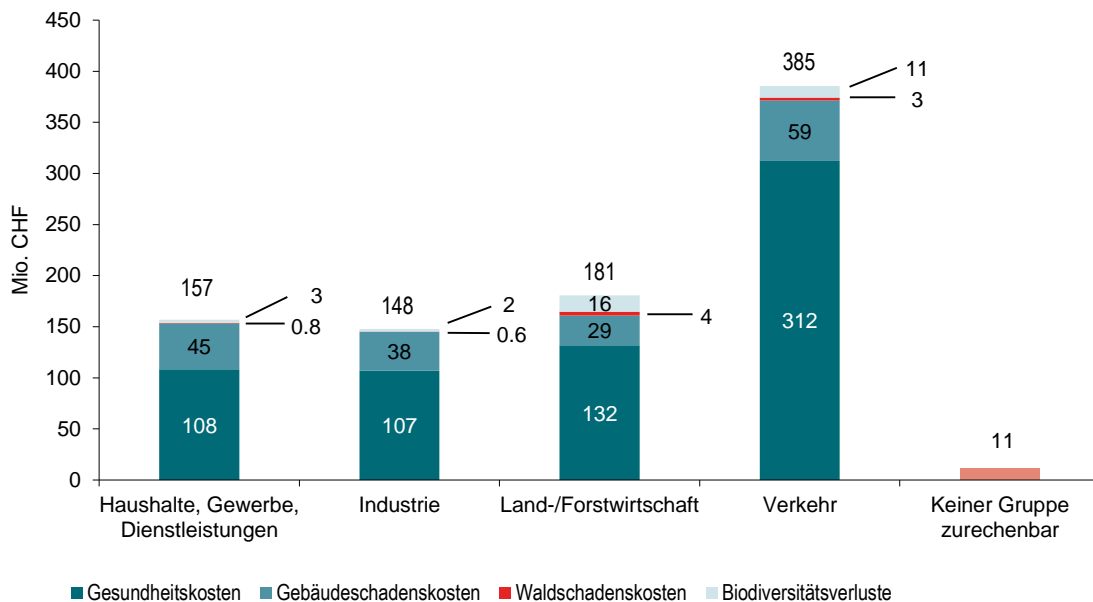
Die durch Ozon entstehenden Waldschäden und Ernteverluste (11 Mio. CHF im Jahr 2010) sind keiner Verursacherguppe zurechenbar.

³ Leicht gestiegen ist einzig der AOT40c-Ozonmesswert. Dies hat zu einem Anstieg der Ernteverluste geführt, welcher aber im Vergleich den anderen Schadensbereichen untergeordnete Bedeutung haben.

Der «Accumulated Ozone Exposure over a threshold of 40» (AOT40) Wert für landwirtschaftliche Nutzpflanzen (crop → AOT40c) zeigt die Summe aller 1-Stunden-Ozonkonzentrationen für Werte über 40ppm, welche zwischen 1. Mai und 31. Juli des jeweiligen Jahres gemessen werden (ARE 2008). Um die Schadenswirkung für Nutzpflanzen abschätzen zu können, müssen die Messwerte auf eine Höhe von 0-1 Meter korrigiert werden. Der Korrekturfaktor von 4m auf 1m beträgt 0.92 (UNECE 2004).

⁴ Der «Accumulated Ozone Exposure over a threshold of 40» (AOT40) Wert für Wälder (forest → AOT40f) zeigt die Summe aller 1-Stunden-Ozonkonzentrationen für Werte über 40ppm, welche zwischen 1. April und 30. September des jeweiligen Jahres gemessen werden (ARE 2008). Um die Schadenswirkung für Bäume abschätzen zu können, müssen die Messwerte auf eine Höhe von 20 Meter korrigiert werden. Der Korrekturfaktor von 4m auf 20m beträgt 1.04 (UNECE 2004).

«Verursacherguppen und Schadensbereich im Kanton Zürich im Jahr 2010»

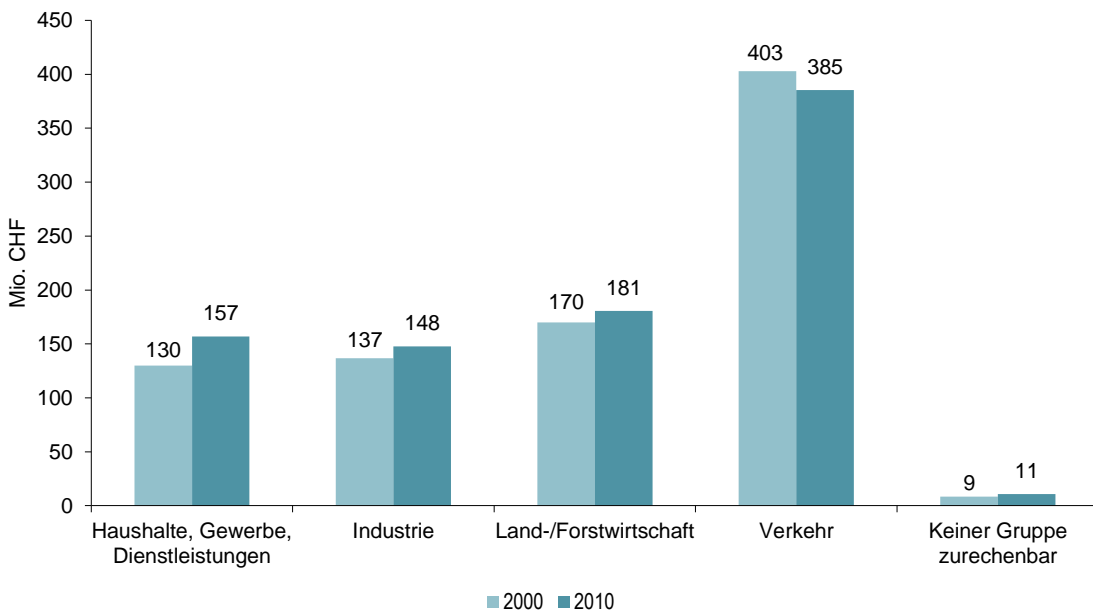


econcept

Figur 2: Aufteilung der Gesamtkosten auf Verursacherguppen und Schadensbereiche im Kanton Zürich im Jahr 2010.

Figur 3 zeigt die Aufteilung der luftschadstoffbedingten Kosten auf die Verursacherguppen für die Jahre 2000 und 2010.

«Die Verursacherguppen im Kanton Zürich in den Jahren 2000 und 2010»



econcept

Figur 3: Aufteilung der luftschadstoffbedingten Gesamtkosten auf die Verursacherguppen im Kanton Zürich in den Jahren 2000 und 2010.

Obwohl alle Verursacherguppen die Emissionen der meisten Schadstoffe tendenziell auf gleichem Niveau halten oder senken konnten (vgl. Tabelle 26 in Anhang A-1), haben sie (mit Ausnahme des Verkehrs) im Jahr 2010 höhere luftschadstoffbedingte Kosten verursacht als im Jahr 2000. Zum einen sind in der Regel die Schadenkosten pro Fall oder Ereignis (Gesundheitskosten, Kosten für Gebäudesanierungen, etc.) gestiegen. Zum anderen haben trotz tendenziell sinkender Belastung die betroffene Bevölkerung und die belasteten Gebäudeflächen durch Bevölkerungswachstum und Bautätigkeit zugenommen. Nur beim Verkehr war der Emissionsrückgang zwischen 2000 und 2010 so deutlich, dass dies auch zu einem Rückgang der luftschadstoffbedingten Kosten geführt hat.

Der volkswirtschaftliche Nutzen der Verbesserung der Luftqualität

Zwischen 2000 und 2010 ist die Luftbelastung zurückgegangen. Wären die Immissionen und Depositionen der betrachteten Schadstoffe in diesem Zeitraum konstant geblieben anstatt gesunken, lägen die luftschadstoffbedingten Gesamtkosten im Kanton Zürich im Jahr 2010 um rund 146 Mio. CHF höher als bei der tatsächlichen heutigen Belastungssituation. Im Jahr 2010 hat die Verbesserung der Luftqualität folglich einen volkswirtschaftlichen Nutzen von 146 Mio. CHF generiert.

Durch die Verbesserung der Luftqualität vermiedene Kosten im Jahr 2010 [Mio. CHF]	
Gesundheitskosten	74
Kosten durch Schäden an Gebäuden	51
Waldschadenskosten	13
Biodiversitätsverluste	8
Ernteauffälle	Keine Immissionssenkung
Total vermiedene Kosten	146

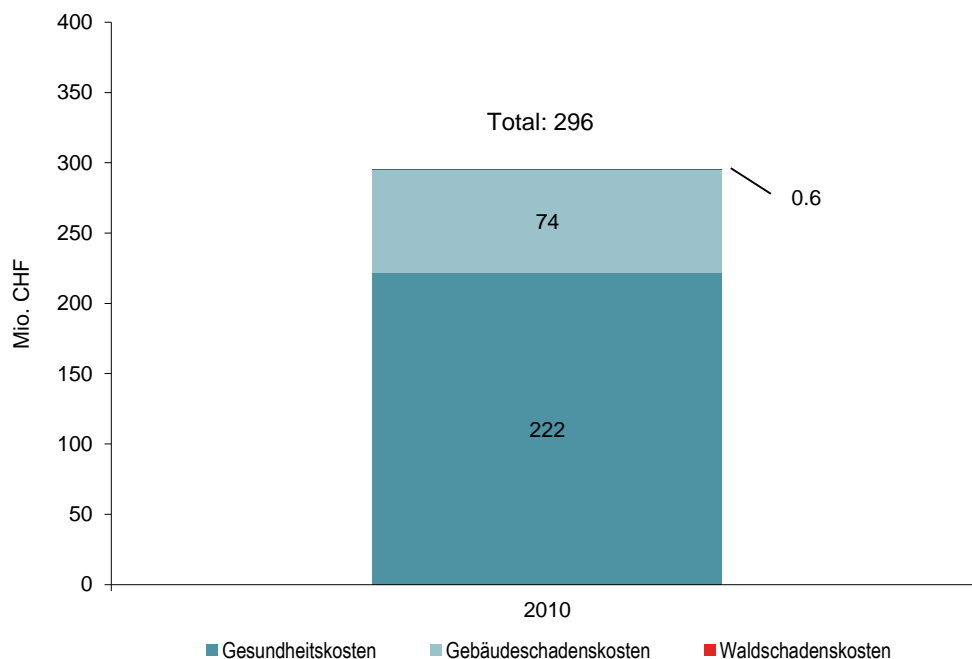
Tabelle 1: Wären die Immissionen von PM10, NO_x, NH₃ und Ozon zwischen 2000 und 2010 konstant geblieben anstatt zurückgegangen, wären die luftschadstoffbedingten Kosten im Jahr 2010 um 146 Mio. CHF höher ausgefallen.

Z-3 Ergebnisse für die Stadt Zürich

Die Kosten der Luftverschmutzung

Die Belastung durch Luftschadstoffe verursacht in der Stadt Zürich im Jahr 2010 Kosten von insgesamt 296 Mio. CHF. Sie setzen sich zusammen aus Gesundheits-, Gebäude-, und Waldschadenskosten. Biodiversitätsverluste und Ernteauffälle fallen in der Stadt so gut wie keine an und werden deswegen nicht ausgewiesen. Auch die Waldschadenskosten sind gering: Mit rund 0.6 Mio. CHF entsprechen sie weniger als einem Prozent der Gesamtschadenskosten. Die Gesundheitskosten haben mit 222 Mio. CHF bzw. 75% den grössten Anteil an den Gesamtkosten, die Gebäudeschadenskosten haben einen Anteil von knapp 25%.

«Luftschadstoffbedingte Kosten in der Stadt Zürich»



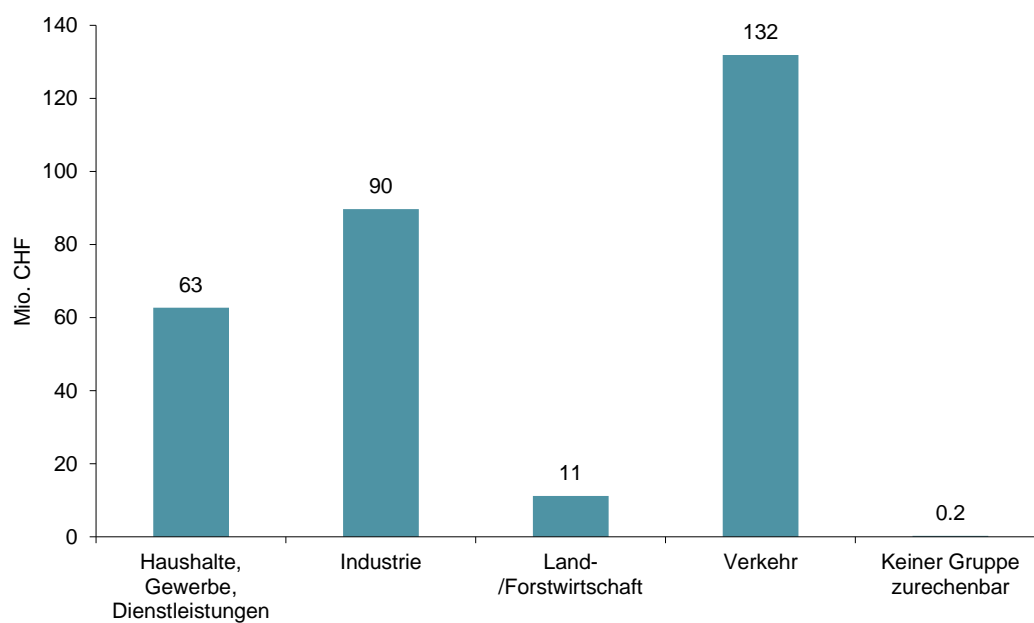
econcept

Figur 4: Luftschadstoffbedingte Kosten in der Stadt Zürich im Jahr 2010 [Mio. CHF].

Die Verursachergruppen

In Figur 22 dargestellt ist die Aufteilung der luftschadstoffbedingten Gesamtkosten in der Stadt Zürich auf die verschiedenen Verursachergruppen.

« Die Verursachergruppen in der Stadt Zürich im Jahr 2010 »



econcept

Figur 5: Aufteilung der luftschadstoffbedingten Gesamtkosten in der Stadt Zürich im Jahr 2010 auf die Verursachergruppen

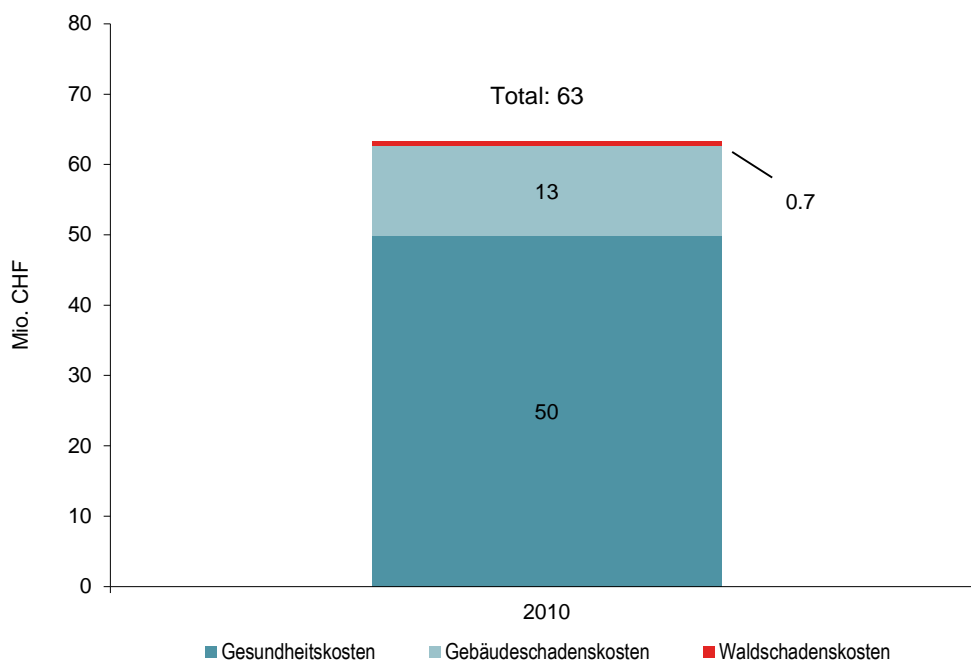
Den grössten Anteil an den luftschadstoffbedingten Gesamtkosten in der Stadt Zürich hat mit 132 Mio. CHF im Jahr 2010 der Verkehr, gefolgt von der Gruppe «Industrie» mit 90 Mio. CHF, wobei Baumaschinen mit 49 Mio. CHF und industrielle und gewerbliche Prozesse mit 22 Mio. CHF zu Buche schlagen. Auch die Gruppe «Haushalte, Gewerbe und Dienstleistungen» verursacht mit 63 Mio. CHF luftschadstoffbedingte Kosten in relevantem Ausmass, mehrheitlich durch Feuerungen. Die durch die Land- und Forstwirtschaft verursachten Kosten von 11 Mio. CHF sind vergleichsweise gering.

Z-4 Ergebnisse für die Stadt Winterthur

Die Kosten der Luftverschmutzung

Die Belastung durch Luftschadstoffe verursacht in der Stadt Winterthur im Jahr 2010 Kosten von insgesamt 63 Mio. CHF. Sie setzen sich zusammen aus Gesundheits-, Gebäude-, und Waldschadenskosten. Biodiversitätsverluste und Ernteauffälle fallen in der Stadt so gut wie keine und werden deswegen nicht ausgewiesen. Die Gesundheitskosten tragen mit rund 79%, die Gebäudeschadenskosten mit rund 20% zu den Gesamtkosten bei. Die Waldschadenskosten sind mit 0.7 Mio. CHF vergleichsweise gering.

«Luftschadstoffbedingte Kosten in der Stadt Winterthur»



econcept

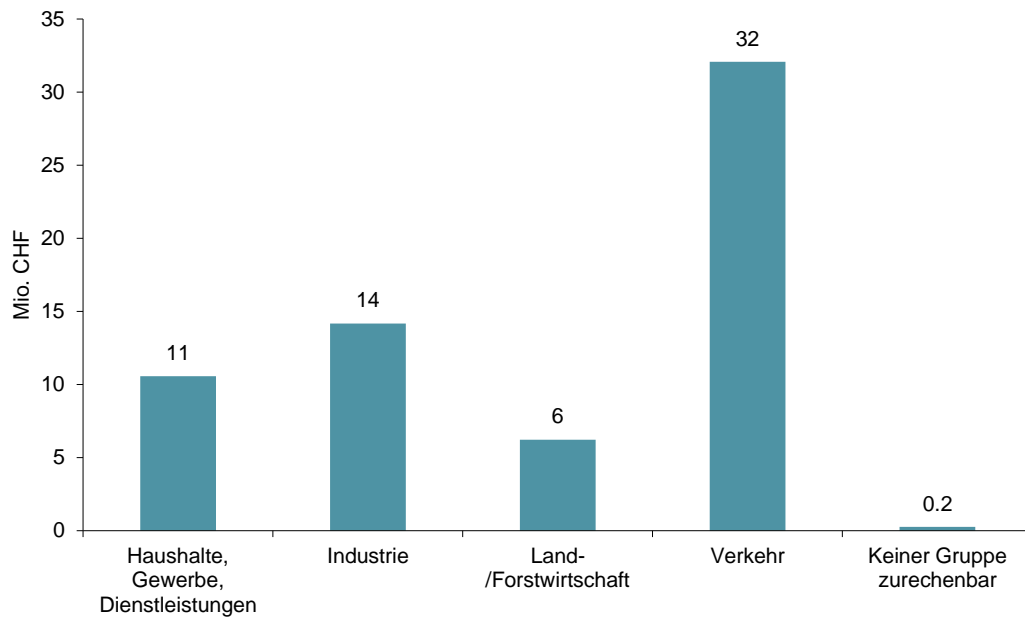
Figur 6: Luftschadstoffbedingte Kosten in der Stadt Winterthur im Jahr 2010 [Mio. CHF].

Die Verursachergruppen

Figur 14 zeigt die Aufteilung der luftschadstoffbedingten Kosten in Winterthur im Jahr 2010 auf die verschiedenen städtischen Verursachergruppen. Den grössten Anteil an den luftschadstoffbedingten Kosten hat mit 32 Mio. CHF der Verkehr, wobei fast 30 Mio. dem Strassenverkehr zuzuordnen sind. An zweiter Stelle steht mit 14 Mio. CHF die Gruppe

«Industrie», wobei hier vor allem Baumaschinen, industrielle Einzelquellen sowie industrielle und gewerbliche Prozesse relevant sind. An dritter und vierter Stelle stehen die Gruppen «Haushalt, Gewerbe, Dienstleistungen» und «Land-/Forstwirtschaft». Bei diesen sind Feuerungen, Vieh sowie landwirtschaftliche Fahrzeuge die wichtigsten Emittenten.

«Die Verursachergruppen in der Stadt Winterthur im Jahr 2010»



econcept

Figur 7: Aufteilung der luftschadstoffbedingten Gesamtkosten in der Stadt Winterthur im Jahr 2010 auf die Verursachergruppen

1 Einleitung

1.1 Ausgangslage und Auftrag

Die Kosten der Luftverschmutzung für den Kanton Zürich wurden letztmals für das Jahr 2000 ermittelt (econcept 2006). Die damalige Studie wies der Luftverschmutzung Kosten von 818 Mio. CHF zu, wobei der Verkehr und übrige mobile Quellen als die grössten Emittenten identifiziert wurden. Als grösste Schadensbereiche erwiesen sich die Gesundheit der belasteten Bevölkerung sowie die Gebäudefassaden, insbesondere an verkehrsbelasteten Standorten.

Inzwischen sind die damals ermittelten Werte veraltet: Zum einen hat sich die Belastungssituation verändert oder kann teilweise besser erfasst werden, zum anderen haben sich die Kosten für Gesundheitsdienste, Gebäuderenovationen und für vieles andere in den vergangenen zehn Jahren verändert.

Da das AWEL damals wie heute bei der Planung von Lufthygienemassnahmen auch ihr Kosten-Nutzenverhältnis berücksichtigt, besteht ein Bedürfnis nach aktuellen Kostenwerten. Aus diesem Grund werden die Kosten der Luftverschmutzung mit der vorliegenden Arbeit für das Jahr 2010 neu ermittelt. Ausserdem wird die Veränderung der Kosten zwischen 2000 und 2010 dargestellt sowie die Bedeutung der verschiedenen Kostentreiber quantifiziert.

Aufgrund neu verfügbarer oder veränderter Grundlagen und um die Veränderung der Kosten zwischen 2000 und 2010 konsistent darzustellen, werden im Rahmen des Projektes die luftschadstoffbedingten Kosten im Jahr 2010 *und* im Jahr 2000 neu berechnet. Hierzu wird in den verschiedenen Schadensbereichen eine literaturbasierte Überprüfung der Berechnungsmethodik bzw. der Dosis-Wirkungs-Relationen⁵ durchgeführt. Nicht möglich sind hingegen eigene empirische Untersuchungen zur Überprüfung oder Modifikation der Berechnungsmethodik.

Das konkrete Vorgehen beschreiben wir für jeden Schadensbereich im entsprechenden Berichtskapitel.

1.2 Analyserahmen und Aussagekraft

Perimeter

Wir betrachten die Wirkung von Luftschadstoffen im Kanton Zürich sowie in den Städten Zürich und Winterthur.

Schadstoffe

Seit der letztmaligen Ermittlung der Kosten der Luftverschmutzung (econcept 2006) haben sich die Prioritäten bei den Luftschadstoffen etwas verschoben: Schwefeldioxide sind

⁵ zum Beispiel Relation zwischen PM10-Konzentration und Erosion von Gebäudefassaden

zurzeit nicht mehr in relevanten Konzentrationen vorhanden und werden deswegen nicht mehr betrachtet. Relevant sind hingegen die folgenden Schadstoffe:

- Feinstaub (PM₁₀)
- Stickstoffoxide (NO_x)
- Ozon (O₃)
- Ammoniak (NH₃)

Schadensbereiche

Die aufgeführten Schadstoffe entfalten negative Wirkungen in den folgenden Bereichen:

- Gesundheit (der Wohnbevölkerung)
- Gebäude
- Wald
- Biodiversität
- Ernteertrag

Allerdings sind die verschiedenen Luftschadstoffe in den verschiedenen Schadensbereichen unterschiedlich relevant. Ebenso ist ihre Wirkung in den verschiedenen Schadensbereichen unterschiedlich gut untersucht, so dass nicht für jeden Luftschadstoff und jeden Schadensbereich Dosis-Wirkung-Relationen bekannt bzw. quantifiziert sind.

Territorialprinzip

Wie auch auf nationaler Ebene üblich, verwenden wir bei der Zuordnung der Kosten der Luftverschmutzung zu den verschiedenen Verursacherguppen das Territorialprinzip: Wir nehmen an, dass alle Immissionen innerhalb der Kantons Grenzen durch Emissionen innerhalb der Kantons Grenzen verursacht werden. Da aufgrund von räumlichen und meteorologischen Gegebenheiten davon ausgegangen werden kann, dass Schadstoffimporte und -exporte sich ungefähr die Waage halten, ist diese Annahme für den Kanton Zürich vertretbar.

Untersuchungszeitraum

Die vorliegende Studie verwendet (sofern nicht explizit anders deklariert) Emissions- und Immissionsdaten aus den Jahren 2000 und 2010.⁶ Beide Jahre zeichnen sich durch im langfristigen Trend unauffällige Immissionsmesswerte und Emissionszahlen aus. Die ermittelten Kosten beruhen folglich auf einer üblichen Belastungssituation und sind *nicht* durch Extremwerte geprägt, welche beispielsweise durch aussergewöhnlich lange Schönwetterperioden erreicht werden könnten.

⁶ Die verwendeten Emissions- und Immissionswerte für das Jahr 2000 stimmen nur teilweise mit den in econcept (2006) publizierten Werten überein, da zwischenzeitlich die zugrundeliegenden Modelle modifiziert wurden. Wenn nicht explizit anders deklariert, liegen den in diesem Bericht gezeigten Ergebnissen die aktuellen Modelle (OSTLUFT 2013) zugrunde.

At-least-Ansatz

Grundsätzlich wird bei allen folgenden Berechnungen ein «at-least-Ansatz» verwendet. Das heisst, alle Annahmen und Methoden sind so gewählt, dass eher eine Unterschätzung als eine Überschätzung der luftschadstoffbedingten Gesundheitskosten erfolgt.

Teilweise Entkoppelung der Emissions- und Kostenentwicklung

Während sich die Luftqualität zwischen 2000 und 2010 tendenziell weiter verbessert hat, haben die luftschadstoffbedingten Schadenskosten zugenommen. Zum einen sind in der Regel die Schadenkosten pro Fall oder Ereignis (Gesundheitskosten, Kosten für Gebäudesanierungen, etc.) gestiegen. Zum anderen haben die Bevölkerung sowie die belasteten Gebäudeflächen zugenommen. *Die Entwicklung der luftschadstoffbedingten Kosten in den einzelnen Bereichen und insgesamt kann folglich deutlich von der Entwicklung der Emissions- und/oder Immissionssituation abweichen.*

2 Gesundheitsschadenskosten

2.1 Vorgehen und Quellen

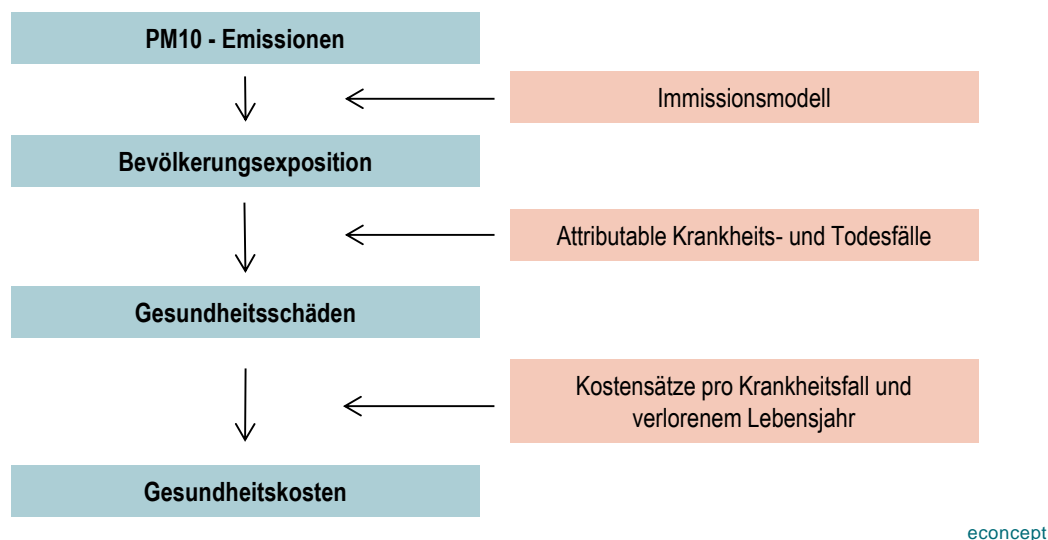
Die Schadstoffbelastung der Luft wirkt sich negativ auf die Gesundheit aus. Vor allem Atemwegs-, Herz-/Kreislaufkrankungen und aber auch Krebserkrankungen werden mit der Luftbelastung assoziiert. Mit zunehmender Belastung steigen somit die Mortalität und die Morbidität bei der belasteten Bevölkerung. Dies verursacht Gesundheitskosten, welche als Kosten der Luftverschmutzung angesehen werden müssen.

Zu den gesundheitsschädigenden Luftschadstoffen zählen insbesondere Partikel-Immissionen (PM10) sowie NO₂-, SO₂- und Ozonimmissionen. Für die quantitative Bewertung von luftschadstoffbedingten Gesundheitsschäden wird jedoch in der Regel PM10 als Leitschadstoff verwendet, da der Zusammenhang zwischen Feinstaubbelastung und Gesundheitsbeeinträchtigungen epidemiologisch gut untersucht und nachgewiesen ist. Ausserdem werden so Mehrfachzählungen verhindert, die bei einer Summierung der attributablen Krankheits- und Todesfälle pro Luftschadstoff auftreten würden. Dies ist allerdings mit dem Nachteil verbunden, dass Gesundheitsschäden, die unabhängig vom Leitschadstoff auftreten, nicht in die Berechnungen einfließen.

Für die Schweiz wurden die luftschadstoffbedingten Gesundheitskosten letztmals in ARE 2008 ermittelt: Die gesamte Luftverschmutzung (verursacht durch Verkehr, Industrie, Gewerbe, Haushalte sowie Land- und Forstwirtschaft) führte im Jahr 2005 in der Schweiz zu Kosten von 5'145 Mio. CHF. Für den Kanton Zürich wurden die luftschadstoffbedingten Gesundheitskosten erstmals in econcept (2006) geschätzt.

Ausgehend von ARE (2008) sowie econcept (2006) werden im vorliegenden Bericht die luftschadstoffbedingten Gesundheitskosten im Jahr 2010 ermittelt und für den Kanton Zürich und die Städte Zürich und Winterthur einzeln ausgewiesen. Um einen Vergleich über die Zeit zu ermöglichen, werden zusätzlich auch die luftschadstoffbedingten Gesundheitskosten im Jahr 2000 mit den aktuell verfügbaren Datengrundlagen neu berechnet.

Methodik zur Berechnung der Gesundheitskosten der Luftverschmutzung



Figur 8: Methodik mit welcher von den PM10 Emissionen auf die Gesundheitskosten der Luftverschmutzung geschlossen werden kann.

In Figur 8 ist die Methodik zur Ermittlung der luftschadstoffbedingten Gesundheitskosten dargestellt. Das Vorgehen orientiert sich weitgehend an ARE (2008) und econcept (2006), allerdings werden teilweise andere, neu verfügbare Datengrundlagen verwendet. Die wichtigsten Elemente der Methodik sind die folgenden:

- 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 werden aufgrund der geschätzten Anzahl der mit unterschiedlicher PM10-Belastung exponierten Bevölkerung berechnet. Dafür wird das Immissionsmodell OSTLUFT verwendet. Es werden die vier PM10-Immissionskategorien $<15/15-20/20-25/>25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ als Grundlage für die Berechnungen verwendet (mittlere Jahresbelastungen).
- Aufgrund der Anzahl exponierter Personen in den verschiedenen Immissionskategorien werden die attributablen Fälle der verschiedenen Krankheitsarten und Todesursachen berechnet. Die Anzahl attributable Fälle entspricht der Anzahl Krankheitsfälle, Spitaltage oder Todesfälle pro 100'000 Einwohner und Jahr, welche pro zusätzliche $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ PM10-Immissionsbelastung (mittlere Jahresbelastung) auftreten, sofern die Belastung höher ist als $7.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ PM10. Bei einer PM10-Immissionsbelastung von unter $7.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ PM10 treten keine messbaren Gesundheitsschäden auf.
- Die attributablen Krankheits- und Todesfälle werden mit den Kostensätzen aus ARE (2008) und NEEDS (2007) monetarisiert.

Die gesamten luftschadstoffbedingten Gesundheitskosten werden für den Kanton Zürich sowie die Städte Zürich und Winterthur separat berechnet und ausgewiesen. Ausserdem werden die Kosten gemäss den jeweiligen Anteilen an den PM10-Emissionen im Kanton

Zürich auf die Verursachergruppen Haushalte, Gewerbe, Dienstleistungen / Industrie / Land-, Forstwirtschaft / Verkehr aufgeteilt.

Tabelle 2 gibt einen Überblick über die verwendeten Quellen und zeigt, welche Inputs für die Berechnung im Vergleich zu econcept (2006) aktualisiert wurden.

Inputs für die Berechnung	Quellen	Aktualisierung bzw. Änderung gegenüber econcept 2006
PM-10 Immissionsbelastung und exponierte Bevölkerung pro Immissionskategorie	Modellierung OSTLUFT Volkszählung 2010	Ja
Attributable Fälle	ARE/BAFU 2004	Nein
Durchschnittliche Anzahl verlorener Lebensjahre pro Todesfall	ARE/BAFU 2004	Nein (Neue Daten erst ab 2014 verfügbar)
Nettoproduktionsausfallkosten	ARE/BAFU 2008 Volkswirtschaftliche Gesamtrechnung 2010 Nominallohnindex BFS	Ja
Behandlungskosten	ARE/BAFU 2008 Statistik der obligatorischen Krankenversicherung 2010 (Gesundheitskostenentwicklung)	Ja
Zahlungsbereitschaft Vermeidung	ARE/BAFU 2008 NEEDS 2007: New approaches for valuation of mortality and morbidity risks due to pollution Nominallohnindex BFS	Ja

Tabelle 2: Quellenübersicht Ermittlung Gesundheitskosten

2.2 Berechnungen und Teilergebnisse⁷

2.2.1 Exponierte Bevölkerung

Grundlage für die Berechnung der luftschadstoffbedingten Gesundheitskosten ist die aktuelle Schadstoffbelastung der Bevölkerung des Kantons Zürich im Jahr 2010. Im Einklang mit ARE (2008) wird wie bereits erwähnt PM10 als Leitschadstoff verwendet, da der Zusammenhang zwischen Feinstaubbelastung und Gesundheitsbeeinträchtigungen gut untersucht und nachgewiesen ist.

In der Schweiz gelten gemäss Luftreinhalte-Verordnung zwei Immissionsgrenzwerte für Feinstaub bzw. PM10:

— Langzeit-Grenzwert: 20 µg/m³ im Jahresmittel

⁷ Nachfolgend werden Berechnung und Teilergebnisse für das Jahr 2010 dargestellt. Die Berechnungen für das Jahr 2000 erfolgten analog.

- Kurzzeit-Grenzwert: Maximal ein Tag pro Jahr mit einem 24-h-Mittelwert grösser als $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$

Die bisherigen Messresultate zeigen, dass der Kurzzeit-Grenzwert öfter überschritten wird als der Langzeit-Grenzwert. Gemäss OSTLUFT (2006) wird bereits ab einem Jahresmittelwert von $14 \mu\text{g}/\text{m}^3$ der Kurzzeitgrenzwert mit einer Wahrscheinlichkeit von 50% überschritten, bei $16 \mu\text{g}/\text{m}^3$ bereits mit 75%. Aus diesem Grund werden bei der Berechnung der Gesundheitskosten auch Belastungsniveaus berücksichtigt, die unter dem Jahresmittelwert von $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ liegen. Die folgende Tabelle zeigt die PM10-Belastung der Wohnbevölkerung in Zürich:

PM10-Bevölkerungsexposition 2010, Jahresmittel						
Belastungsniveau	Kanton ZH		Stadt Zürich		Stadt Winterthur	
< $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$	217	0%	0	0%	0	0%
$15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ - $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$	869'277	63%	24'355	7%	58'439	58%
$20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ - $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$	497'099	36%	343'198	93%	42'763	42%
> $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$	2'574	0%	2'566	1%	0	0%
	1'369'167	0	370'119		101'202	

Tabelle 3 PM10 Exposition der Wohnbevölkerung (Anzahl Personen) des Kantons Zürich im Jahr 2010 (mittlere Jahresbelastung, Quelle OSTLUFT 2013, Volkszählung BFS)

Auffällig sind die deutlich unterschiedlichen Bevölkerungsexpositionen im Kanton und in den Städten. Während im gesamten Kanton rund ein Drittel der Bevölkerung einem PM10 Belastungsniveau von mehr als $20 \text{ Mikrogramm}/\text{m}^3$ ausgesetzt ist, sind in der Stadt Zürich 94% (Winterthur 42%) der Bevölkerung einer Belastung von mehr als $20 \text{ Mikrogramm}/\text{m}^3$ ausgesetzt.

2.2.2 Attributable Fälle

Die aktuellsten Angaben zu luftschadstoffbedingten Gesundheitsschäden liefert ARE (2004a). Die attributablen Fälle wurden ermittelt, indem verschiedene in- und ausländische Studien ausgewertet wurden. Alle verwerteten Studien verwenden lineare Dosis-Wirkungsbeziehungen, daher werden die attributablen Fälle als Anzahl Fälle pro zusätzliche $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ PM10-Belastung pro 100'000 Einwohner/innen und Jahr dargestellt, wobei nur Belastungen von über $7.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ relevant sind. Die folgende Tabelle zeigt die hier verwendeten Werte für die attributablen Krankheits- und Todesfälle:

Attributable Fälle durch zusätzliche 10 µg/m ³ PM10-Belastung pro 100'000 Einwohner und Jahr	
Erhöhte Gesamtsterblichkeit	44 Todesfälle
Erhöhte Säuglingssterblichkeit	0.3 Todesfälle
Spitalaufenthalte wegen Atemwegserkrankungen	60 Spitaltage
Spitalaufenthalte wegen Herz-/Kreislauferkrankungen	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 4: Attributable Krankheits- und Todesfälle durch zusätzliche 10 µg/m³ PM10-Belastung pro 100'000 Einwohner/innen pro Jahr ab einer Belastung von 7.5 µg/m³ (Quelle: ARE 2004)

2.2.3 Kosten pro Fall

Um die luftschadstoffbedingten Erkrankungen und Todesfall zu monetarisieren, werden im Folgenden Kostensätze zur Bewertung dieser Fälle hergeleitet. Die Gesundheitskosten umfassen:

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

Die Behandlungskosten sowie die Produktionsausfallkosten werden über Marktpreise ermittelt. Die immateriellen Kosten entsprechen der Zahlungsbereitschaft für die Vermeidung von Krankheiten und frühzeitigen Todesfällen und können mithilfe von Befragungsinstrumenten empirisch erhoben werden.

Der Kostensatz für die immateriellen Kosten eines verlorenen Lebensjahres wurde aus NEEDS (2007) übernommen. Dabei handelt es sich um die aktuellste, umfassende empirische Erhebung von Zahlungsbereitschaften für die Vermeidung eines frühzeitigen Todes. Der Kostensatz aus NEEDS (2007) wurde für die Berechnung der immissionsbedingten Gesundheitskosten von EUR in CHF umgerechnet und auf das Jahr 2010 nominallohnbereinigt. Der Kostensatz für den Produktionsausfall eines verlorenen Lebensjahres wurde neu errechnet⁸. Die Kostensätze für die Zahlungsbereitschaften zur Vermeidung der verschiedenen durch Luftschadstoffe geförderten Erkrankungen wurden nominallohnbereinigt aus ARE (2008) übernommen. Die Behandlungskosten wurden ebenfalls aus ARE (2008) übernommen und anhand der Preisindizes für Gesundheitspflege⁹ auf das Jahr 2010 angepasst. Die Produktionsausfallkosten der Erkrankungen entsprechen jeweils einem Prozentsatz der Produktionsausfallkosten eines verlorenen Lebensjahres. Die Prozentsätze wurden aus ARE (2008) übernommen. Die folgende Tabelle zeigt eine Übersicht über die resultierenden Kostensätze pro immissionsbedingtem Krankheits- bzw. Todesfall:

⁸ Methodik zur Berechnung siehe A-3

⁹ Statistik der obligatorischen Krankenversicherung (2010)

Kostensätze pro Krankheits- und Todesfall (in CHF)	Zahlungsbereitschaft	Behandlungskosten	Produktionsausfall*	Total
Verlorenes Lebensjahr	53'364	-	6'763	60'128
Spitaltage Atemwegserkrankung	859	851	34	1'745
Spitaltage Herz-/Kreislaufkrankung	859	1'089	34	1'983
Chronische Bronchitis bei Erwachsenen	455'199	6'809	237	462'245
Akute Bronchitis bei Kindern	285	54	-	339
Asthmaanfälle bei Erwachsenen	68	1	16	85
Tage mit eingeschränkter Aktivität	205	-	16	221

Tabelle 5: Verwendete Kostensätze zur Bewertung der immissionsbedingten Gesundheitskosten [CHF/Fall] (Quelle: ARE 2008, ARE 2004, NEEDS 2007, Statistik der obligatorischen Krankenversicherung 2010, Volkswirtschaftliche Gesamtrechnung des BFS, Bevölkerungsstatistik des BFS, Nominallohnindex Schweiz BFS, eigene Berechnungen.)

*inkl. Wiederbesetzungskosten (ARE 2008)

Mittels dieser Kostensätze können die attributablen Krankheits- und Todesfälle im Kanton Zürich und den Städten Zürich und Winterthur bewertet werden.

2.2.4 Berechnung Gesamtkosten

In einem ersten Schritt werden die im Kanton Zürich und den Städten Zürich und Winterthur aufgrund der PM10 Exposition der Zürcher Bevölkerung zu erwartenden zusätzlichen Krankheits- und Todesfälle pro Jahr (attributable Fälle) berechnet. In einem zweiten Schritt werden die zusätzlichen Krankheits- und Todesfälle mit den Kostensätzen von Tabelle 5 bewertet.

Die Multiplikation der Bevölkerungszahl, die von einer bestimmten PM10-Schadstoffexposition betroffen ist, mit der Anzahl attributabler Fälle ergibt die folgenden luftschadstoffbedingten Krankheits- und Todesfälle in Zürich:

Krankheits- und Todesfälle aufgrund der PM10-Belastung	Kanton ZH	Stadt Zürich	Stadt Winterthur	
Erhöhte Gesamtsterblichkeit	713	239	54	Todesfälle
Erhöhte Säuglingssterblichkeit	5	2	0	Todesfälle
Spitalaufenthalte wegen Atemwegserkrankungen	972	327	74	Spitaltage
Spitalaufenthalte wegen Herz-/Kreislaufkrankungen	1'896	637	143	Spitaltage
Chronische Bronchitis bei Erwachsenen	194	65	15	Neuerkrankungen
Akute Bronchitis bei Kindern	7'761	2'607	587	Fälle
Asthmaanfälle bei Erwachsenen	7'874	2'645	596	Fälle
Tage mit eingeschränkter Aktivität	340'773	114'479	25'783	Tage

Tabelle 6: Krankheits- und Todesfälle aufgrund der PM10-Belastung für das Jahr 2010.

Die Multiplikation der immissionsbedingten Krankheits- und Todesfälle mit den in Tabelle 5 dargestellten Kostensätzen pro Krankheitsfall bzw. Todesfall ergibt die folgenden Gesundheitskosten für das Jahr 2010:

Kosten gesamt in Mio. CHF	Kanton ZH	Stadt Zürich	Stadt Winterthur
Frühzeitige Todesfälle	485.7	163.2	36.8
Spitalaufenthalte wegen Atemwegserkrankungen	1.7	0.6	0.1
Spitalaufenthalte wegen Herz-/Kreislaferkrankungen	3.8	1.3	0.3
Chronische Bronchitis bei Erwachsenen	89.9	30.2	6.8
Akute Bronchitis bei Kindern	2.6	0.9	0.2
Asthmaanfälle bei Erwachsenen	0.7	0.2	0.1
Tage mit eingeschränkter Aktivität	75.4	25.3	5.7
Summe	659.8	221.6	49.9

Tabelle 7: Gesundheitskosten der Luftverschmutzung im Jahr 2010.

Für die exakte Berechnung der Kosten von immissionsbedingten Todesfällen wären umfangreiche Berechnungen anhand von Sterbetafeln notwendig, bei denen die Überlebenswahrscheinlichkeiten für bestimmte Altersklassen für eine Referenzsituation sowie für eine Situation mit einer bestimmten Luftverschmutzung einfließt. (s. ARE 2004a, S. 133f.). Die Berechnung nach besagter Methode ist sehr aufwendig und wird erst ab 2014 in aktualisierter Form verfügbar sein¹⁰. Alternativ werden deshalb 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 3'746 Personen frühzeitig aufgrund von Luftverschmutzung, dies entspricht insgesamt 42'449 verlorenen Lebensjahren. Bei einem Todesfall durch Luftverschmutzung sind demnach durchschnittlich 11.3 verlorene Lebensjahre zu beklagen. Durch Multiplikation der Anzahl frühzeitiger Todesfälle mit den durchschnittlich verlorenen Lebensjahren pro Todesfall und dem Kostensatz für ein verlorenes Lebensjahr werden die gesamten Gesundheitskosten eines frühzeitigen Todes durch Luftverschmutzung berechnet.

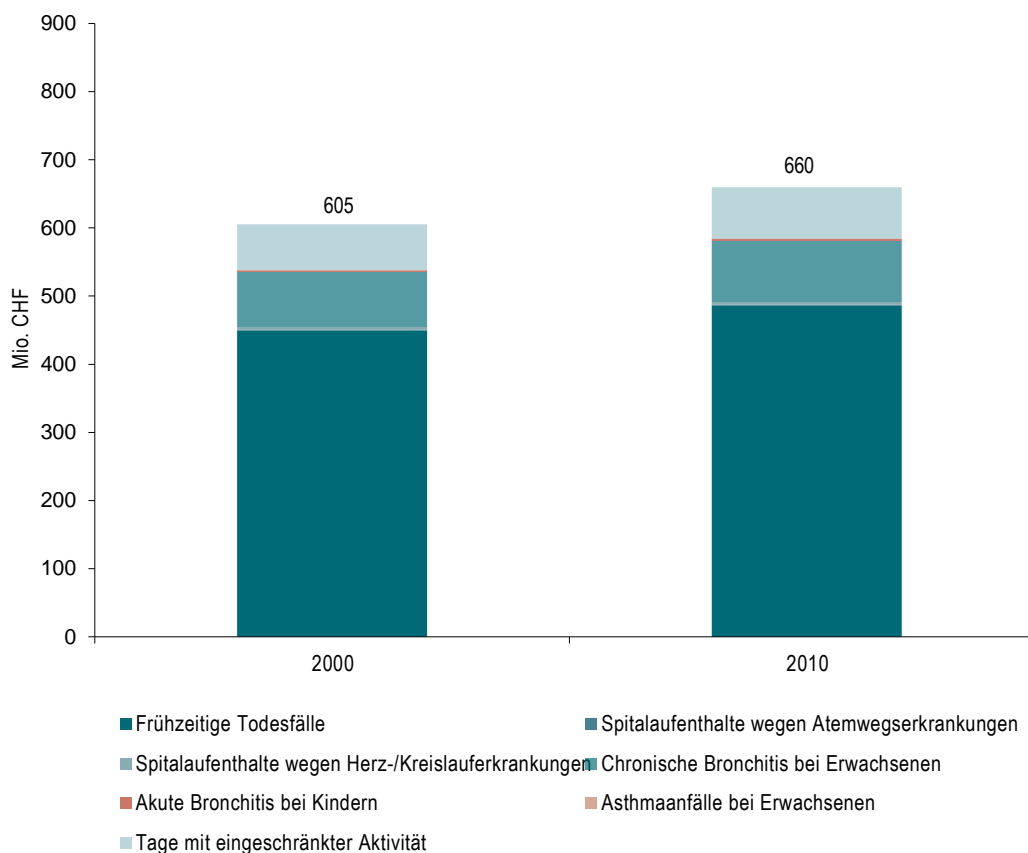
2.3 Ergebnisse

2.3.1 Kanton Zürich

Die luftschadstoffbedingten Gesundheitskosten betragen im Kanton Zürich im Jahr 2010 rund **660 Mio. CHF**.

¹⁰ Auskunft von Prof. Martin Röösli, Unit Environmental Exposures and Health, Schweizerisches Tropen- und Public Health-Institut, Universität Basel.

Luftschadstoffbedingte Gesundheitskosten im Kanton Zürich



econcept

Figur 9: Veränderung der Luftschadstoffbedingten Gesundheitskosten im Kanton Zürich über 10 Jahre.

Die immissionsbedingten Gesundheitskosten der Jahre 2000 und 2010 und die Veränderung über die 10 Jahre sind in untenstehender Tabelle abgebildet:

Kosten Gesamt in Mio. CHF	2000 Kanton ZH	2010 Kanton ZH	Veränderung
Frühzeitige Todesfälle	449.6	485.7	8.0%
Spitalaufenthalte wegen Atemwegserkrankungen	1.6	1.7	9.2%
Spitalaufenthalte wegen Herz-/Kreislaufkrankungen	3.5	3.8	8.9%
Chronische Bronchitis bei Erwachsenen	80.8	89.9	11.2%
Akute Bronchitis bei Kindern	2.4	2.6	9.5%
Asthmaanfälle bei Erwachsenen	0.6	0.7	15.9%
Tage mit eingeschränkter Aktivität	66.8	75.4	12.8%
Summe	605	660	9.0%
Summe pro Kopf	494 CHF	482 CHF	-2.5%

Tabelle 8: Veränderung der Gesundheitskosten durch Luftverschmutzung im Kanton Zürich

Die immissionsbedingten Gesundheitskosten im Kanton Zürich sind von 2000 bis 2010 gesamthaft um 9% gestiegen. Für die Veränderung der Kosten sind drei Faktoren verantwortlich: Die Bevölkerungsexposition, das Bevölkerungswachstum und die verwendete

ten Kostensätze. Die gesamthafte Kostensteigerung von 9% setzt sich wie folgt zusammen:

— Veränderte Bevölkerungsexposition:	-10.0%
— Bevölkerungswachstum:	+11.8%
— Veränderte Kostensätze:	+8.3%

Die mittlere Bevölkerungsexposition von PM10 ist in den letzten 10 Jahren gesunken. Weniger Personen leben heute in stark belasteten Gebieten als noch im Jahr 2000. Dies verringert die immissionsbedingten Gesundheitskosten um 10%. Das Bevölkerungswachstum im Kanton Zürich der letzten 10 Jahre führt zu einer Kostensteigerung von 11.8%. Die verwendeten Kostensätze führen zusätzlich zu einer Steigerung der immissionsbedingten Gesundheitskosten von 8.3%. Insgesamt resultiert so eine Kostensteigerung von 9%¹¹.

Hätte sich zwischen 2000 und 2010 nur die PM10 Belastung verändert und die Bevölkerungszahl sowie die Kostensätze wären konstant geblieben, wären folglich die luftschadstoffbedingten Gesundheitskosten um 60 Millionen CHF auf 545 Mio. CHF gesunken.

Wäre hingegen die Luftbelastung zwischen 2000 und 2010 konstant geblieben und hätten sich nur die Bevölkerungszahl und die Kostensätze verändert, wären die luftschadstoffbedingten Gesundheitskosten um 128 Mio. CHF auf 733 Mio. CHF gestiegen.

2.3.2 Städte Zürich und Winterthur

Die luftschadstoffbedingten Gesundheitskosten der Städte Zürich und Winterthur wurden methodisch analog zum Kanton Zürich berechnet. Attributable Krankheitsfälle und Kostensätze sind dieselben, die Bevölkerungsexposition wurde gemässe Tabelle 3 verwendet. Die luftschadstoffbedingten Gesundheitskosten betragen in den Städten Zürich und Winterthur im Jahr 2010 rund **222 Mio. CHF**, respektive **50 Mio. CHF**.

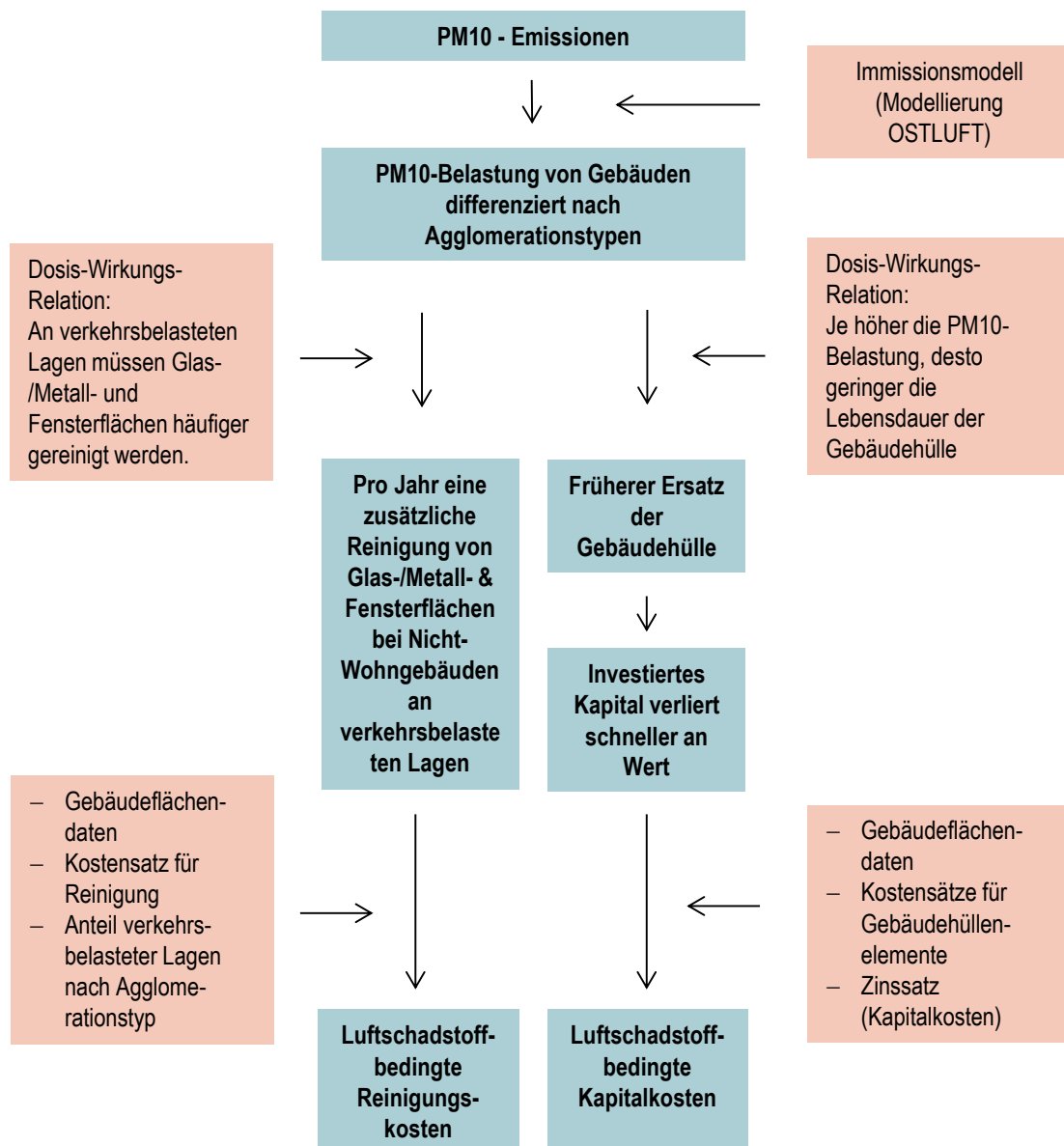
¹¹ $\text{Kosten}^{\text{neu}} = \text{Kosten}^{\text{alt}} * (1 - 10.0\%) * (1 + 11.8\%) * (1 + 8.3\%) = \text{Kosten}^{\text{alt}} * (1 + 9\%)$

3 Gebäudeschadenskosten

3.1 Vorgehen und Quellen

Bei Gebäuden, die durch den Verkehr oder andere Emittenten belastet sind, zeigt sich schneller als bei unbelasteten Gebäuden ein Grauschleier: Die Luftschadstoffe NO_x, SO₂, O₃, PM₁₀ sowie andere Staub- und Russpartikel verursachen Verschmutzungen und Korrosion von Bauteilen. Dies führt dazu, dass die Fassaden häufiger gereinigt und/oder renoviert werden müssen. Dadurch entstehen luftschadstoffbedingte Gebäudeschadenskosten.

«Methodik zur Berechnung der luftschadstoffbedingten Gebäudeschadenskosten»



Figur 10: Methodik zur Berechnung der luftschadstoffbedingten Gebäudeschadenskosten. In Anlehnung an ARE 2004.

Figur 10 zeigt das Vorgehen zur Berechnung der Gebäudeschadenskosten:

- Mithilfe des Immissionsmodells OSTLUFT wird die PM10-Belastungssituation (mittlere Jahresbelastung) in den verschiedenen Agglomerationstypen¹² im Kanton Zürich bestimmt.
- Aus ARE 2004 sind die Dosis-Wirkungs-Relationen zwischen PM10-Belastung und Erneuerungs- bzw. Reinigungsfrequenzen bekannt:
 - Je höher die PM10-Belastung, desto kürzer die Lebensdauer der Gebäudehülle und desto höher die Erneuerungsfrequenz.
 - An verkehrsbelasteten Lagen ist im Vergleich zu nicht verkehrsbelasteten bei Glas-, Metall- und Fensterflächen von Nicht-Wohngebäuden¹³ eine zusätzliche Reinigung pro Jahr notwendig.
- Die höheren Erneuerungs- und Reinigungsfrequenzen führen zu Kosten:
 - Höhere Erneuerungsfrequenzen führen dazu, dass Investitionen über kürzere Zeiträume abgeschrieben werden müssen. Dies führt im Vergleich zu einer Situation ohne PM10-Belastung zu höheren jährlichen Kapitalkosten. Diese luftschadstoffbedingten Kapitalkosten können unter Verwendung von Flächendaten, Kostensätzen von Gebäudehüllenelementen und Zinssätzen berechnet werden.
 - Höhere Reinigungsfrequenzen bei Glas-, Metall- und Fensterflächen von Nicht-Wohngebäuden an verkehrsbelasteten Lagen führen zu höheren Reinigungskosten. Diese können unter Verwendung von Flächendaten, Kostensätzen für die Reinigung von Glas-, Metall- und Fensterflächen sowie dem Anteil von verkehrsbelasteten Lagen pro Agglomerationstyp berechnet werden.

Tabelle 9 zeigt, auf Basis welcher Quellen die luftschadstoffbedingten Kapital- und Reinigungskosten berechnet und welche Daten aktualisiert werden. Bei den Reinigungskosten ist zu beachten, dass aufgrund der Methodik keine aktuellen Immissionsdaten berücksichtigt werden können: Die Reinigungskosten basieren folglich auf der Immissionssituation im Erhebungsjahr der Dosis-Wirkungs-Relation (2003/2004). Die Veränderung der Reinigungskosten über die Zeit ergibt sich aus der Veränderung der Flächendaten und der Nominallohnentwicklung.

¹² Agglomerationstypen gemäss Volkszählung Bundesamt für Statistik 2000.

¹³ Gemäss ARE 2004 konnten die Reinigungskosten von Wohngebäuden nicht mit genügender Verlässlichkeit geschätzt werden. Aus diesem Grund werden bei den Reinigungskosten nur Nicht-Wohngebäude an verkehrsbelasteten Lagen berücksichtigt, welche in der Regel durch professionelle Anbieter gereinigt werden.

	Input für die Berechnung	Quelle	Aktualisierung bzw. Änderung gegenüber econcept 2006
Immissionsdaten	PM10-Immissionen im Kanton Zürich 2010 und 2000 (Differenziert nach Agglomerationstyp)	OSTLUFT 2013	Ja
Flächendaten	Fassadenflächen Kanton Zürich, Stadt Zürich und Stadt Winterthur im Jahr 2010 und 2000 (Differenziert Agglomerationstyp, Fassadenbauart und Gebäudenutzung)	Projektspezifische Auswertung Gebäudedatenbank Wüest&Partner 2012	Ja
	Anteil verkehrsbelasteter Fassadenflächen	ARE 2004 bzw. Gebäudedatenbank Wüest&Partner 2003/2004, BFS/GEOSTAT 2003 und BUWAL/SAEFL 2003	Nein
Dosis-Wirkungs-Relationen	Dosis-Wirkungs-Relation zwischen PM10-Immission und Verkürzung der Fassadenlebensdauer	ARE 2004	Nein
	Dosis-Wirkungs-Relation zwischen PM10-Immission und Reinigungsfrequenzen	ARE 2004	Nein
Kostensätze und Zinssatz	Kosten verschiedener Fassadenbauarten [CHF/m ²]	ARE 2004 und ARE 2008 Baukostenindex Hochbau des BFS	Ja
	Reinigungskosten für Fensterflächen [CHF/m ²]	ARE 2004 und ARE 2008 Nominallohnindex des BFS	Ja
	Realzinssatz (langfristige durchschnittliche reale Kapitalkosten)	Zinsinformationen SNB und diverse Geschäftsbanken	Ja, aber keine Änderung

Tabelle 9: Quellenübersicht Ermittlung Gebäudeschadenskosten.

Nicht berücksichtigt werden Schäden an Kunst- und Baudenkmälern.

3.2 Berechnungen und Teilergebnisse¹⁴

3.2.1 Luftschadstoffbedingte Kapitalkosten durch kürzere Lebenszeiten von Fassaden

Tabelle 11 und Tabelle 12 zeigten die Berechnung der luftschadstoffbedingten Kapitalkosten im Kanton Zürich sowie den Städten Zürich und Winterthur, wobei die Stadt Zürich der einzigen «Metropole» im Kanton entspricht. Jeweils differenziert nach Agglomerationstyp und Fassadenbauart fliessen die PM10-Belastung, die Gebäudeflächen sowie die Kosten der Bauteile in die Berechnungen ein. Die Berechnungsschritte sind die Folgenden:

- Die Flächen multipliziert mit den Kosten der Bauteile ergibt die Investitionssumme.

¹⁴ Nachfolgend werden Berechnung und Teilergebnisse für das Jahr 2010 dargestellt. Die Berechnungen für das Jahr 2000 erfolgten analog.

- Die Lebensdauer *ohne* PM10-Belastung (45 Jahre) ist eine durch die Erfahrungswerte der Baubranche begründete Annahme (ARE 2004).
- Die Lebensdauer *mit* PM10-Belastung wurde mithilfe der Dosis-Wirkungs-Relation aus ARE (2004)¹⁵ berechnet.
- Die Annuitätenfaktoren werden auf Basis der Lebensdauer und des Zinssatzes (2%) berechnet. Die Formel für die Annuitätenfaktoren lautet:

$$\frac{\text{Zinssatz}}{1 - (1 + \text{Zinssatz})^{-\text{Lebensdauer}}}$$

- Die Investitionssumme multipliziert mit den Annuitätenfaktoren mit und ohne PM10-Belastung ergibt die Kapitalkosten mit und ohne PM10-Belastung.
- Die Differenz der Kapitalkosten mit und ohne PM10-Belastung entspricht den luftschadstoffbedingten Kapitalkosten.

Im Kanton Zürich betragen die luftschadstoffbedingten Kapitalkosten wegen verkürzter Lebenszeit der Gebäudehülle im Jahr 2010 rund 157.7 Mio. CHF. Davon entfallen rund 67.2 Mio. CHF auf die Stadt Zürich und 11.7 Mio. CHF auf die Stadt Winterthur.

Die luftschadstoffbedingten Kapitalkosten pro m² Gebäudefläche (Fassadenfläche inklusive Türen, Tore, Fenster) sind in der Stadt Zürich mit 2.1 CHF im Jahr 2010 am grössten, da hier auch die mittlere jährliche PM10-Belastung am höchsten ist. Ebenfalls eine Rolle spielen die Anteile der verschiedenen Fassadenbauarten: In der Stadt Zürich ist der Anteil der günstigen verputzten Fassaden mit 53% überdurchschnittlich hoch, sonst wären die Kosten pro m² noch etwas höher. In den ländlichen Gemeinden ist der Anteil der Fensterflächen tiefer als in den übrigen Agglomerationstypen. Zusammen mit der geringen PM10-Belastung führt dies zu relativ tiefen luftschadstoffbedingten Kapitalkosten von nur 0.6 CHF pro m².

Anteile der verschiedenen Fassadenbauarten in den verschiedenen Gemeindetypen					
Metropolen (Stadt Zürich)	Metropolen (Stadt Zürich)	Agglomerationen von Metropolen	Kerngemeinden	Sonstige Agglomerationen	Ländliche Gemeinden
Verputzt	53%	45%	49%	46%	44%
Roh	6%	10%	8%	9%	8%
Glas/Metall	2%	2%	2%	2%	1%
Vorgehängt	13%	17%	16%	19%	25%
Türen/Tore	3%	3%	3%	3%	3%
Fenster	23%	23%	22%	21%	19%

Tabelle 10: Anteile der verschiedenen Fassadenbauarten in den verschiedenen Gemeindetypen

In Winterthur liegen die luftschadstoffbedingten Kapitalkosten mit 1.4 CHF pro m² und Jahr in der Mitte der vorhandenen Bandbreite (Spalte ganz rechts in Tabelle 11 und Tabelle 12).

¹⁵ S. 46-48.

Luftschadstoffbedingte Kapitalkosten durch Verkürzung der Lebensdauer der Gebäudehülle im Kanton Zürich im Jahr 2010													
	Fassadenbauart	Durchschnittliche PM10-Belastung	Flächen [m2]	Kosten der Bauteile [CHF/m2]	Investitionssumme [Mio. CHF]	Situation ohne PM10-Belastung			Situation mit PM10-Belastung			Luftschadstoffbedingte Kapitalkosten	
						Lebensdauer [Jahre]	Annuitätenfaktor	Kapitalkosten [Mio. CHF]	Lebensdauer [Jahre]	Annuitätenfaktor Lebensdauer	Kapitalkosten [Mio. CHF]	[Mio. CHF]	CHF/m²
Metropolen (Stadt Zürich)	Verputzt	20.7	17'423'321	105	1'837	45	0.034	62	34	0.041	76	13.2	
	Roh	20.7	1'893'201	245	464	45	0.034	16	34	0.041	19	3.3	
	Glas/Metall	20.7	793'834	469	372	45	0.034	13	34	0.041	15	2.7	
	Vorgehängt	20.7	4'120'160	257	1'058	45	0.034	36	34	0.041	43	7.6	
	Türen/Tore	20.7	859'566	469	403	45	0.034	14	34	0.041	17	2.9	
	Fenster	20.7	7'517'215	692	5'203	45	0.034	176	34	0.041	214	37.4	
	Total												67.2
Agglomerationen von Metropolen	Verputzt	18.3	26'344'838	105	2'778	45	0.034	94	38	0.038	105	10.5	
	Roh	18.3	5'535'181	245	1'357	45	0.034	46	38	0.038	51	5.2	
	Glas/Metall	18.3	1'388'528	469	651	45	0.034	22	38	0.038	25	2.5	
	Vorgehängt	18.3	10'102'531	257	2'593	45	0.034	88	38	0.038	98	9.8	
	Türen/Tore	18.3	1'643'378	469	770	45	0.034	26	38	0.038	29	2.9	
	Fenster	18.3	13'193'822	692	9'133	45	0.034	310	38	0.038	344	34.7	
	Total												65.6
Kerngemeinden	Verputzt	19.0	4'904'292	105	517	45	0.034	18	37	0.039	20	2.5	
	Roh	19.0	779'812	245	191	45	0.034	6	37	0.039	7	0.9	
	Glas/Metall	19.0	233'742	469	110	45	0.034	4	37	0.039	4	0.5	
	Vorgehängt	19.0	1'612'905	257	414	45	0.034	14	37	0.039	16	2.0	
	Türen/Tore	19.0	279'378	469	131	45	0.034	4	37	0.039	5	0.6	
	Fenster	19.0	2'264'003	692	1'567	45	0.034	53	37	0.039	60	7.5	
	Total												14.1

Luftschadstoffbedingte Kapitalkosten durch Verkürzung der Lebensdauer der Gebäudehülle im Kanton Zürich im Jahr 2010													
	Fassadenbauart	Durchschnittliche PM10-Belastung	Flächen [m2]	Kosten der Bauteile [CHF/m2]	Investitionssumme [Mio. CHF]	Situation ohne PM10-Belastung			Situation mit PM10-Belastung			Luftschadstoffbedingte Kapitalkosten	
						Lebensdauer [Jahre]	Annuitätenfaktor	Kapitalkosten [Mio. CHF]	Lebensdauer [Jahre]	Annuitätenfaktor Lebensdauer	Kapitalkosten [Mio. CHF]	[Mio. CHF]	CHF/m²
Sonstige Agglomeration	Verputzt	17.7	3'560'724	105	375	45	0.034	13	39	0.037	14	1.1	
	Roh	17.7	696'971	245	171	45	0.034	6	39	0.037	6	0.5	
	Glas/Metall	17.7	128'289	469	60	45	0.034	2	39	0.037	2	0.2	
	Vorgehängt	17.7	1'472'019	257	378	45	0.034	13	39	0.037	14	1.1	
	Türen/Tore	17.7	233'729	469	110	45	0.034	4	39	0.037	4	0.3	
	Fenster	17.7	1'624'029	692	1'124	45	0.034	38	39	0.037	41	3.3	
	Total												6.7
Ländliche Gemeinden	Verputzt	17.2	2'948'097	105	311	45	0.034	11	41	0.036	11	0.7	
	Roh	17.2	555'886	245	136	45	0.034	5	41	0.036	5	0.3	
	Glas/Metall	17.2	70'305	469	33	45	0.034	1	41	0.036	1	0.1	
	Vorgehängt	17.2	1'632'868	257	419	45	0.034	14	41	0.036	15	0.9	
	Türen/Tore	17.2	199'705	469	94	45	0.034	3	41	0.036	3	0.2	
	Fenster	17.2	1'227'419	692	850	45	0.034	29	41	0.036	31	1.9	
	Total												4.2
Gesamttotal Kanton Zürich												157.7	

Tabelle 11: Kapitalkosten, die durch eine luftschadstoffbedingte bedingte Verkürzung der Lebensdauer der Gebäudehülle entstehen, im Kanton Zürich im Jahr 2010. Die Annuitätenfaktoren sind mit einem Zinssatz von 2% gerechnet. Quellen: Siehe Tabelle 9.

Luftschadstoffbedingte Kapitalkosten durch Verkürzung der Lebensdauer der Gebäudehülle in der Stadt Winterthur im Jahr 2010												
	Durchschnittliche PM10-Belastung	Flächen [m ²]	Kosten der Bauteile [CHF/m ²]	Investitionssumme [Mio. CHF]	Situation <i>ohne</i> PM10-Belastung			Situation <i>mit</i> PM10-Belastung			Luftschadstoffbedingte Kapitalkosten	
					Lebensdauer [Jahre]	Annuitätenfaktor	Kapitalkosten [Mio. CHF]	Lebensdauer [Jahre]	Annuitätenfaktor	Kapitalkosten [Mio. CHF]	[Mio. CHF]	CHF/m ²
Verputzt	19.0	4'142'559	105	437	45	0.034	15	37	0.039	17	2.1	
Roh	19.0	647'597	245	159	45	0.034	5	37	0.039	6	0.8	
Glas/Metall	19.0	195'512	469	92	45	0.034	3	37	0.039	4	0.4	
vorgehängt	19.0	1'345'757	257	345	45	0.034	12	37	0.039	13	1.7	
Türen/Tore	19.0	233'642	469	110	45	0.034	4	37	0.039	4	0.5	
Fenster	19.0	1'882'933	692	1'303	45	0.034	44	37	0.039	50	6.3	
Total											11.7	1.4

Tabelle 12: Kapitalkosten, die durch eine luftschadstoffbedingte Verkürzung der Lebensdauer der Gebäudehülle entstehen, in der Stadt Winterthur im Jahr 2010. Quellen: Siehe Tabelle 9.

3.2.2 Luftschadstoffbedingte Reinigungskosten

Tabelle 13 zeigt die Berechnung der luftschadstoffbedingten Reinigungskosten:

- Zuerst wurden die Glas-, Metall und Fensterflächen von Nicht-Wohngebäuden differenziert nach Agglomerationstypen ermittelt. (Auswertung der von Wüest&Partner gelieferten Gebäudedaten.)
- In einem zweiten Schritt werden diese mit dem Anteil verkehrsbelasteter Flächen in den Agglomerationstypen multipliziert. So ergeben sich die verkehrsbelasteten Glas-, Metall-, und Fensterflächen von Nicht-Wohngebäuden.
- Schliesslich werden die im zweiten Schritt ermittelten Flächen mit den Kosten für eine zusätzliche Reinigung pro Jahr multipliziert.

Die luftschadstoffbedingten Reinigungskosten betragen im Jahr 2010 im Kanton Zürich rund 12.8 Mio. CHF. Davon entfallen rund 6.4 Mio. auf die Stadt Zürich und rund 1.0 Mio. CHF auf die Stadt Winterthur.

Berechnung der luftschadstoffbedingten Reinigungskosten im Jahr 2010 bei Nicht-Wohngebäuden an verkehrsbelasteten Lagen					
Agglomerationstyp	Glas-, Metall und Fensterflächen von Nicht-Wohngebäuden [m ²]	Anteil verkehrsbelastete Flächen	Verkehrsbelastete Glas-, Metall-, und Fensterflächen von Nicht-wohngebäuden [m ²]	Kosten für eine zusätzliche Reinigung pro Jahr [CHF/m ²]	Kosten [Mio. CHF]
Metropolen (Stadt Zürich)	3'893'864	31.20%	1'214'886	5.24	6.4
Agglomerationen von Metropolen	5'125'840	17.10%	876'519	5.24	4.6
Kerngemeinden	1'011'087	22.20%	224'461	5.24	1.2
Sonstige Agglomeration	538'556	16.50%	88'862	5.24	0.5
Ländliche Gemeinden	474'115	8.40%	39'826	5.24	0.2
Total Kanton Zürich	11'043'462		2'444'553		12.8
Stadt Winterthur	856'888	22.20%	190'229	5.24	1.0

Tabelle 13: Berechnung der luftschadstoffbedingten Reinigungskosten. Quellen: Siehe Tabelle 9.

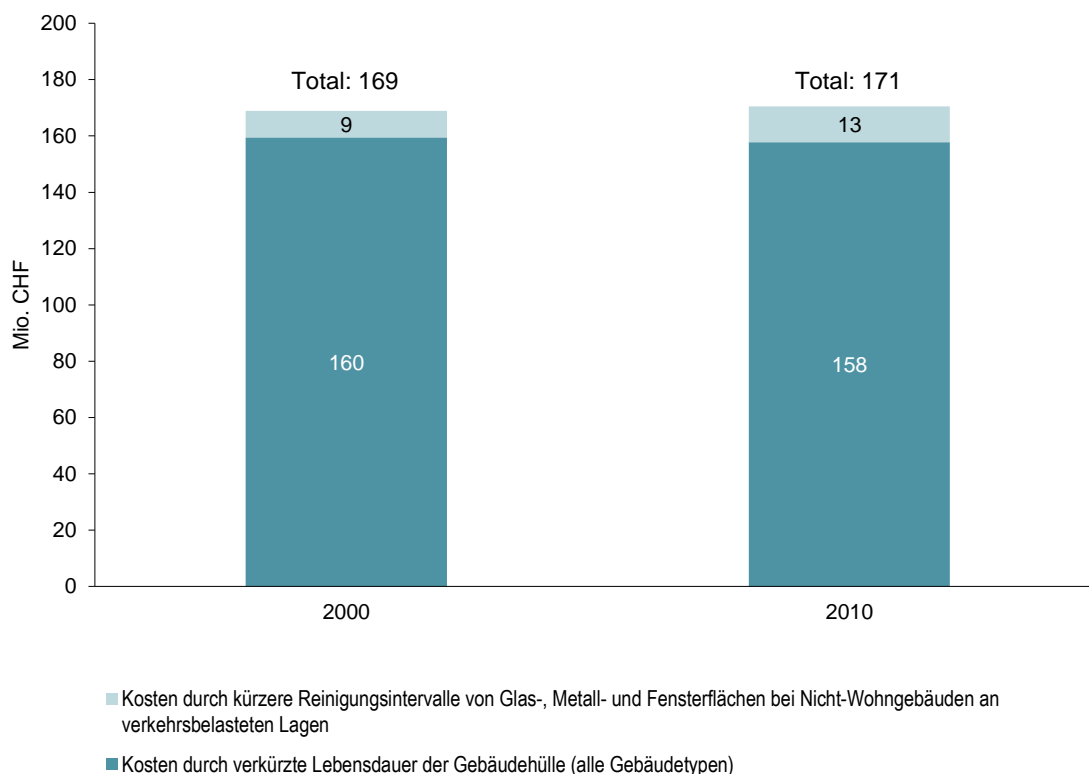
Wie bereits im Kapitel 3.1 Vorgehen und Quellen beschrieben, fliessen in die Berechnung der Reinigungskosten mangels besserer Grundlagen keine PM10-Emissionswerte oder PM10-Immissionswerte ein. Da die PM10-Immissionen im betrachteten Zeitraum zurückgegangen sind, dürften die luftschadstoffbedingten Reinigungskosten im Jahr 2010 eher überschätzt werden.

3.3 Ergebnisse

3.3.1 Kanton Zürich

Figur 11 zeigt die luftschadstoffbedingten Gebäudeschadenskosten im Kanton Zürich in den Jahren 2000 und 2010.

Luftschadstoffbedingte Gebäudeschadenskosten im Kanton Zürich



econcept

Figur 11: Luftschadstoffbedingte Gebäudeschadenskosten in Kanton Zürich in den Jahren 2000 und 2010.

Die luftschadstoffbedingten Gebäudeschadenskosten betragen im Jahr 2010 rund 171 Mio. CHF/Jahr und sind zwischen 2000 und 2010 um rund 0.9% gestiegen. Dieser leichte Anstieg ist das Ergebnis mehrerer, teils gegenläufiger Effekte: Die PM10-Belastung ist zwar in allen Agglomerationstypen deutlich zurückgegangen¹⁶, aber die Gebäudeflächen sowie die Hochbau- und Reinigungspreise sind so stark gestiegen, dass insgesamt ein leichter Anstieg der luftschadstoffbedingten Kosten resultiert.

Der Gesamteffekt setzt sich wie folgt zusammen:

- Hätte sich zwischen 2000 und 2010 nur die PM10-Belastung verändert und wären die Gebäudeflächen und das Preisniveau gleich geblieben, wären die luftschadstoffbedingten Gebäudeschadenskosten um 23% auf 130 Mio. CHF/Jahr gesunken.

¹⁶ Die durchschnittliche PM10-Belastung ist zwischen 2000 und 2010 um 1.1 µg/m³ zurückgegangen.

- Wäre hingegen die PM10-Belastung zwischen 2000 und 2010 konstant geblieben und hätten sich nur die Flächen und die Hochbaupreise verändert, wären die luftschadstoffbedingten Gebäudeschadenskosten um 31% auf 222 Mio. CHF/Jahr gestiegen.

Dank der Senkung der PM10-Immissionen wurden im Jahr 2010 im Kanton Zürich folglich Ausgaben von rund 51 Mio. CHF vermieden.

3.3.2 Städte Zürich und Winterthur

Rund die Hälfte (51%) der gesamten Gebäudeschadenskosten im Kanton Zürich entstehen in den beiden Städten Zürich und Winterthur: In der Stadt Zürich sind es rund 74 Mio. CHF im Jahr 2010, in der Stadt Winterthur rund 13 Mio. CHF im Jahr 2010.

Luftschadstoffbedingte Gebäudeschadenskosten 2010 [Mio. CHF]		
	Stadt Zürich	Stadt Winterthur
Kosten durch verkürzte Lebensdauer der Gebäudehülle (alle Gebäudetypen)	67	12
Kosten durch kürzere Reinigungsintervalle von Glas-, Metall- und Fensterflächen bei Nicht-Wohngebäuden	7	1
Total	74	13

Tabelle 14: Luftschadstoffbedingte Gebäudeschadenskosten in den Städten Zürich und Winterthur im Jahr 2010.

Der hohe Anteil der beiden Städte an den gesamten luftschadstoffbedingten Gebäudeschadenskosten im Kanton hat die folgenden Gründe:

- Aufgrund der urbanen, relativ dichten und hohen Bauweise, befinden sich 35% der gesamten kantonalen Fassadenflächen in den Städten Zürich und Winterthur.
- Insbesondere im Agglomerationstyp «Metropolen» (Stadt Zürich) aber auch in den «Kerngemeinden» (Stadt Winterthur) ist die Lebensdauer der Gebäudehülle immissionsbedingt im Vergleich zu den übrigen Agglomerationstypen am geringsten. Dadurch sind die Kosten aufgrund verkürzter Lebenszeit der Gebäudehülle pro m² grösser als in den übrigen Agglomerationstypen.

4 Waldschadenskosten

4.1 Vorgehen und Quellen

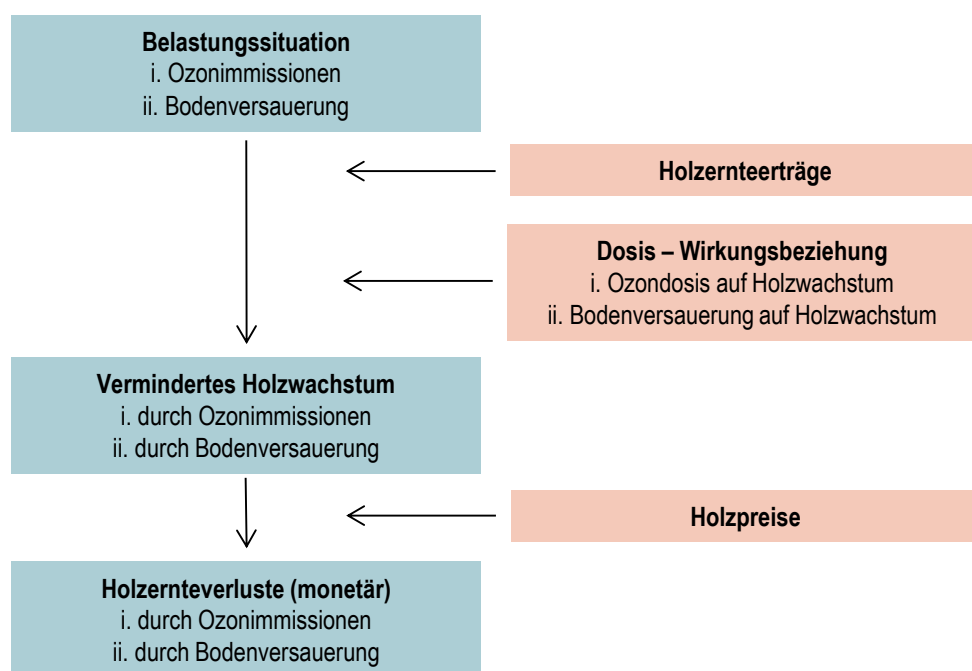
Luftschadstoffemissionen haben unterschiedliche Folgen für den Wald, wie verändertes Wachstum von Stamm, Trieben und Wurzeln, gestörter Nährstoffhaushalt, verminderte Standfestigkeit der Bäume und Kronenverlichtungen. Für die Schäden verantwortlich können beispielsweise ein übermässiger Stickstoffeintrag, die Bodenversauerung oder die bodennahe Ozonbelastung sein. Bis heute sind aber nur wenige Zusammenhänge zwischen Ursache und Wirkungen quantifizierbar. Die Schwierigkeit besteht darin, dass das hochkomplexe Ökosystem Wald nicht nur durch den Menschen, sondern auch von vielen weiteren Faktoren beeinflusst wird. Für zwei Bereiche lassen sich aber quantitative Aussagen machen. Für die Forstwirtschaft haben beide Bereiche Schadenskosten zur Folge.

- **Kosten durch vermindertes Holzwachstum:** Die Ozonbelastung sowie die Bodenversauerung führen zu reduziertem Holzwachstum. Dies führt zu sinkenden Holzertträgen und somit zu Ertragsausfällen für die Forstwirtschaft.
- **Kosten durch erhöhten Windwurf:** Die erhöhte Bodenversauerung führt zu einem erhöhten Windwurfisiko der Bäume. Dadurch entstehen Zusatzkosten für die Forstwirtschaft für die Räumung und Wiederaufforstung sowie für Mindererträge bei der Holzverwertung.

Andere Waldschadenskosten – beispielsweise Einnahmefälle im Tourismus oder in der Berglandwirtschaft – sind nach den Ergebnissen aus ARE (2006) vernachlässigbar. Deshalb werden nur das verminderte Holzwachstum sowie das erhöhte Windwurfisiko berücksichtigt.

Die Methodik und die Dosis-Wirkungs-Relationen zur Berechnung der luftschadstoffbedingten Waldschadenskosten werden aus ARE (2008) übernommen. Die Kosten durch vermindertes Holzwachstum werden anhand von Immissionsdaten sowie von Wald-, Holzernte- und Holzpreisstatistiken berechnet (Figur 12). Als Basis zur Ermittlung der Kosten durch erhöhten Windwurf dient der für die Schweiz berechnete Wert aus dem Jahr 2005 (ARE 2008). Dieser wird anhand der Holzpreisentwicklung auf das Jahr 2010 hochgerechnet und gemäss des kantonalen an der schweizerischen Holzproduktion auf den Kanton Zürich übertragen.

Methodik zur Berechnung der Waldschäden durch vermindertes Holzwachstum



econcept

Figur 12: Methodik mit welcher von den Ozonimmissionen und der Bodenversauerung auf die Waldschadenskosten geschlossen werden kann.

4.2 Berechnungen und Teilergebnisse¹⁷

4.2.1 Vermindertes Holzwachstum durch Ozonimmissionen

Als Grundlage für die Ozonbelastung werden Ozonimmissionsmesswerte der Messstation Dübendorf-EMPA¹⁸ verwendet. Entscheidend für die Waldschadenskosten ist der AOT40f-Wert¹⁹. Um kurzfristige Schwankungen zu glätten, wird für das Jahr 2010 der Durchschnitt der Messwerte der Jahre 2006 bis 2011 verwendet. Die folgende Tabelle zeigt die Jahresdurchschnitte der Messwerte der Messstation Dübendorf-EMPA.

¹⁷ Nachfolgend werden Berechnung und Teilergebnisse für das Jahr 2010 dargestellt. Die Berechnungen für das Jahr 2000 erfolgten analog.

¹⁸ Quelle: http://www.bafu.admin.ch/luft/luftbelastung/blick_zurueck/01694/immissionsdaten/index.html?lang=de am 3.5.2013

¹⁹ Der «Accumulated Ozone Exposure over a threshold of 40» (AOT40) Wert für Wälder (forest) zeigt die Summe aller 1-Stunden-Ozonkonzentrationen für Werte über 40ppm, welche zwischen 1. April und 30. September des jeweiligen Jahres gemessen werden (ARE 2008). Um die Schadenswirkung für Bäume abschätzen zu können, müssen die Messwerte auf eine Höhe von 20 Meter korrigiert werden. Der Korrekturfaktor von 4m auf 20m beträgt 1.04 (UNECE 2004).

AOT40f Messwerte in ppm*h			
Jahr	Dosis	Jahr	Dosis
1996	14.9	2006	19.8
1997	16.1	2007	14.6
1998	19.6	2008	13.0
1999	14.3	2009	13.3
2000	12.7	2010	14.7
2001	15.1	2011	16.0
Mittelwert 1996-2001	16.1	Mittelwert 2006-2011	15.8

Tabelle 15: AOT40f Messwerte der Messstation Dübendorf-EMPA in ppm*h. Gemessen werden diese Werte 4m über Boden. Um die Schadenswirkung für Bäume abschätzen zu können, müssen die Messwerte auf eine Höhe von 20 Meter korrigiert werden, da die tatsächliche Ozonkonzentration dort höher sind. Der Korrekturfaktor von 4m auf 20m beträgt 1.04 (UNECE 2004) und ist in den ausgewiesenen Mittelwerten bereits eingerechnet.

Um die Auswirkungen der Ozonbelastung auf das Holzwachstum quantifizieren zu können, werden Expositions-Wirkungsbeziehungen nach Braun et al. (1999) und Karlsson et al. (2005) verwendet. Folgende Formel beschreibt den Zusammenhang zwischen dem Stammvolumen (indirekt Holzertrag) und der Ozonkonzentration:

$$\text{Relatives Stammvolumen (in \%)} = 100 + m * \text{AOT40f}$$

Wobei m der prozentualen Reduktion des Stammvolumens pro zusätzlicher Einheit ppm*h Ozonbelastung entspricht. m unterscheidet sich bei verschiedenen Baumarten (siehe Tabelle 16). Berechnet wird das relative Stammvolumen. Dies entspricht dem Stammvolumen bei einer bestimmten Ozonbelastung im Verhältnis zum Stammvolumen eines Baumes an einem unbelasteten Standort mit natürlichen Ozonbelastungswerten (AOT40f = 0 ppm*h).

Baumart	Reduktion des Stammvolumens pro zusätzlicher ppm*h Ozonbelastung (Steigung m)	Relatives Stammvolumen [%]
Buche	-3.51	44.4
Eiche	-0.38	94.0
Birke	-0.49	92.2
Ungewichteter Mittelwert Laubholz		76.9
Fichte	-0.26	95.9
Föhre	-0.48	92.4
Ungewichteter Mittelwert Nadelholz		94.1

Tabelle 16: Reduktion des Stammvolumens nach Baumart (Quelle: ARE 2008). Relatives Stammvolumen berechnet anhand eines durchschnittlichen AOT40f-Messwertes von 16.1ppm*h (2006 bis 2011) und der baumartenspezifischen Steigung m .

Für die Berechnung der Kosten durch vermindertes Holzwachstum durch Ozonimmissionen werden in einem nächsten Schritt die jährlichen Holzernteerträge des Jahres 2010 benötigt. Mittels der in Tabelle 16 errechneten relativen Stammvolumen und den Holzern-

teerträge können die Ernteaufälle errechnet werden. Diese sind in Tabelle 17 aufgeführt.

Holzart	Jährliche Holznutzung in m ³	Luftschadstoffbedingte Ernteaufälle in m ³
Stamm-/Rundholz		
Nadelholz	155'178	9'663
Laubholz	29'482	8'871
Total	184'660	18'534
Industrieholz		
Nadelholz	17'553	1'093
Laubholz	12'240	3'683
Total	29'793	4'776
Energie-/Brennholz		
Nadelholz	42'297	2'634
Laubholz	123'768	37'242
Total	166'065	39'876
Gesamttotal	380'518	63'186

Tabelle 17: Holzernteerträge (Quelle: Jahrbuch Wald und Holz 2011 S.38) und Ernteaufälle durch Ozonimmissionen im Kanton Zürich des Jahres 2010.

Im Jahr 2010 fiel der Holzernteertrag im Kanton Zürich verursacht durch vermindertes Wachstum durch Ozonimmissionen um 63'186 m³ tiefer aus als wenn die Ozonbelastung einem natürlichen Belastungsniveau (AOT40f = 0 ppm*h) entsprochen hätte. Für die Berechnung der Waldschadenskosten werden die errechneten Ernteaufälle mit den Holzpreisen des Jahres 2010 multipliziert. Die verwendeten Produzentenpreise sind in Tabelle 18 ausgewiesen.

Holzart	Ernteaufälle in tausend m ³	Produzentenpreise in CHF/m ³	Ausfallkosten in Mio. CHF
Stamm-/Rundholz			
Nadelholz	9.66	101.2	0.98
Laubholz	8.87	108.6	0.96
Total	18.53		1.94
Industrieholz			
Nadelholz	1.09	82.2	0.09
Laubholz	3.68	72.8	0.27
Total	4.78		0.36
Energie-/Brennholz			
Nadelholz	2.63	48.1	0.13
Laubholz	37.24	59.5	2.22
Total	39.88		2.34
Gesamttotal	63.19		4.64

Tabelle 18: Produzentenpreise der Holzarten in CHF/m³ des Jahres 2010 (Quelle: Jahrbuch Wald und Holz 2012 S. 132/133).

Die Holzernteausfallkosten durch vermindertes Holzwachstum aufgrund der Ozonimmissionen im Kanton Zürich im Jahr 2010 betragen **4.64 Mio. CHF**.

4.2.2 Vermindertes Holzwachstum durch Bodenversauerung

Neben den Ozonimmissionen führen auch versauerte Böden zu einem verminderten Holzwachstum. Beträgt die Basensättigung weniger als 40%, ist mit einem verminderten Holzwachstum zu rechnen. In der Schweiz weisen 13% der Waldflächen eine Basensättigung von $\leq 15\%$ auf. Bei einem Fünftel der Schweizer Waldflächen liegt die Basensättigung zwischen 15 und 40%. In ARE (2008) wird deshalb mit einem Anteil von 33% versauerten Waldböden in der Schweiz gerechnet. Die durchschnittliche jährliche Wachstumsrate von Holz auf versauerten Böden ist bei Laubbäumen um 33% und bei Nadelbäumen um 49% tiefer als auf nicht versauerten Böden (WGE 2004 und Ouimet et al. 2001).

Um die Kosten durch vermindertes Holzwachstum durch Bodenversauerung für den Kanton Zürich im Jahr 2010 zu berechnen, werden die für die ganze Schweiz und für das Jahr 2005 errechneten Kosten aus ARE (2008) anhand der Holzpreisentwicklung und des kantonalen Anteils an der schweizerischen Holzproduktion auf das Jahr 2010 und den Kanton Zürich übertragen. So entsprechen die Holzernteerträge aus dem Kanton Zürich im Jahr 2010 7.4%²⁰ der Holzernteerträge der ganzen Schweiz aus dem Jahr 2005. Die Holzpreise im Jahr 2010 haben im Vergleich zu ARE (2008) (siehe Tabelle 18) um 3.7% zugelegt. Für den Kanton Zürich ergeben sich somit im Jahr 2010 Kosten von **5.72 Mio. CHF** aufgrund von vermindertem Holzwachstum auf versauerten Böden.

4.2.3 Verstärkter Windwurf

Die Bodenversauerung führt neben dem verminderten Wachstum der Bäume auch zu einem erhöhten Windwurfrisiko der Bäume. Die Wahrscheinlichkeit, dass ein Baum auf versauertem Boden bei einem Sturm geworfen wird ist höher als bei einem vergleichbaren Baum auf einem nicht versauerten Boden. Für den Sturm Lothar konnten grobe Dosis-Wirkungszusammenhänge zwischen Bodenversauerung und Windwurfrisiko aufgezeigt werden (Braun et al. 2002, Mayer et al. 2005, IAP 2004). Für Nadelbäume auf versauerten Böden ist das Windwurfrisiko 4.8 Mal höher als auf nicht versauerten Böden. Für Laubbäume ist es 3.6 Mal höher. Anhand dieser Angaben, der Verteilung der betroffenen Baumarten beim Sturm Lothar und der Häufigkeit eines Sturmes wie Lothar wurden in ARE (2008) die Waldschadenskosten durch erhöhten Windwurf errechnet. Die Waldschadenskosten im Kanton Zürich werden wiederum anhand der Holzpreisentwicklung und dem Anteil des Kantons Zürich an der gesamtschweizerischen Holzproduktion von den gesamtschweizerischen Kosten im Jahr 2005 (ARE 2008) abgeleitet. Die Waldschadenskosten durch erhöhten Windwurf betragen im Kanton Zürich im Jahr 2010 **2.09 Mio. CHF**.

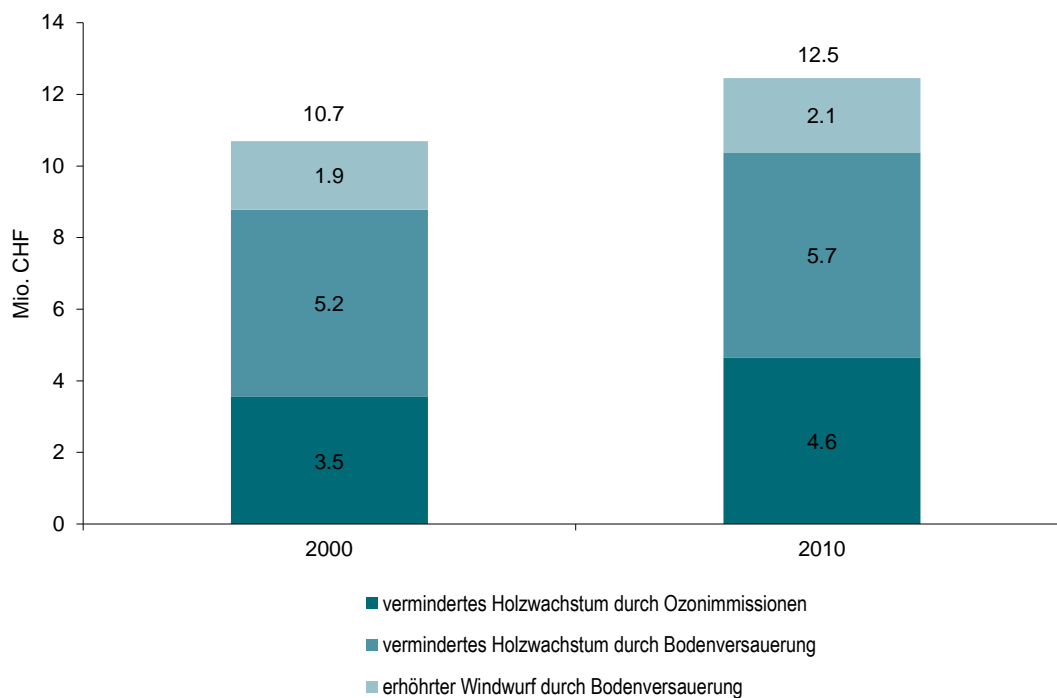
²⁰ econcept (2006) berechnet ebenfalls den Anteil der Züricher Holzernteerträge an den Schweizer Holzernteerträge (mit unterschiedlicher Methode) und weist ebenfalls den Anteil von 7.4% aus.

4.3 Ergebnisse

4.3.1 Kanton Zürich

Um die gesamten Waldschadenskosten zu erhalten, werden die Kosten durch vermindertes Holzwachstum und die Kosten durch das erhöhte Windwurfisiko addiert.

Luftschadstoffbedingte Waldschadenskosten



econcept

Figur 13: Luftschadstoffbedingte Waldschadenskosten im Kanton Zürich in den Jahren 2000 und 2010

Die Waldschadenskosten haben zwischen den Jahren 2000 und 2010 im Kanton Zürich um 16.4% zugenommen. Die Inputfaktoren für die Berechnung haben sich über diese 10 Jahre wie folgt verändert:

- Abnahme der Ozonimmissionen um 1.4%
- Gesamthafte Abnahme der Holznutzung um 15.5%
- Durchschnittliche Zunahme der Holzpreise um 31%

Da die Veränderung der Holznutzung über die Holzarten ungleich verteilt ist (ebenso bei den Preisen) kann von der Veränderung der Inputfaktoren nicht wie bei den Gesundheitskosten direkt auf die gesamthafte prozentuale Veränderung von 16.4% geschlossen werden.

- Hätten sich nur die Ozonimmissionen verändert und die Holznutzung und Holzpreise wären konstant geblieben, wären die Waldschadenskosten nicht um 16.4% gestiegen, sondern wären nahezu konstant geblieben.
- Würde man umgekehrt die Ozonimmissionen konstant halten und nur die Preise und Holznutzung verändern, wären die Waldschadenskosten sogar um 17.2% auf 12.54 Mio. CHF gestiegen.

4.3.2 Städte Zürich und Winterthur

Die Waldschadenskosten für die Städte Zürich und Winterthur werden proportional zu deren Waldfläche berechnet. Auf dem Stadtgebiet von Winterthur befinden sich 5.4% der kantonalen Waldfläche, in der Stadt Zürich²¹ sind es 4.5%.

Waldschadenskosten in Mio. CHF		2000	2010
Kanton Zürich	(100%)	10.7	12.5
Stadt Zürich	(4.5%)	0.5	0.6
Stadt Winterthur	(5.4%)	0.6	0.7

Tabelle 19: Waldschadenskosten der Städte Zürich und Winterthur in Mio. CHF.

²¹ http://www.aln.zh.ch/internet/audirektion/aln/de/wald/zuercher_wald/zahlen_fakten.html;

http://www.stadt-zuerich.ch/content/ted/de/index/gsz/natur-und_erlebnisraeume/stadtwald/der_zuercher_wald_in_zahlen.html;

<http://www.forstbetrieb.winterthur.ch/default.asp?Sprache=D&Thema=0&Rubrik=0&Gruppe=1&Seite=64>; am 6.5.2013.

5 Biodiversitätsverluste

5.1 Vorgehen und Quellen

Luftschadstoffe wie SO_2 , NO_x und NH_3 können zu Versauerung und Überdüngung von Böden und Gewässern führen und somit die Artenvielfalt reduzieren. Die dadurch entstehenden externen Kosten der Luftverschmutzung werden in diesem Kapitel quantifiziert. econcept hat im Rahmen des EU-Forschungsprojektes NEEDS einen Ansatz zur Bewertung von Biodiversitätsverlusten aufgrund von Luftschadstoffdepositionen entwickelt (Ott et al. 2006). Dieser Ansatz kam bereits in econcept (2006) zur Anwendung. In einem ersten Schritt werden die Dosis-Wirkungsbeziehungen zwischen den Schadstoffdepositionen und den Biodiversitätsveränderungen benötigt. Diese Biodiversitätsveränderungen werden anschliessend mittels der Wiederherstellungskosten monetarisiert.

5.2 Berechnungen und Teilergebnisse²²

5.2.1 Dosis-Wirkungsbeziehungen zwischen Schadstoffdepositionen und Biodiversitätsveränderungen

Als Grundlage für die Berechnungen wird ein niederländisches Schadensmodell verwendet, welches für marginale Änderungen von SO_x -, NO_x - und NH_3 -Depositionen in Böden die resultierende Veränderung der Artenvielfalt ermittelt (Eco-indicator 1999). Ausgedrückt wird die Veränderung der Biodiversität mit dem PDF (potentially disappeared fraction) Indikator. Der PDF-Indikator zeigt, wie viele der ursprünglich in einem Habitattyp vorkommenden typischen Arten durch die Deposition von Luftschadstoffen höchstwahrscheinlich verschwinden. Folgende Tabelle zeigt die Dosis-Wirkungsbeziehungen für die Niederlande:

Emission	Depositionszunahme (kg/(m ² *Jahr)) auf natürlichem Boden	Durchschnittliche PDF für NL mit/ohne Depositionszunahme	Schaden pro kg Deposition (PDF*m ² *Jahr/kg) (bei 100% natürlicher Fläche)
Referenzwert	ohne	0.746429 (ohne zus. Deposition)	-
SO_x	0.000064	0.74654	1.73
NO_x	0.000046	0.746867	9.52
NH_3	0.000017	0.74687	25.94

Tabelle 20: Dosis-Wirkungsmodell für die Niederlande (Quelle: 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 Niederlanden verschwunden sind.

²² Nachfolgend werden Berechnung und Teilergebnisse für das Jahr 2010 dargestellt. Die Berechnungen für das Jahr 2000 erfolgten analog.

5.2.2 Monetarisierung der 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 und die entsprechenden PDF-Werte der Habitatveränderungen für verschiedene Habitattypen vor (econcept 2006). In econcept (2006) wurden die Kosten für Biodiversitätsverbesserungen von mindestens 20% berechnet, da davon ausgegangen wird, dass für kleinere Veränderungen keine Zahlungsbereitschaft besteht. Im Rahmen des Wiederherstellungskostenansatzes wird diejenige Landnutzungsänderung mit den geringsten Kosten für die «Produktion» von Biodiversität, d.h. für PDF-Veränderungen, verwendet (at-least Ansatz). Dabei handelt es sich um den Übergang von integrierter Landwirtschaft in Biolandwirtschaft mit Kosten von 0.49 Euro/(PDF*m²).

5.2.3 Berechnung Gesamtkosten

Anhand der oben hergeleiteten Wiederherstellungskosten aus Deutschland von 0.49 Euro/PDF/m² und dem holländischen Schadensmodell werden die Biodiversitätsverluste für Zürich berechnet. Hierfür werden die deutschen Herstellungskosten mittels PPS (Purchasing Power Standard) in CHF umgerechnet und auf das Jahr 2010 mittels des LIK (Landesindex der Konsumentenpreise) angepasst. Der Kostensatz für die Schweiz entspricht 1.01 CHF/(PDF*m²).

Das verwendete Schadensmodell aus den Niederlanden wird an die Umweltsituation in der Schweiz angepasst. Hierfür werden die Dosis-Wirkungsbeziehungen zwischen Depositionsveränderung und Biodiversitätsveränderung mittels des Acidification/Eutrophication Pressure Index (ten Brink 2000) auf die Verhältnisse in der Schweiz angepasst. Dieser Indikator beschreibt den Zustand der Versauerung und Überdüngung in verschiedenen Ländern und ermöglicht somit die Anpassung des Schadensmodells aus den Niederlanden auf die Verhältnisse in der Schweiz. Der Index für die Niederlande wird dabei auf 1 festgesetzt, der entsprechende Index für die Schweiz beträgt 0.44²³ für Versauerung und Überdüngung für das Jahr 2010.

Die ausgewiesenen Dosis-Wirkungsbeziehungen sind ausgewiesen für 100% natürliche Fläche. Deshalb müssen die Dosis-Wirkungsbeziehungen auf die tatsächlich vorhandene natürliche Fläche des untersuchten Perimeters angepasst werden. Aufgrund der Arealstatistik (2004/09) des BFS beträgt die natürliche Fläche im Kanton Zürich 36.5%.

Die externen Kosten von 1 kg NO_x-Deposition betragen demnach: 9.52 PDF*m²/kg (siehe Tabelle 20) * 1.01 CHF/(PDF*m²) * 0.365 * 0.44 = **1.55 CHF/kg**

²³ Nach BUWAL (2005) tragen die Schadstoffe NO_x und NH₃ beide zu Versauerung und Überdüngung bei. Es wird deshalb ein Mittelwert der beiden Indizes Acidification und Eutrophication (ten Brink 2000) für die Anpassung des niederländischen Schadensmodells auf die Schweiz verwendet. Die gleiche Gewichtung wird auch in Ott et al. (2006) verwendet (Studie im Rahmen des europäischen Forschungsprogramms «NEEDS - New Energy Externalities Developments for Sustainability».)

Analog berechnet betragen die externen Kosten für 1 kg NH₃-Depositionen **4.21 CHF/kg**. SO_x wird in der Berechnung für das Jahr 2010 nicht berücksichtigt, da sich die Depositionen in einem nicht relevanten Grössenmass bewegen. Für die Neuberechnung des Jahres 2000 werden die SO_x-Depositionen aber mit einbezogen.

Um die externen Kosten der Luftverschmutzung durch Biodiversitätsschäden zu erhalten, werden die Kostensätze der Schadstoffe mit den deponierten Mengen der Schadstoffe multipliziert. Nach dem Territorialprinzip werden sämtliche Emissionen im Kanton Zürich auch als Depositionen berücksichtigt und fliessen in der Berechnung mit ein.

Schadstoff	Kostensatz [CHF/kg]	Emission ZH [t]	externe Kosten 2010 [Mio. CHF]
NO _x	1.55	10'130	15.66
NH ₃	4.21	4'074	17.16
Total			32.82

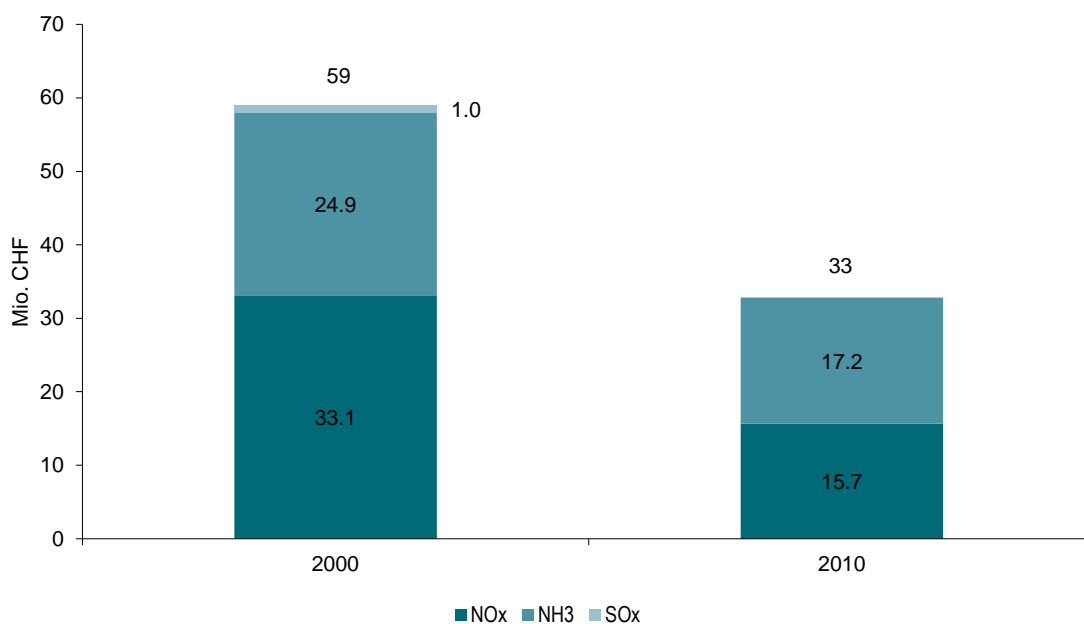
Tabelle 21: Externe Kosten der Luftverschmutzung durch Biodiversitätsschäden im Jahr 2010.

Die Ergebnisse sind in Tabelle 21 dargestellt. Nach derselben Methode wie für das Jahr 2010 wurden die Kosten für das Jahr 2000 erneut berechnet.

5.3 Ergebnisse

Die externen Kosten der Luftverschmutzung durch Biodiversitätsverluste betragen im Jahr 2010 für den Kanton Zürich **33 Mio. CHF**.

Luftschadstoffbedingte Biodiversitätsverluste



Figur 14: Luftschadstoffbedingte Biodiversitätsschäden im Kanton Zürich in den Jahren 2000 und 2010

Im Jahr 2000 betragen die externen Kosten der Luftverschmutzung durch Biodiversitätsverluste **59 Mio. CHF**. Die Kosten sind in den 10 Jahren um 44.3% gesunken. Zu dieser Veränderung beigetragen haben folgende Faktoren:

- Abnahme der durchschnittlichen Kostensätze der Schadstoffe um 29.5%
- Wegfall der SO_x-Schadstoffe
- Abnahme der NO_x-Schadstoffe um 32.9%
- Abnahme der NH₃-Schadstoffe um 2%
- Zunahme des Wiederherstellungskostensatzes um 8.6%

Würde man die Menge der Schadstoffe auf dem Wert des Jahres 2000 konstant halten und die Kostensätze auf das Jahr 2010 anpassen, ergäben sich im Jahr 2010 Biodiversitätsverluste in der Höhe von 41 Mio. CHF. Die Reduktion der Schadstoffe hat folglich im Jahr 2010 zu einer Kostensenkung von 8 Mio. CHF Biodiversitätsverluste beigetragen.

Für die Städte werden die Kosten der Luftverschmutzung durch Biodiversitätsverluste nicht berechnet, da die verwendete Methode nicht für so kleinräumige, weitgehend überbaute Perimeter entwickelt wurde. Zudem ist davon auszugehen, dass die Kosten durch Biodiversitätsverluste in den Städten vernachlässigbar gering sind.

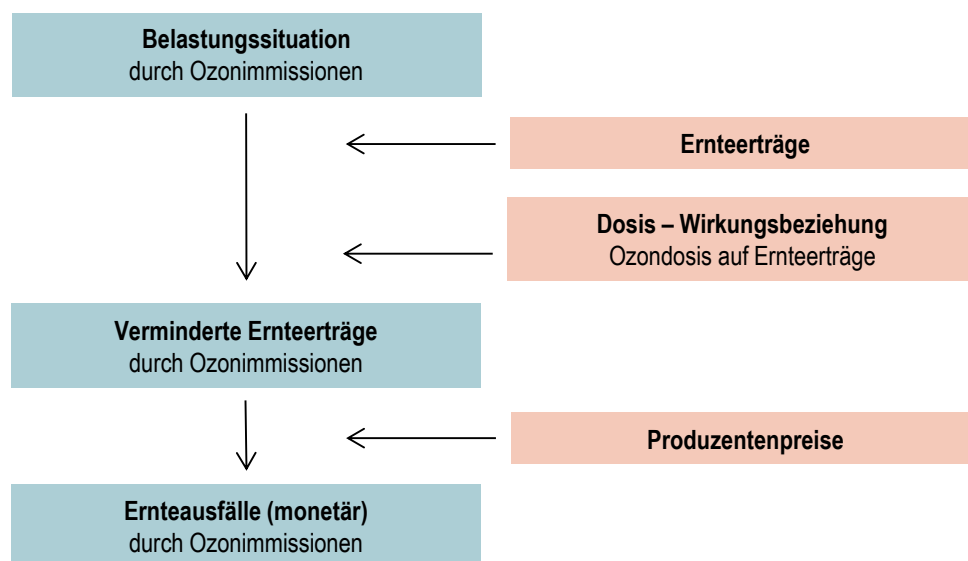
6 Ernteauffälle

6.1 Vorgehen und Quellen

Viele Luftschadstoffe können negative Auswirkungen auf Nutzpflanzen haben. Besonders ausgeprägt und gut dokumentiert ist jedoch der Einfluss von bodennahem Ozon.

Die Auswirkungen der Ozondosis auf den Ernteertrag sind für verschiedene Nutzpflanzenarten (Weizen, Körnermais, Zuckerrüben, Kartoffeln, Raps, Sonnenblumen, Gemüse und Trauben) bekannt (ARE 2008). Mittels dieser Dosis-Wirkungsbeziehungen und den verfügbaren Ernteertragsdaten aus dem Kanton Zürich können die Ernteauffälle quantifiziert werden (Figur 15). Um die Kosten der Ernteauffälle zu bestimmen, werden die Ernteauffälle mit den jeweiligen Produzentenpreisen multipliziert. Die Wirkung anderer Luftschadstoffe wie Einflüsse der Bodenversauerung auf Nutzpflanzen, des Ozons auf Grasland sowie des direkten Einflusses von Stickstoffimmissionen auf Nutzpflanzen werden hier nicht berücksichtigt.

Methodik zur Berechnung der Ernteauffälle



econcept

Figur 15: Methodik mit welcher von den Ozonimmissionen (AOT40c-Werte²⁴) auf die Ernteverluste geschlossen werden kann. In Anlehnung an ARE (2008).

²⁴ Der «Accumulated Ozone Exposure over a threshold of 40» (AOT40) Wert für landwirtschaftliche Nutzpflanzen (crop) zeigt die Summe aller 1-Stunden-Ozonkonzentrationen für Werte über 40ppm, welche zwischen 1. Mai und 31. Juli des jeweiligen Jahres gemessen werden (ARE 2008). Um die Schadenswirkung für Nutzpflanzen abschätzen zu können, müssen die Messwerte auf eine Höhe von 0-1 Meter korrigiert werden, da die tatsächliche Ozonkonzentration dort tiefer sind. Der Korrekturfaktor von 4m auf 1m beträgt 0.92 (UNECE 2004).

6.2 Berechnungen und Teilergebnisse²⁵

6.2.1 Berechnung der relativen Ernteauffälle

Um die Belastungssituation im Kanton Zürich wiederzugeben, werden Ozon-Messwerte der Messstation EMPA-Dübendorf verwendet. Entscheidend für Ernteauffälle ist der AOT40c-Messwert. Da Ozonimmissionen stark witterungsabhängig sind, wird ein 6-Jahres-Mittelwert für die weiteren Berechnungen verwendet. Dies erlaubt es, starke Schwankungen auszugleichen. Die Messwerte sind in Tabelle 22 dargestellt.

AOT40c Messwerte in ppm*h			
Jahr	Dosis	Jahr	Dosis
1995	12.5	2005	11.4
1996	10.8	2006	17.0
1997	8.5	2007	8.3
1998	13.0	2008	10.9
1999	8.4	2009	7.2
2000	7.4	2010	11.1
Mittelwert 1995-2000	9.3	Mittelwert 2005-2010	10.1

Tabelle 22: AOT40c Messwerte der Messstation Dübendorf-EMPA in ppm*h. Gemessen werden diese Werte 4m über Boden. Um die Schadenswirkung für Nutzpflanzen abschätzen zu können, müssen die Messwerte auf eine Höhe von 0-1 Meter korrigiert werden, da die tatsächliche Ozonkonzentration dort tiefer sind. Der Korrekturfaktor von 4m auf 1m beträgt 0.92 (UNECE 2004) und ist in den ausgewiesenen Mittelwerten bereits eingerechnet. Quelle: <http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/airbase-the-european-air-quality-database-7> am 13.5.2013.

Der Zusammenhang zwischen Ozonkonzentration und Ernteerträgen der Nutzpflanzen kann nach Fuhrer (2001) und Holland et al. (2002) mit folgender Formel beschrieben werden:

$$\text{Relativer Ernteertrag (in \%)} = 100 + m * \text{AOT 40c (in ppm*h)}$$

Die einzelnen Pflanzenarten unterscheiden sich im Wert der Steigung (m), wobei m der prozentualen Reduktion des Ernteertrages pro zusätzlicher Einheit ppm*h Ozonbelastung entspricht. m ist von der Pflanzenart abhängig. Berechnet wird der Ernteertrag bei einer bestimmten Ozonbelastung im Verhältnis zum Ernteertrag einer Pflanze an einem unbelasteten Standort mit natürlichen Ozonbelastungswerten (AOT40c = 0 ppm*h). Die folgende Tabelle zeigt die verwendeten Expositions-Wirkungsbeziehungen der verschiedenen Nutzpflanzenarten.

²⁵ Nachfolgend werden Berechnung und Teilergebnisse für das Jahr 2010 dargestellt. Die Berechnungen für das Jahr 2000 erfolgten analog.

Nutzpflanzenart	Reduktion des Ernteertrags pro zusätzlicher ppm*h Ozonbelastung (Steigung m)	Relativer Ernteertrag bei O ₃ -Belastung von 10.1 ppm*h [%]
Weizen	-1.1	88.9
Körnermais	-0.36	96.4
Zuckerrüben	-0.58	94.1
Kartoffeln	-0.56	94.3
Raps	-0.55	94.4
Sonnenblumen	-1.2	87.9
Trauben	-0.3	97.0
Gemüse	-0.95	90.4

Tabelle 23: Relativer Ernteausfall verschiedener Nutzpflanzen bei einem AOT40c-Wert von 10.1. (Quelle: ARE 2008, eigene Berechnungen).

6.2.2 Berechnung der absoluten Ernteausfälle

Anhand der im vorherigen Kapitel berechneten relativen Ernteausfälle unter der bestehenden Belastungssituation (Mittelwert 2005-2010) und anhand der Ernteertragsdaten²⁶ können nun die Ernteausfälle verglichen mit einer Situation mit natürlicher Ozonbelastung berechnet werden (Tabelle 24). Die Differenz zwischen den effektiven Ernteerträgen unter der heutigen Belastungssituation und den berechneten Erträgen mit natürlicher Belastungssituation entspricht den luftschadstoffbedingten Ernteausfällen. Anschliessend werden diese mit den Produzentenpreisen multipliziert. Daraus ergeben sich die luftschadstoffbedingten Ernteausfallkosten im Kanton Zürich.

Nutzpflanzenart	Ernteerträge mit anthropogenen Immission [t]	Ernteerträge mit natürlichen Immission [t]	Ernteausfall [t]	Produzentenpreis [CHF/100kg]	Ernteausfallkosten 2010 im Kt. ZH in [Mio. CHF]
Weizen	52'854.9	59'464.8	6'609.9	49.05	3.24
Körnermais	19'939.8	20'692.6	752.8	36.75	0.28
Zuckerrüben	222'871.6	236'747.5	13'875.8	7.48	1.04
Kartoffeln	37'322.4	39'561.2	2'238.7	43.78	0.98
Raps	6'884.7	7'289.8	405.2	89.85	0.36
Sonnenblumen	1'576.8	1'794.3	217.6	87.84	0.19
Trauben	7'232.2	7'458.3	226.1	250	0.57
Gemüse	29'930.5	33'108.9	3'178.4	215.8	6.86
Total		406117.4	27504.5		13.52
Total PSE-bereinigt					6.28

Tabelle 24: Ernteausfallkosten im Kanton Zürich für das Jahr 2010. Quelle Produzentenpreise: Agrarbericht (2012 S. 238)

In den verwendeten Produzentenpreisen sind auch die staatlichen Subventionen und Direktzahlungen an die Landwirtschaft enthalten. Volkswirtschaftlich relevant sind aber nur die Kosten exklusive der Subventionen. Zur Berechnung der volkswirtschaftlichen

²⁶ Da die Ernteerträge in Tonnen für den Kanton Zürich nicht verfügbar sind, sondern nur für die ganze Schweiz, werden die Ernteerträge der ganzen Schweiz anteilig anhand der Ernteflächen für den Kanton Zürich berechnet (siehe Tabelle 40 im Anhang).

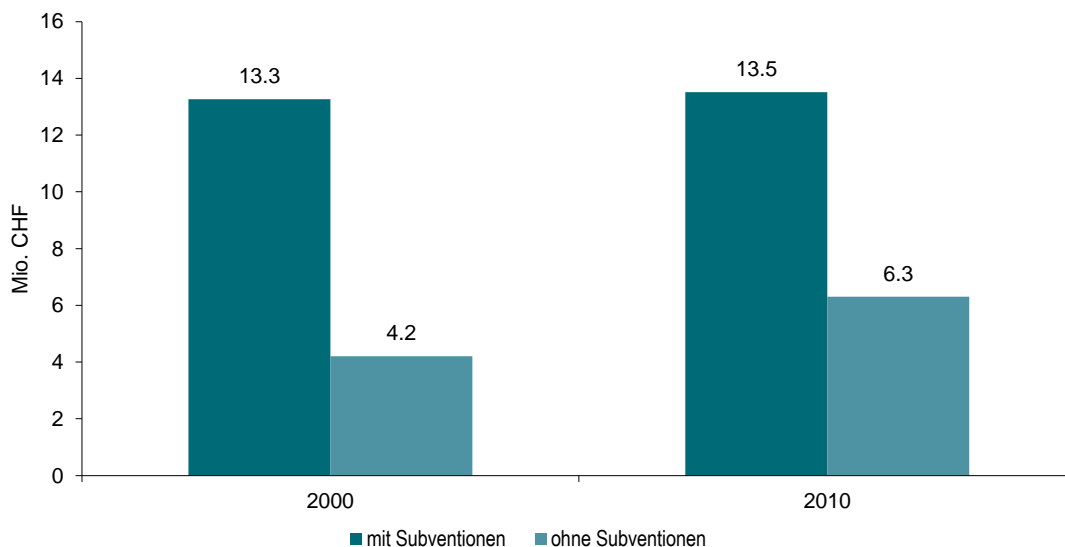
Kosten werden die staatlichen Beiträge deshalb abgezogen. Der PSE (Producer Support Estimate) der OECD ist ein Index, der den Anteil der staatlichen Unterstützung an die landwirtschaftliche Produktion der verschiedenen OECD-Länder wiedergibt. Für das Jahr 2010 wurde für die Schweiz ein PSE in der Höhe von 53.5%²⁷ geschätzt (OECD 2010²⁸). Unter Berücksichtigung des PSE betragen die landwirtschaftlichen Produktionsverluste durch erhöhte Ozonimmissionen rund 6.28 Mio. CHF im Jahr 2010.

Für das Jahr 2000 wurden die Ernteauffallkosten analog berechnet.

6.3 Ergebnisse

Die nicht-subsventionsbereinigten Ernteauffälle betragen im Jahr 2010 13.5 Mio. CHF und liegen damit nur 0.25 Mio. CHF höher als im Jahr 2000. Die durchschnittliche Preissteigerung von 4.9%, die rückläufigen Anbauflächen von 7.3% und die gestiegenen Ozonimmissionswerte von 8.6% heben sich fast vollständig auf.

Luftschadstoffbedingte Ernteauffallkosten



econcept

Figur 16: Luftschadstoffbedingte Ernteauffallkosten im Kanton Zürich in den Jahren 2000 und 2010

Die tatsächlichen volkswirtschaftlich Kosten der Luftverschmutzung werden allerdings erst in den subsventionsbereinigten Ernteauffälle ersichtlich: Diese betragen 6.3 Mio. CHF im Jahr 2010 und 4.2 Mio. CHF im Jahr 2000, wobei die Kostensteigerung fast ausschliesslich durch den Abbau von Subventionen bedingt ist. Hätten sich die Subventionen in den 10 Jahren nicht verändert, wären die volkswirtschaftlichen Kosten der Luftverschmutzung durch Ernteauffälle lediglich um 0.25 Mio. CHF gestiegen.

²⁷ 69.8% für das Jahr 2000.

²⁸ http://stats.oecd.org/Index.aspx?DataSetCode=MON20123_1 am 13.5.2013.

Die Städte Zürich und Winterthur verfügen über Landwirtschaftsflächen, welche 1.2% respektive 0.6% der kantonalen Landwirtschaftsfläche entsprechen. Aus diesem Grund wird auf eine Aufteilung der Kosten durch Ernteauffälle auf die beiden Städte verzichtet.

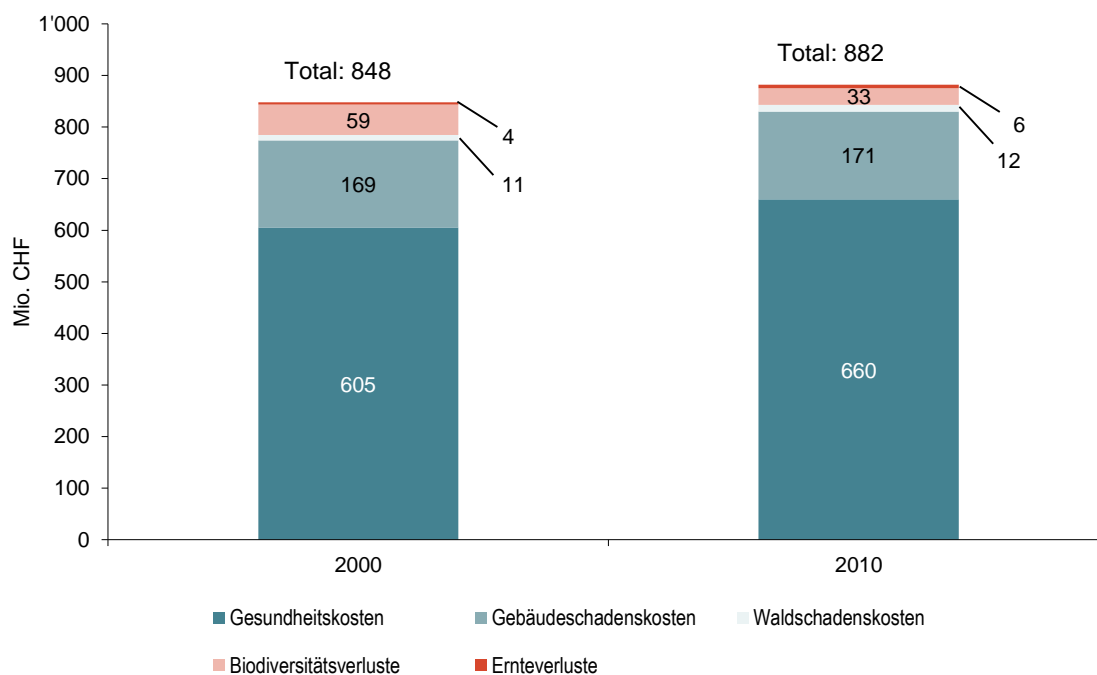
7 Gesamtkosten der Luftverschmutzung und volkswirtschaftlicher Nutzen von Luftreinhaltemassnahmen

7.1 Gesamtkosten der Luftverschmutzung

7.1.1 Kanton Zürich

Die Belastung durch Luftschadstoffe verursacht im Kanton Zürich im Jahr 2010 Kosten von insgesamt 882 Mio. CHF (Figur 17). Sie setzen sich aus Gesundheits-, Gebäude-, und Waldschadenskosten sowie aus Kosten durch Biodiversitätsverluste und Ernteauffälle zusammen. Weitaus am relevantesten sind mit 660 Mio. CHF die Gesundheitskosten. Sie allein entsprechen 75% der Gesamtschadenssumme. An zweiter Stelle stehen die Gebäudeschadenskosten mit 171 Mio. CHF bzw. 19% der Schadenssumme. Ebenfalls ins Gewicht fallen mit 33 Mio. CHF Biodiversitätsverluste. Waldschäden und Ernteauffälle haben für den Gesamtkanton eine geringe Bedeutung, wobei sie allerdings für den im Einzelnen betroffenen Wald- oder Landwirtschaftsbetrieb durchaus relevant sein können.

«Luftschadstoffbedingte Kosten im Kanton Zürich»



econcept

Figur 17: Luftschadstoffbedingte Kosten im Kanton Zürich in den Jahren 2000 und 2010 [Mio. CHF].

Die luftschadstoffbedingten Kosten sind im Kanton Zürich von 848 Mio. CHF im Jahr 2000 auf 882 Mio. CHF im Jahr 2010 angestiegen, obwohl die Immissionen und Depositionen der meisten²⁹ verwendeten Leitschadstoffe (PM₁₀, NO_x, NH₃, AOT40f-

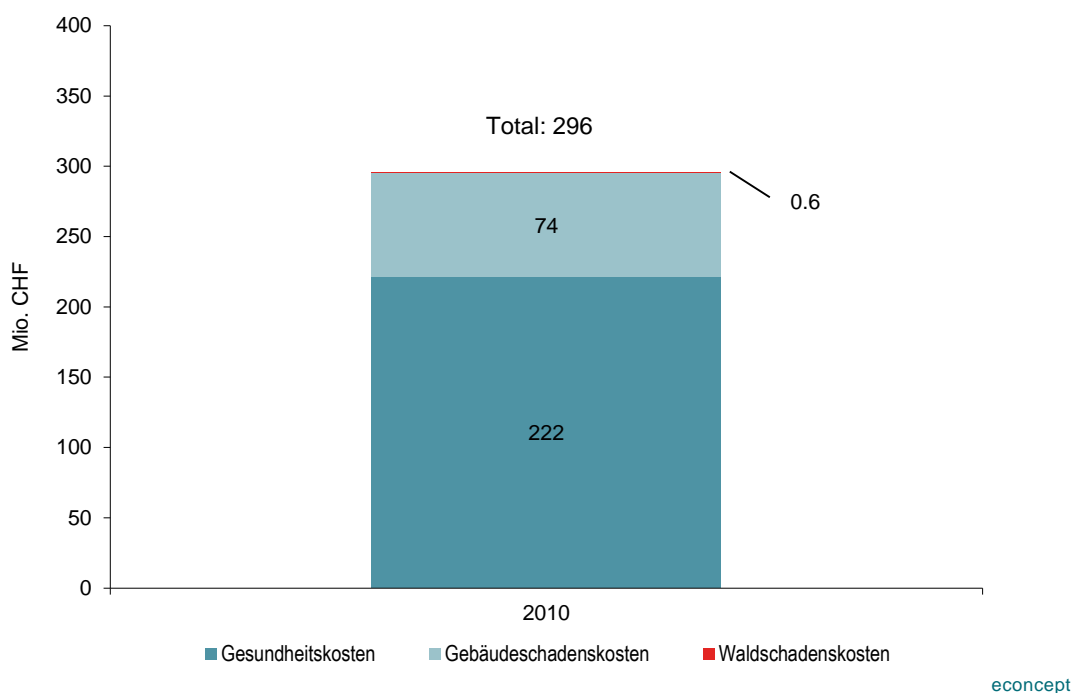
²⁹ Leicht gestiegen ist einzig der AOT40c-Ozonmesswert (für landwirtschaftliche Nutzpflanzen grup). Dies hat zu einem Anstieg der Ernteverluste geführt, welcher aber im Vergleich den anderen Schadensbereichen untergeordnete Bedeutung

Ozonmesswert³⁰) zwischen 2000 und 2010 abgenommen haben. Dies ist einerseits bedingt durch den Anstieg der Kostensätze (z.B. Behandlungskosten im Gesundheitswesen), andererseits haben sowohl die Bevölkerung als auch die Gebäudeflächen im Kanton Zürich zugenommen.

7.1.2 Stadt Zürich

Die Belastung durch Luftschadstoffe verursacht in der Stadt Zürich im Jahr 2010 Kosten von insgesamt 296 Mio. CHF (Figur 18). Sie setzen sich zusammen aus Gesundheits-, Gebäude-, und Waldschadenskosten. Biodiversitätsverluste und Ernteaufälle fallen in der Stadt so gut wie keine an und werden deswegen nicht ausgewiesen. Auch die Waldschadenskosten sind gering: Mit rund 0.6 Mio. CHF entsprechen sie weniger als einem Prozent der Gesamtschadenskosten. Die Gesundheitskosten haben mit 222 Mio. CHF bzw. 75% den grössten Anteil an den Gesamtkosten, die Gebäudeschadenskosten entsprechen knapp 25%.

«Luftschadstoffbedingte Kosten in der Stadt Zürich»



Figur 18: Luftschadstoffbedingte Kosten in der Stadt Zürich im Jahr 2010 [Mio. CHF].

hat.

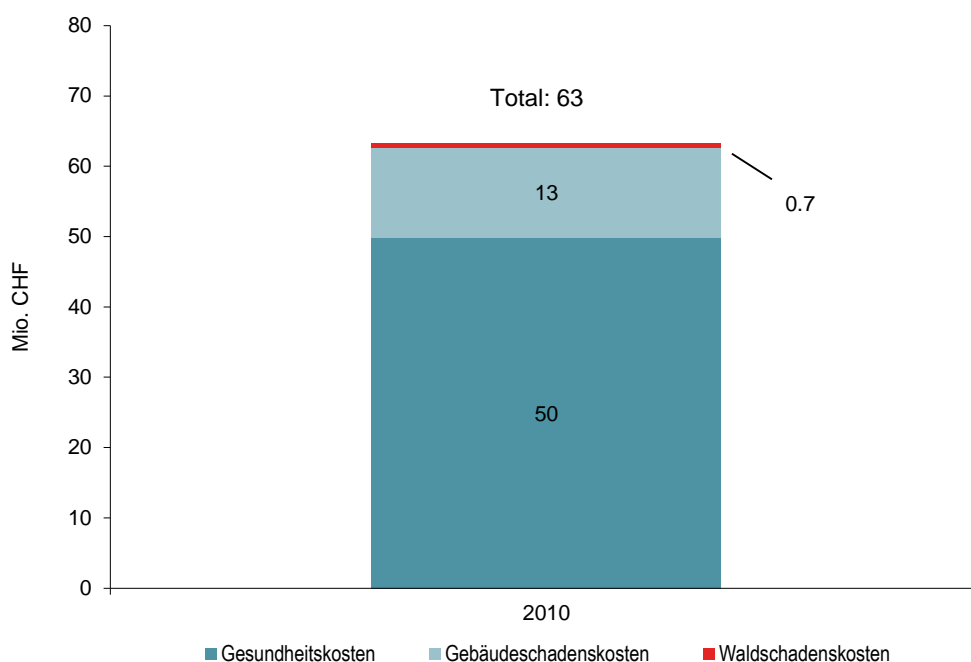
Der «Accumulated Ozone Exposure over a threshold of 40» (AOT40) Wert für landwirtschaftliche Nutzpflanzen (crop → AOT40c) zeigt die Summe aller 1-Stunden-Ozonkonzentrationen für Werte über 40ppm, welche zwischen 1. Mai und 31. Juli des jeweiligen Jahres gemessen werden (ARE 2008). Um die Schadenswirkung für Nutzpflanzen abschätzen zu können, müssen die Messwerte auf eine Höhe von 0-1 Meter korrigiert werden. Der Korrekturfaktor von 4m auf 1m beträgt 0.92 (UNECE 2004).

³⁰ Der «Accumulated Ozone Exposure over a threshold of 40» (AOT40) Wert für Wälder (forest → AOT40f) zeigt die Summe aller 1-Stunden-Ozonkonzentrationen für Werte über 40 ppm, welche zwischen 1. April und 30. September des jeweiligen Jahres gemessen werden (ARE 2008). Um die Schadenswirkung für Bäume abschätzen zu können, müssen die Messwerte auf eine Höhe von 20 Meter korrigiert werden. Der Korrekturfaktor von 4m auf 20m beträgt 1.04 (UNECE 2004).

7.1.3 Stadt Winterthur

Die Belastung durch Luftschadstoffe verursacht in der Stadt Winterthur im Jahr 2010 Kosten von insgesamt 63 Mio. CHF (Figur 19). Sie setzen sich zusammen aus Gesundheits-, Gebäude-, und Waldschadenskosten. Biodiversitätsverluste und Ernteauffälle fallen in der Stadt so gut wie keine und werden deswegen nicht ausgewiesen. Die Gesundheitskosten tragen mit rund 79%, die Gebäudeschadenskosten mit rund 20% zu den Gesamtkosten bei. Die Waldschadenskosten sind mit 0.7 Mio. CHF vergleichsweise gering.

«Luftschadstoffbedingte Kosten in der Stadt Winterthur»



econcept

Figur 19: Luftschadstoffbedingte Kosten in der Stadt Winterthur im Jahr 2010 [Mio. CHF].

7.2 Volkswirtschaftlicher Nutzen der Verbesserung der Luftqualität

Zwischen 2000 und 2010 ist die Luftbelastung zurückgegangen. Wären die Immissionen und Depositionen der betrachteten Schadstoffe in diesem Zeitraum konstant geblieben anstatt gesunken, lägen die luftschadstoffbedingten Gesamtkosten im Kanton Zürich im Jahr 2010 um rund 146 Mio. CHF höher als bei der tatsächlichen heutigen Belastungssituation (Tabelle 25). Im Jahr 2010 hat die Verbesserung der Luftqualität folglich einen volkswirtschaftlichen Nutzen von 146 Mio. CHF generiert.

Durch die Verbesserung der Luftqualität vermiedene Kosten im Jahr 2010 [Mio. CHF]	
Gesundheitskosten	74
Kosten durch Schäden an Gebäuden	51
Waldschadenskosten	13
Biodiversitätsverluste	8
Ernteausfälle	Keine Immissionssenkung
Total vermiedene Kosten	146

Tabelle 25: Wären die Immissionen von PM10, NO_x, NH₃ und Ozon zwischen 2000 und 2010 konstant geblieben anstatt zurückgegangen, wären die luftschadstoffbedingten Kosten im Jahr 2010 um 146 Mio. CHF höher ausgefallen.

8 Aufteilung auf die Verursachergruppen

8.1 Vorgehen

Die Aufteilung der in den vorgängigen Kapiteln errechneten Kosten der Luftverschmutzung auf die Verursachergruppen erfolgt in zwei Schritten:

- 1 In einem ersten Schritt werden die Kosten je Schadensbereich auf die verursachenden Schadstoffe aufgeteilt. Beispielsweise werden die luftschadstoffbedingten Waldschadenskosten auf die Schadstoffe NO_x , NH_3 und O_3 aufgeteilt. Im Gesundheitsbereich, wo neben dem verwendeten Leitschadstoff PM_{10} auch andere Luftschadstoffe (NO_x , NH_3 , NMVOC) relevante Schäden verursachen, erfolgt die Aufteilung anhand eines Verteilschlüssels, welcher auf Basis der im NEEDS-Projekt berechneten Kostensätze (siehe Anhang A-6) der einzelnen Schadstoffe sowie anhand der Emissionsmenge pro Schadstoff (OSTLUFT 2013) gebildet wurde.³¹
- 2 In einem zweiten Schritt werden die luftschadstoffbedingten Kosten pro Schadstoff auf die Verursachergruppen aufgeteilt, welche für die Emissionen dieses Schadstoffes verantwortlich sind. Hierfür werden die Emissionskataster des Kantons Zürich sowie der Städte Zürich und Winterthur (OSTLUFT 2013) verwendet.

8.2 Kanton Zürich

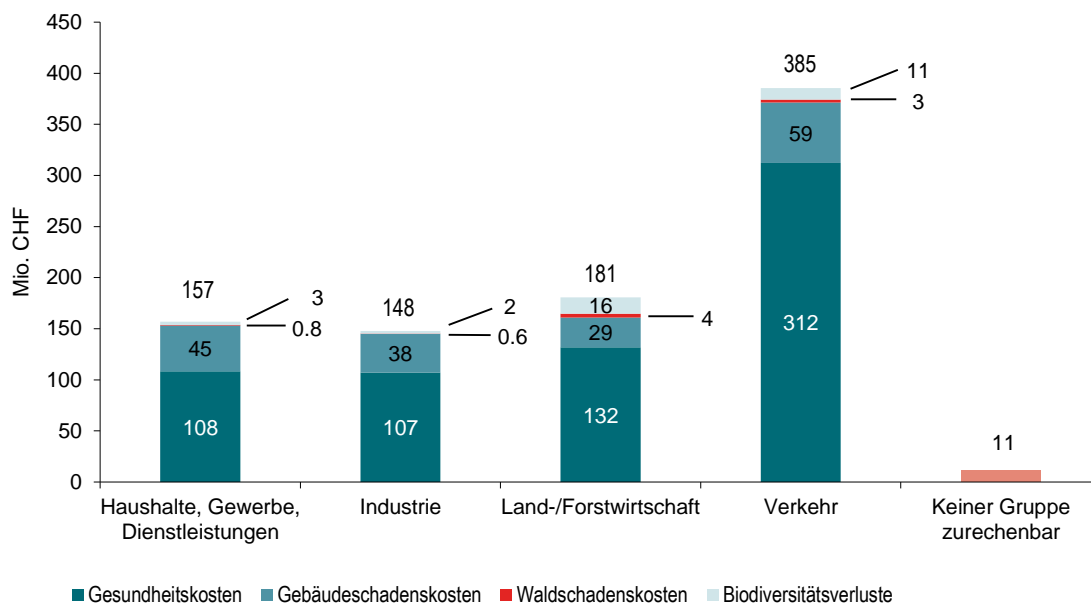
Figur 20 zeigt die Aufteilung der luftschadstoffbedingten Kosten nach Verursachergruppen und Schadensbereiche.

Den grössten Anteil an den luftschadstoffbedingten Gesamtkosten im Kanton Zürich hat mit 385 Mio. CHF im Jahr 2010 der Verkehr, bedingt durch seine hohen Anteile an den kantonalen PM_{10} - und NO_x -Emissionen (vgl. Anhang A-1). Dabei verursacht der Strassenverkehr deutlich höhere Kosten als der Luft- und Schienenverkehr (vgl. Tabelle 42 im Anhang). An zweiter Stelle steht mit 181 Mio. CHF die Gruppe «Land-/Forstwirtschaft», wobei das Vieh (insbesondere durch NH_3) mit 102 Mio. CHF und die landwirtschaftlichen Fahrzeuge mit 48 Mio. CHF ins Gewicht fallen. An dritter und vierter Stelle folgen «Haushalte, Gewerbe und Dienstleistungen» sowie «Industrie». Bei diesen Gruppen verursachen Feuerungen, Baumaschinen sowie industrielle und gewerbliche Prozesse die grössten Kostenanteile.

Die durch Ozon entstehenden Waldschäden und Ernteverluste (11 Mio. CHF im Jahr 2010) sind keiner Verursachergruppe zurechenbar.

³¹ Würde man nun die Kosten der Luftverschmutzung nur auf Basis der Leitschadstoffe den Verursachergruppen zuordnen, würde den Emittenten der Leitschadstoffe tendenziell zu grosse sowie den Emittenten der übrigen Schadstoffe tendenziell zu geringe Anteile zugeordnet.

«Verursachergruppen und Schadensbereich im Kanton Zürich im Jahr 2010»

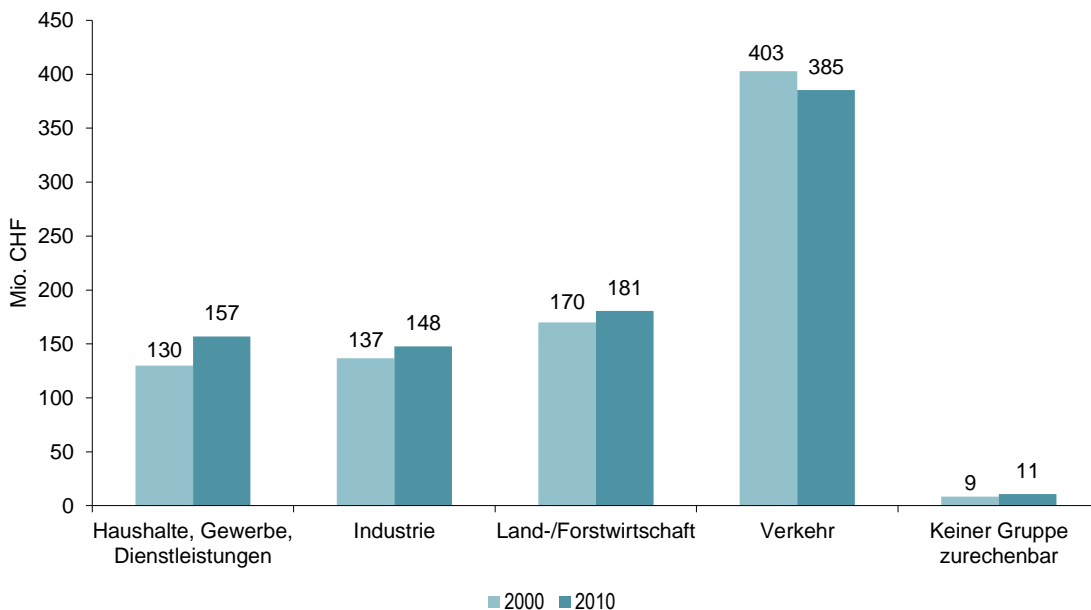


econcept

Figur 20: Aufteilung der Gesamtkosten auf Verursachergruppen und Schadensbereiche im Kanton Zürich im Jahr 2010.

Figur 21 zeigt die Aufteilung der luftschadstoffbedingten Kosten auf die Verursachergruppen für die Jahre 2000 und 2010.

«Die Verursachergruppen im Kanton Zürich in den Jahren 2000 und 2010»



econcept

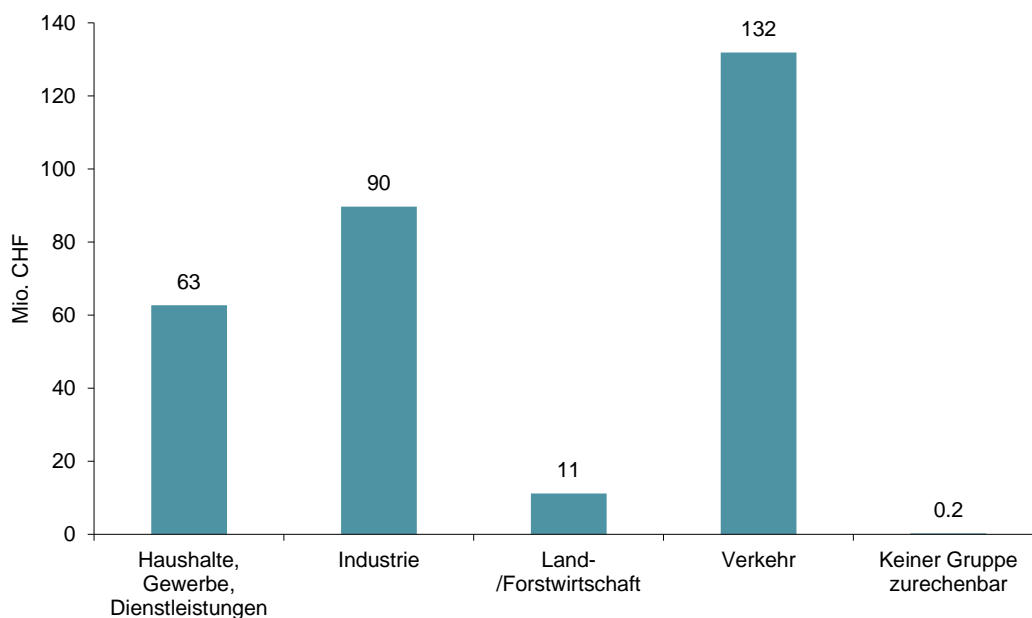
Figur 21: Aufteilung der luftschadstoffbedingten Gesamtkosten auf die Verursachergruppen im Kanton Zürich in den Jahren 2000 und 2010.

Obwohl alle Verursachergruppen die Emissionen der meisten Schadstoffe tendenziell auf gleichem Niveau halten oder senken konnten (vgl. Tabelle 26 in Anhang A-1), haben sie (mit Ausnahme des Verkehrs) im Jahr 2010 höhere luftschadstoffbedingte Kosten verursacht als im Jahr 2000. Zum einen sind in der Regel die Schadenkosten pro Fall oder Ereignis (Gesundheitskosten, Kosten für Gebäudesanierungen, etc.) gestiegen. Zum anderen haben die betroffene Bevölkerung sowie die belasteten Gebäudeflächen zugenommen. Nur beim Verkehr war der Emissionsrückgang zwischen 2000 und 2010 so deutlich, dass dies auch zu einem Rückgang der luftschadstoffbedingten Kosten geführt hat.

8.3 Stadt Zürich

In Figur 22 dargestellt ist die Aufteilung der luftschadstoffbedingten Gesamtkosten in der Stadt Zürich auf die verschiedenen Verursachergruppen. Den grössten Anteil an den luftschadstoffbedingten Gesamtkosten in der Stadt Zürich hat mit 132 Mio. CHF im Jahr 2010 der Verkehr, gefolgt von der Gruppe «Industrie» mit 90 Mio. CHF, wobei Baumaschinen mit 49 Mio. CHF und industrielle und gewerbliche Prozesse mit 22 Mio. CHF zu Buche schlagen (vgl. Tabelle 43 in Anhang A-6). Auch die Gruppe «Haushalte, Gewerbe und Dienstleistungen» verursacht mit 63 Mio. CHF luftschadstoffbedingte Kosten in relevantem Ausmass, mehrheitlich durch Feuerungen. Die durch die Land- und Forstwirtschaft verursachten Kosten von 11 Mio. sind vergleichsweise gering.

«Die Verursachergruppen in der Stadt Zürich im Jahr 2010»



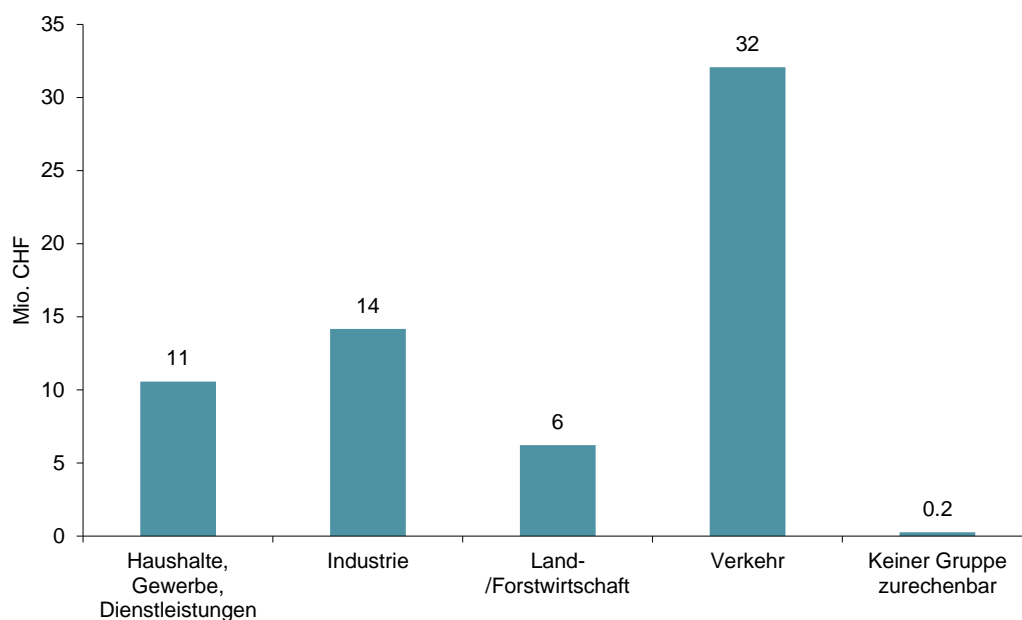
econcept

Figur 22: Aufteilung der luftschadstoffbedingten Gesamtkosten in der Stadt Zürich im Jahr 2010 auf die Verursachergruppen

8.4 Stadt Winterthur

Figur 23 zeigt die Aufteilung der luftschadstoffbedingten Kosten in Winterthur im Jahr 2010 auf die verschiedenen städtischen Verursachergruppen. Den grössten Anteil an den luftschadstoffbedingten Kosten hat mit 32 Mio. CHF der Verkehr, wobei fast 30 Mio. dem Strassenverkehr zuzuordnen sind (siehe Tabelle 44 in Anhang A-6). An zweiter Stelle steht mit 14 Mio. CHF die Gruppe «Industrie», wobei hier vor allem Baumaschinen, industrielle Einzelquellen sowie industrielle und gewerbliche Prozesse relevant sind. An dritter und vierter Stelle stehen die Gruppen «Haushalt, Gewerbe, Dienstleistungen» und «Land-/Forstwirtschaft». Bei diesen sind Feuerungen, Vieh sowie landwirtschaftliche Fahrzeuge die wichtigsten Emittenten.

«Die Verursachergruppen in der Stadt Winterthur im Jahr 2010»



econcept

Figur 23: Aufteilung der luftschadstoffbedingten Gesamtkosten in der Stadt Winterthur im Jahr 2010 auf die Verursachergruppen

Anhang

A-1 Emissionen 2010 und 2000

Tabelle 26 zeigt die Emissionen im Kanton Zürich im Jahr 2010 sowie die Veränderung zwischen 2000 und 2010.

Der Ausstoss von Ammoniak ist zwischen 2000 und 2010 ungefähr gleich geblieben. Die Feinstaubemissionen wurden insgesamt nur leicht reduziert, da der deutlichen Abnahme in Land- und Forstwirtschaft und Industrie eine leichte Zunahme bei der grossen Gruppe «Haushalt, Gewerbe und Dienstleistungen» gegenübersteht. Die übrigen Schadstoffe wurden 2010 deutlich weniger emittiert als 2000.

Emissionen und Verursachergruppen in Kanton Zürich										
	2010 [t/a]					Veränderung gegenüber 2000				
	NH ₃	NM-VOC	NO _x	PM10	EC	NH ₃	NM-VOC	NO _x	PM10	EC
Haushalte, Gewerbe und Dienstleistungen	114	463	1'682	618	120	-13%	-2%	-12%	+2%	+3%
Industrie	2	7'664	1'494	521	32	0%	-36%	-22%	-11%	-39%
Land- und Forstwirtschaft	3'556	499	644	403	44	+5%	-17%	-22%	-10%	-19%
Verkehr	402	3'379	6'309	819	136	-38%	-54%	-40%	-1%	-22%
Total	4'074	12'006	10'130	2'361	331	-2%	-41%	-33%	-4%	-16%

Tabelle 26: Emissionen und Verursachergruppen im Kanton Zürich 2010 und Veränderung gegenüber 2000.
Quelle: AWEL.

Tabelle 27 und Tabelle 28 zeigen die Schadstoffemissionen und ihre Verursacher in den Städten Winterthur und Zürich im Jahr 2010 sowie die Veränderung gegenüber dem Jahr 2000. Die Bedeutung der einzelnen Schadstoffe ist in den Städten etwas anders als im Gesamtkanton: Ammoniak trägt in den Städten weniger zur Luftbelastung bei, da Ammoniak grösstenteils durch Viehwirtschaft entsteht. Hingegen spielen volatile Kohlenstoffe in den Städten eine grössere Rolle als im Gesamtkanton, welche vor allem durch die Verwendung von Lösemitteln sowie durch den Verkehr entstehen.

Emissionen und Verursacherguppen in der Stadt Zürich										
	2010 [t/a]					Veränderung gegenüber 2000				
	NH ₃	NM-VOC	NO _x	PM10	EC	NH ₃	NM-VOC	NO _x	PM10	EC
Haushalte, Gewerbe und Dienstleistungen	31	90	519	52	9	-13%	-8%	-16%	-3%	+1%
Industrie	1	2'050	451	150	10	0%	-37%	-25%	-12%	-38%
Land- und Forstwirtschaft	34	10	13	8	1	+2%	-22%	-24%	-15%	-27%
Verkehr	72	818	834	156	22	-43%	-54%	-42%	1%	-18%
Total	137	2'969	1'816	366	43	-30%	-42%	-32%	-5%	-21%

Tabelle 27: Emissionen und Verursacherguppen in der Stadt Zürich 2010 und Veränderung gegenüber 2000. Quelle: AWEL.

Emissionen und Verursacherguppen in der Stadt Winterthur										
	2010 [t/a]					Veränderung gegenüber 2000				
	NH ₃	NM-VOC	NO _x	PM10	EC	NH ₃	NM-VOC	NO _x	PM10	EC
Haushalte, Gewerbe und Dienstleistungen	8	27	116	31	6	-13%	-2%	-12%	+3%	+3%
Industrie	0	612	174	35	2	keine Emis.	-36%	-12%	-8%	-40%
Land- und Forstwirtschaft	59	11	14	8	1	+3%	-16%	-23%	-13%	-24%
Verkehr	31	277	467	64	11	-39%	-55%	-42%	-6%	-28%
Total	98	928	770	137	20	-16%	-43%	-33%	-5%	-22%

Tabelle 28: Emissionen und Verursacherguppen in der Stadt Winterthur 2010 und Veränderung gegenüber 2000. Quelle: AWEL.

A-2 Immissionen

Belastungsniveau	Kanton ZH	Stadt Zürich	Stadt Winterthur
< 15µg/m ³	0.0%	0.0%	0.0%
15µg/m ³ - 20µg/m ³	38.2%	0.3%	3.4%
20µg/m ³ - 25µg/m ³	60.2%	94.4%	96.6%
> 25µg/m ³	1.6%	5.3%	0.0%

Tabelle 29: **Modellierte Jahresmittel PM10-Immissionen 2000, exponierte Bevölkerung im Jahr 2000.**
Quellen: Modellierung OSTLUFT, Volkszählung 2000.

Belastungsniveau	Kanton ZH	Stadt Zürich	Stadt Winterthur
< 15µg/m ³	0.0%	0.0%	0.0%
15µg/m ³ - 20µg/m ³	63.5%	6.6%	57.7%
20µg/m ³ - 25µg/m ³	36.3%	92.7%	42.3%
> 25µg/m ³	0.2%	0.7%	0.0%

Tabelle 30: **Modellierte Jahresmittel PM10-Immissionen 2010, exponierte Bevölkerung im Jahr 2010.**
Quellen: Modellierung OSTLUFT, Volkszählung 2010.

Raumeinheiten		Gemein- mei- nen	Fläche (ohne Seen) [km ²]	PM10-Immissionen 2000 [µg/m ³]				
Typ	Bezeichnung			ANZAHL	MIN	MAX	RANGE	MEAN
1	Metropolen (Stadt Zürich)	1	91.9	19.0	26.8	7.8	21.8	1.5
2	Agglomerationen von Metropolen	103	846.3	16.8	30.9	14.1	19.4	1.1
3	Kerngemeinden	2	85.0	18.0	24.0	6.0	20.1	0.9
4	Sonstige Agglomerationen	21	194.0	15.7	22.1	6.5	18.8	1.1
8	Land	44	442.2	13.8	20.7	6.9	18.2	1.1

Tabelle 31: **PM10 Immissionen 2000.** Quellen: Modellierung OSTLUFT, Agglomerationstypen gemäss BFS, VZ 2000.

Raumeinheiten		Gemein- meinden	Fläche (*) [km ²]	PM10-Immissionen 2010 [µg/m ³]				
Typ	Bezeichnung			Anzahl	MIN	MAX	RANGE	MEAN
1	Metropolen (Stadt Zürich)	1	91.9	18.0	25.6	7.6	20.7	1.5
2	Agglomerationen von Metropolen	103	846.3	15.8	29.9	14.1	18.3	1.0
3	Kerngemeinden	2	85.0	17.0	22.8	5.7	19.0	0.9
4	Sonstige Agglomerationen	21	194.0	14.9	20.9	6.1	17.7	1.0
8	Land	44	442.2	13.1	19.6	6.5	17.2	1.0

Tabelle 32: **PM10 Immissionen 2010**. Quellen: Modellierung OSTLUFT, Agglomerationstypen gemäss BFS, VZ 2000.

Jahr	O ₃ AOT40f-Messwerte [ppm*h]
1984	9.2
1985	16.4
1986	15.8
1987	15.1
1988	12.2
1989	13.3
1990	15
1991	16.6
1992	15.8
1993	12
1994	17.1
1995	16.6
1996	14.9
1997	16.1
1998	19.6
1999	14.3
2000	12.7
2001	15.1
2002	16
2003	29.6
2004	16.2
2005	15.2
2006	19.8
2007	14.6
2008	13
2009	13.3
2010	14.7
2011	16

Tabelle 33: Ozonbelastung: AOT40f-Messwerte, Dübendorf-EMPA (vorstädtisch, Hintergrund).

Jahr	O ₃ AOT40c-Messwerte [ppm*h]
1992	10.9
1993	7.9
1994	12.8
1995	12.5
1996	10.8
1997	8.5
1998	13.0
1999	8.4
2000	7.4
2001	11.0
2002	11.9
2003	17.2
2004	9.8
2005	11.4
2006	17.0
2007	8.3
2008	10.9
2009	7.2
2010	11.1
2011	9.7

Tabelle 34: Ozonbelastung: AOT40c-Messwerte, Dübendorf-EMPA (vorstädtisch, Hintergrund).

A-3 Gesundheitskosten

A-3.1 Berechnung des Nettoproduktionswertes pro Kopf

Für die Ermittlung der Produktionsausfallkosten im Falle von Krankheit oder Tod wird der durchschnittliche Nettoproduktionswert pro Kopf anhand von Angaben aus der volkswirtschaftlichen Gesamtrechnung sowie der Bevölkerungsstatistik des BFS berechnet. Die Formel zur Berechnung lautet (ecoplan 2001):

Nettoproduktionswert p.c. =

$$\frac{\text{Bruttoeinkommen} + \Delta \text{ berufliche Vorsorgeansprüche}}{\text{Perm. Wohnbevölkerung zwischen 17 und 65 Jahren}} - \frac{\text{Eigenkonsum}}{\text{Perm. Wohnbevölkerung}}$$

A-4 Gebäudeschadenskosten

A-4.1 Fassadenflächen in den Jahren 2000 und 2010

Fassadenflächen im Kanton Zürich 2010 [m ²]							
Agglom.-Typ	Verputzt	Roh	Glas/Metall	Vorgehängt	Türen/Tore	Fenster	Total
Metropolen (Stadt Zürich)	17'423'321	1'893'201	793'834	4'120'160	859'566	7'517'215	32'607'298
Agglomerationen von Metropolen	26'344'838	5'535'181	1'388'528	10'102'531	1'643'378	13'193'822	58'208'277
Kerngemeinden innerhalb von Metropolitan- räumen	4'904'292	779'812	233'742	1'612'905	279'378	2'264'003	10'074'131
Sonstige Agglomerationen	3'560'724	696'971	128'289	1'472'019	233'729	1'624'029	7'715'760
Land	2'948'097	555'886	70'305	1'632'868	199'705	1'227'419	6'634'281
Total	55'181'272	9'461'050	2'614'698	18'940'481	3'215'757	25'826'488	115'239'747

Tabelle 35: Fassadenflächen im Kanton Zürich 2010. Quelle: Datenbank Wüest&Partner 2012.

A-4.2 Verkehrsexponierte Flächen in den Jahren 2000 und 2010

Agglomerationstyp	Anteil verkehrsexponierten 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 36: Verkehrsexponierte Fassadenfläche nach den acht Agglomerationstypen des BFS. Quelle: ARE 2004. Aktuellere Angaben liegen zurzeit gemäss unseren Recherchen und Auskünften von Wüest&Partner nicht vor.

A-4.3 Baukosten- und Lohnentwicklung 2000 bis 2010

Baukostenindex Hochbau Schweiz (Oktober 1998 = 100)			
	Oktober 2000	Oktober 2005	Oktober 2010
Indexstand	107.0	110.6	122.7
Zunahme in Prozent seit 2000	-	3.4%	14.6%
Zunahme in Prozent seit 2005	-	-	10.9%

Tabelle 37: Baukostenindex Hochbau Schweiz. Quelle: BFS.

Nominallohnindex Schweiz (1939 = 100)			
	2000	2005	2010
Indexstand	1'963	2'115	2'285
Zunahme in Prozent seit 2000	-	7.7%	16.4%
Zunahme in Prozent seit 2005	-	-	8.0%

Tabelle 38: Nominallohnindex Schweiz. Quelle: BFS.

A-4.4 Zuordnung der Gemeinden zu den Agglomerationstypen im Kanton Zürich

Gemeinde	Agglomerationstyp
Zürich	Metropole
Wetzikon ZH	Kerngemeinden innerhalb Metropolitanräumen
Winterthur	Kerngemeinden innerhalb Metropolitanräumen
Adliswil	Agglomerationen von Metropolen
Aesch b.Birm.	Agglomerationen von Metropolen
Aeugst a.A.	Agglomerationen von Metropolen
Affoltern a.A.	Agglomerationen von Metropolen
Bachenbülach	Agglomerationen von Metropolen
Bassersdorf	Agglomerationen von Metropolen
Birmensdorf	Agglomerationen von Metropolen
Bonstetten	Agglomerationen von Metropolen
Boppelsen	Agglomerationen von Metropolen
Brütten	Agglomerationen von Metropolen
Bubikon	Agglomerationen von Metropolen
Buchs ZH	Agglomerationen von Metropolen
Bülach	Agglomerationen von Metropolen
Dällikon	Agglomerationen von Metropolen
Dänikon	Agglomerationen von Metropolen
Dielsdorf	Agglomerationen von Metropolen
Dietikon	Agglomerationen von Metropolen
Dietikon	Agglomerationen von Metropolen
Dübendorf	Agglomerationen von Metropolen
Egg	Agglomerationen von Metropolen
Eglisau	Agglomerationen von Metropolen
Embrach	Agglomerationen von Metropolen
Erlenbach ZH	Agglomerationen von Metropolen
Fällanden	Agglomerationen von Metropolen
Fehraltorf	Agglomerationen von Metropolen
Freienst.-Teu.	Agglomerationen von Metropolen
Geroldswil	Agglomerationen von Metropolen
Glattfelden	Agglomerationen von Metropolen
Gossau ZH	Agglomerationen von Metropolen
Greifensee	Agglomerationen von Metropolen
Grüningen	Agglomerationen von Metropolen
Hedingen	Agglomerationen von Metropolen
Herrliberg	Agglomerationen von Metropolen
Hochfelden	Agglomerationen von Metropolen
Hombrechtikon	Agglomerationen von Metropolen
Horgen	Agglomerationen von Metropolen
Höri	Agglomerationen von Metropolen
Hüntwangen	Agglomerationen von Metropolen
Hüttikon	Agglomerationen von Metropolen
Illnau-Effret.	Agglomerationen von Metropolen
Kilchberg ZH	Agglomerationen von Metropolen
Kloten	Agglomerationen von Metropolen

Gemeinde	Agglomerationstyp
Knonau	Agglomerationen von Metropolen
Küsnacht ZH	Agglomerationen von Metropolen
Kyburg	Agglomerationen von Metropolen
Langnau a.A.	Agglomerationen von Metropolen
Lindau	Agglomerationen von Metropolen
Lufingen	Agglomerationen von Metropolen
Männedorf	Agglomerationen von Metropolen
Maur	Agglomerationen von Metropolen
Meilen	Agglomerationen von Metropolen
Mettmenstetten	Agglomerationen von Metropolen
Mönchaltorf	Agglomerationen von Metropolen
Neerach	Agglomerationen von Metropolen
Nied.weningen	Agglomerationen von Metropolen
Niederglatt	Agglomerationen von Metropolen
Niederhasli	Agglomerationen von Metropolen
Nürensdorf	Agglomerationen von Metropolen
O.engstringen	Agglomerationen von Metropolen
Oberglatt	Agglomerationen von Metropolen
Oberrieden	Agglomerationen von Metropolen
Oberweningen	Agglomerationen von Metropolen
Obfelden	Agglomerationen von Metropolen
Oetwil a.d.Li.	Agglomerationen von Metropolen
Oetwil am See	Agglomerationen von Metropolen
Opfikon	Agglomerationen von Metropolen
Otelfingen	Agglomerationen von Metropolen
Ottenbach	Agglomerationen von Metropolen
Rafz	Agglomerationen von Metropolen
Regensberg	Agglomerationen von Metropolen
Regensdorf	Agglomerationen von Metropolen
Richterswil	Agglomerationen von Metropolen
Rorbas	Agglomerationen von Metropolen
Rümlang	Agglomerationen von Metropolen
Rüschlikon	Agglomerationen von Metropolen
Russikon	Agglomerationen von Metropolen
Schleinikon	Agglomerationen von Metropolen
Schlieren	Agglomerationen von Metropolen
Schöfflisdorf	Agglomerationen von Metropolen
Schwerzenbach	Agglomerationen von Metropolen
Seegräben	Agglomerationen von Metropolen
Stadel	Agglomerationen von Metropolen
Stäfa	Agglomerationen von Metropolen
Stallikon	Agglomerationen von Metropolen
Steinmaur	Agglomerationen von Metropolen
Thalwil	Agglomerationen von Metropolen
U.engstringen	Agglomerationen von Metropolen
Uetikon a.See	Agglomerationen von Metropolen
Uitikon	Agglomerationen von Metropolen
Urdorf	Agglomerationen von Metropolen

Gemeinde	Agglomerationstyp
Uster	Agglomerationen von Metropolen
Volketswil	Agglomerationen von Metropolen
Wädenswil	Agglomerationen von Metropolen
Wallisellen	Agglomerationen von Metropolen
Wangen-Brütis.	Agglomerationen von Metropolen
Wasterkingen	Agglomerationen von Metropolen
Weiach	Agglomerationen von Metropolen
Weiningen ZH	Agglomerationen von Metropolen
Wettswil a.A.	Agglomerationen von Metropolen
Wil ZH	Agglomerationen von Metropolen
Winkel	Agglomerationen von Metropolen
Zollikon	Agglomerationen von Metropolen
Zumikon	Agglomerationen von Metropolen
Adlikon	Land
Altikon	Land
Andelfingen	Land
Bachs	Land
Bauma	Land
Benken ZH	Land
Berg am Irchel	Land
Bertschikon	Land
Buch am Irchel	Land
Dägerlen	Land
Dorf	Land
Elgg	Land
Ellikon a.d.T.	Land
Fiscenthal	Land
Flaach	Land
Hagenbuch	Land
Hausen a.A.	Land
Hirzel	Land
Hofstett. b.E.	Land
Humlikon	Land
Hütten	Land
Kappel a.A.	Land
Kleinandelfgen	Land
Marthalen	Land
Maschwanden	Land
Oberembrach	Land
Oberstammheim	Land
Ossingen	Land
Rheinau	Land
Rifferswil	Land
Schlatt	Land
Schönenb. ZH	Land
Sternenberg	Land
Thalhm. a.d.T.	Land
Trüllikon	Land

Gemeinde	Agglomerationstyp
Truttikon	Land
Turbenthal	Land
Unterstammheim	Land
Volken	Land
Wald ZH	Land
Waltalingen	Land
Weisslingen	Land
Wila	Land
Wildberg	Land
Hinwil	Sonstige Agglomeration innerhalb Metropolitanraum
Bäretswil	Sonstige Agglomeration innerhalb Metropolitanraum
Dachsen	Sonstige Agglomeration innerhalb Metropolitanraum
Dättlikon	Sonstige Agglomeration innerhalb Metropolitanraum
Dinhard	Sonstige Agglomeration innerhalb Metropolitanraum
Dürnten	Sonstige Agglomeration innerhalb Metropolitanraum
Elsau	Sonstige Agglomeration innerhalb Metropolitanraum
Feuerthalen	Sonstige Agglomeration innerhalb Metropolitanraum
Flurlingen	Sonstige Agglomeration innerhalb Metropolitanraum
Henggart	Sonstige Agglomeration innerhalb Metropolitanraum
Hettlingen	Sonstige Agglomeration innerhalb Metropolitanraum
Hittnau	Sonstige Agglomeration innerhalb Metropolitanraum
Laufen-Uhwies.	Sonstige Agglomeration innerhalb Metropolitanraum
Neftenbach	Sonstige Agglomeration innerhalb Metropolitanraum
Pfäffikon	Sonstige Agglomeration innerhalb Metropolitanraum
Pfungen	Sonstige Agglomeration innerhalb Metropolitanraum
Rickenbach ZH	Sonstige Agglomeration innerhalb Metropolitanraum
Rüti ZH	Sonstige Agglomeration innerhalb Metropolitanraum
Seuzach	Sonstige Agglomeration innerhalb Metropolitanraum
Wiesendangen	Sonstige Agglomeration innerhalb Metropolitanraum
Zell ZH	Sonstige Agglomeration innerhalb Metropolitanraum

Tabelle 39: Zuordnung der Zürcher Gemeinden zu den Agglomerationstypen

A-5 Ernteauffälle

Nutzpflanzenart	Fläche			Ernteerträge	
	CH in ha	ZH in ha	ZH in % CH	CH in t	ZH in t
Weizen	79853	8317	10.4%	507469	52854.9
Körnermais	16898	2348	13.9%	143502	19939.8
Zuckerrüben	17842	3054	17.1%	1302055	222871.6
Kartoffeln	10874	964	8.9%	421000	37322.4
Raps	21806	2211	10.1%	67900	6884.7
Sonnenblumen	3563	530	14.9%	10600	1576.8
Trauben	13079	567	4.3%	166825	7232.2
Gemüse	9460	1577	16.7%	179545	29930.5

Tabelle 40: Berechnung der Ernteerträge im Kanton ZH in t für das Jahr 2010. Quellen: Bauernverband SBV und Bundesamt für Statistik. (Zahlen für Traubenernte stammen aus dem Jahr 2005, keine aktuelleren Angaben verfügbar.)

A-6 Aufteilung der Kosten auf die Verursachergruppen

Kostensätze für die Schweiz im Jahr 2010: Gesundheitskosten pro Tonne Schadstoffemission	
	[EUR 2000 / t]
NH ₃	10'026
NMVOC	918
NO _x	17'162
PPMco	2'167
PPM2.5	40'529
PPM10	29'020

Tabelle 41: Im Rahmen des NEEDs-Projektes ermittelte Kostensätze für Luftschadstoffe. Quellen:
<http://www.needs-project.org/docs/RS3a%20D1.1.zip>. Annahme zur Berechnung des PM10-Kostensatzes: PM10 besteht zu 70% aus PM 2.5 (UBA 2012).
 PPMco: Primary particulate matter coarse with an aerodynamic diameter smaller than 10 µm but larger 2.5 µm.
 PPM2.5: Primary particulate matter with an aerodynamic diameter smaller than 2.5 µm.
 PPM10: Primary particulate matter with an aerodynamic diameter smaller than 10 µm.

Aufteilung der luftschadstoffbedingten Kosten auf die Verursacherguppen im Kanton Zürich [Mio. CHF im Jahr 2010]							
		PM10	NO _x	NH ₃	NMVOG	O ₃	Total
Haushalte, Gewerbe, Dienstleistungen	Brand-/Feuerschäden	3.7	0.1	-	0.0	Keine Zuordnung möglich	3.8
	Feuerungen Holz	64.8	8.9	-	0.3		74.0
	Feuerungen nicht Holz	1.2	58.8	-	0.5		60.5
	Garten/Hobby	15.2	0.2	3.2	0.1		18.8
	Total Haushalte, Gewerbe, Dienstleistungen	84.8	68.0	3.2	1.0		156.9
Industrie	Baumaschinen	43.5	18.8	-	-		62.4
	Industrie - Einzelquellen	3.0	15.3	0.1	0.2		18.5
	Industrielle Fahrzeuge	0.8	3.7	-	0.0		4.5
	Industrielle und gewerbliche Prozesse	24.0	22.6	-	2.6		49.2
	Verteilung Brenn-/Treibstoffe	-	-	-	0.8		0.8
	Verwendung von Lösemittel	-	-	-	12.2		12.2
	Total Industrie	71.5	60.4	0.1	15.8		147.7
Land- /Forstwirtschaft	Feuerungen	0.5	0.2	-	0.0		0.8
	Forstwirtschaftliche Fahrzeuge	0.4	0.6	-	-		1.1
	Landwirtschaftliche Fahrzeuge	34.2	13.1	-	0.4		47.6
	Nutzflächen	-	4.9	13.4	0.6	18.9	
	Offene Verbrennung	9.7	0.7	-	0.1	10.6	
	Vieh	10.4	6.4	85.0	-	101.8	
	Total Land-/Forstwirtschaft	55.3	26.0	98.3	1.0	180.7	
Verkehr	Luftfahrt	3.2	41.0	-	0.8	45.0	
	Schiene	21.4	2.5	-	-	23.9	
	Schiffe	-	6.7	-	-	6.7	
	Strasse - Linkemissionen warm	78.4	173.5	10.5	1.4	263.9	
	Strasse - Zonenemissionen Start, Stop, Tankatmung	2.3	15.1	-	4.6	22.0	
	Strasse - Zonenemissionen warm	7.0	16.2	0.6	0.2	24.0	
	Total Verkehr	112.4	255.0	11.1	7.0	385.5	
Total		324.1	409.4	112.6	24.7	10.92	881.8

Tabelle 42: Aufteilung der luftschadstoffbedingten Kosten auf die Verursacherguppen im Kanton Zürich im Jahr 2010.

Aufteilung der luftschadstoffbedingten Kosten auf die Verursachergruppen in der Stadt Zürich [Mio. CHF im Jahr 2010]							
		PM10	NOx	NH ₃	NMVOC	O ₃	Total
Haushalte, Gewerbe, Dienstlsg	Brand-/Feuerschäden	1.59	0.03	-	0.01	Keine Zuordnung möglich	1.62
	Feuerungen Holz	7.88	0.99	-	0.02		8.89
	Feuerungen nicht Holz	1.07	36.43	-	0.20		37.71
	Garten/Hobby	7.38	0.01	7.03	0.02		14.44
	Total Haushalte, Gewerbe, Dienstleistungen	17.9	37.5	7.0	0.3		62.7
Industrie	Baumaschinen	37.74	11.70	-	-		49.44
	Industrie - Einzelquellen	0.75	10.59	0.14	-		11.48
	Industrielle Fahrzeuge	0.31	1.01	-	0.01		1.33
	Industrielle und gewerbliche Prozesse	12.51	9.24	-	0.45		22.19
	Verteilung Brenn-/Treibstoffe	-	-	-	0.27		0.27
	Verwendung von Lösemittel	-	-	-	5.01		5.01
	Total Industrie	51.3	32.5	0.1	5.7		89.7
Land-/Forstwirtschaft	Feuerungen	0.03	0.01	-	-		0.04
	Forstwirtschaftliche Fahrzeuge	0.18	0.22	-	-	0.40	
	Landwirtschaftliche Fahrzeuge	1.57	0.39	-	0.01	1.97	
	Nutzflächen	-	0.09	1.25	0.01	1.35	
	Offene Verbrennung	0.56	0.03	-	0.00	0.59	
	Vieh	0.33	0.17	6.36	-	6.85	
	Total Land-/Forstwirtschaft	2.7	0.9	7.6	0.0	11.2	
Verkehr	Luftfahrt	-	-	-	-	0.00	
	Schiene	12.87	0.37	-	-	13.24	
	Schiffe	-	0.58	-	-	0.58	
	Strasse - Linkemissionen warm	33.86	43.49	14.90	0.38	92.63	
	Strasse - Zonenemissionen Start, Stop, Tankatmung	1.87	7.97	-	1.85	11.69	
	Strasse - Zonenemissionen warm	4.62	7.79	1.26	0.06	13.73	
	Total Verkehr	53.2	60.2	16.2	2.3	131.9	
Total		125.1	131.1	30.9	8.3	0.2	295.7

Tabelle 43: Aufteilung der luftschadstoffbedingten Kosten auf die Verursachergruppen in der Stadt Zürich im Jahr 2010.

Aufteilung der luftschadstoffbedingten Kosten auf die Verursacherguppen in der Stadt Winterthur [Mio. CHF im Jahr 2010]							
		PM10	NOx	NH ₃	NMVOC	O ₃	Total
Haushalte, Gewerbe, Dienstleistungen	Brand-/Feuerschäden	0.32	0.01	-	0.00	Keine Zuordnung möglich	0.33
	Feuerungen Holz	3.74	0.42	-	0.01		4.18
	Feuerungen nicht Holz	0.11	4.03	-	0.03		4.17
	Garten/Hobby	1.25	0.01	0.61	0.01		1.88
	Total Haushalte, Gewerbe, Dienstleistungen	5.4	4.5	0.6	0.1		10.6
Industrie	Baumaschinen	3.50	1.12	-	-		4.62
	Industrie - Einzelquellen	0.28	3.42	-	0.15		3.85
	Industrielle Fahrzeuge	0.09	0.32	-	0.00		0.42
	Industrielle und gewerbliche Prozesse	2.35	1.85	-	0.09		4.29
	Verteilung Brenn-/Treibstoffe	-	-	-	0.06		0.06
	Verwendung von Lösemittel	-	-	-	0.93		0.93
	Total Industrie	6.2	6.7	-	1.2		14.2
Land-/Forstwirtschaft	Feuerungen	0.02	0.00	-	0.00		0.02
	Forstwirtschaftliche Fahrzeuge	0.04	0.06	-	-	0.10	
	Landwirtschaftliche Fahrzeuge	0.84	0.22	-	0.01	1.07	
	Nutzflächen	-	0.12	0.81	0.01	0.94	
	Offene Verbrennung	0.30	0.02	-	0.00	0.32	
	Vieh	0.16	0.10	3.50	-	3.76	
	Total Land-/Forstwirtschaft	1.4	0.5	4.3	0.0	6.2	
Verkehr	Luftfahrt	-	-	-	-	0.00	
	Schiene	1.97	0.14	-	-	2.11	
	Schiffe	-	-	-	-	0.00	
	Strasse - Linkemissionen warm	8.19	14.97	2.07	0.11	25.34	
	Strasse - Zonenemissionen Start, Stop, Tankatmung	0.29	1.39	-	0.43	2.11	
	Strasse - Zonenemissionen warm	0.86	1.49	0.15	0.02	2.51	
	Total Verkehr	11.3	17.0	2.2	0.6	32.1	
Total		24.3	29.7	7.1	1.9	0.3	63.3

Tabelle 44: Aufteilung der luftschadstoffbedingten Kosten auf die Verursacherguppen in der Stadt Winterthur im Jahr 2010.

Literatur und Quellen

- Arealstatistik (2004/09): Arealstatistik des Bundesamtes für Statistik, <http://www.bfs.admin.ch/bfs/portal/de/index/themen/02/03.html>, abgerufen am 4.5.2013.
- Aphekom – Improving Knowledge and Communication for Decision Making on Air Pollution and Health in Europe, Guidelines und City Reports, <http://www.aphekom.org/web/aphekom.org/publications>
- Braun S., B. Rihm, C. Schindler, W. Flückiger (1999). Growth of mature beech in relation to ozone and nitrogen deposition: an epidemiological approach. *Water, Air, and Soil Pollution* 116 (1999), S. 357-364.
- Bundesamt für Raumentwicklung ARE (2004): Verkehrsbedingte Gebäudeschäden in der Schweiz, Aktualisierung der externen Kosten 2000, Bern.
- Bundesamt für Raumentwicklung (2006): Externe Kosten des Strassen- und Schienenverkehrs 2000, Klima und bisher nicht erfasste Umweltbereiche, städtische Räume sowie vor- und nachgelagerte Prozesse. Studie erstellt von Infras im Auftrag von ARE und BAFU, Bern.
- Bundesamt für Raumentwicklung ARE und Bundesamt für Umwelt BAFU (2008): Externe Kosten des Verkehrs in der Schweiz, Aktualisierung für das Jahr 2005 mit Bandbreiten, Bern.
- Bundesamt für Raumentwicklung ARE (2010): Externe Kosten 2006-2007, Berechnung der externen Kosten der Verkehrs in der Schweiz.
- Bundesamt für Umwelt (2011): Jahrbuch Wald und Holz 2011, Bundesamt für Umwelt, Bern.
- BUWAL (2005): Stickstoffhaltige Luftschadstoffe in der Schweiz, Status Bericht der Eidg. Kommission für Lufthygiene.
- Datenabfrage der Jahreswerte von Luftschadstoffen in der Schweiz (2013), http://www.bafu.admin.ch/luft/luftbelastung/blick_zurueck/01694/immissionsdaten/index.html?lang=de, abgerufen am 3.5.2013.
- Eco-indicator (1999): A damage oriented method for Life Cycle Impact Assessment: Methodology Report, Pre Consultants, Amersfort.
- econcept (2006): Die Kosten von Luftverschmutzung und Treibhausgasemission im Kanton Zürich 2005, im Auftrag vom AWEL Kt. ZH, Abteilung Lufthygiene. Autoren: Ott W., Baur M. und Steiner P.
- Ecoplan (2002): Unfallkosten im Strassen- und Schienenverkehr der Schweiz 1998. Bundesamt für Raumentwicklung, Bern, 2002.

- Ecoplan (2012): Energiestrategie 2050 – volkswirtschaftliche Auswirkungen, Analyse mit einem berechenbaren Gleichgewichtsmodell für die Schweiz, Bundesamt für Energie, Bern.
- Fuhrer J. (2001): Unterlagen zur Vorlesung “Wirkung von Chemikalien auf Umwelt und Mensch und ihre Vernetzung“ am Departement Umweltnaturwissenschaften der ETH Zürich. Prof. Jürg Fuhrer. Eidgenössische Forschungsanstalt für Agrarökologie und Landbau Liebefeld-Bern, Wintersemester 2000/2001.
- Holland M., G. Mills, F. Hayes, A. Buse, L. Emberson, H. Cambridge, S. Cinderby, A. Terry, M. Ashmore (2002): Economic Assessment of Crop Yield Losses from Ozone Exposure. The UNECE International Cooperative Programme on Vegetation. Contract EPG 1/3/170. University of Wales, Bangor (UK).
- Karlsson P. E., H. Pleijel, M. Belhaj, H. Danielsson, B. Dahlin, M. Andersson, M. Hansson, J. Munthe, P. Grennfelt (2005): Economic Assessment of the Negative Impacts of Ozone on Crop Yields and Forest Production: A Case Study of the Estate Östads Säteri in Southwestern Sweden. *Ambio*, Vol. 34, No. 1, p. 32-40.
- NEEDS (2004): Assessment of Biodiversity Losses – Monetary Valuation of Biodiversity Losses due to Land Use Changes and Airborne Emissions, <http://www.needs-project.org>.
- NEEDS (2007): Final Report on the monetary valuation of mortality and morbidity risks from air pollution, NEEDS RS1b, Deliverable D6.7.
- Ouimet R., L. Duchesne, D. Houle, P. A. Arp (2001): Critical Loads and Exceedances of Acid Deposition and Associated Forest Growth in the Northern Hardwood and Boreal Coniferous Forests in Québec, Canada. *Water, Air and Soil Pollution (Focus)*, Vol. 1, pp. 119-134.
- OSTLUFT (2013): Feinstaubimmissionen Ostschweiz/Liechtenstein, Modell und Resultate 2005-2020, INFRAS/METEOTEST im Auftrag OSTLUFT - Die Luftqualitätsüberwachung der Ostschweizer Kantone und des Fürstentums Liechtenstein. Schlussbericht. Zürich/Bern, 15. Februar 2013.
- OSTLUFT (2011): Dokumentation Emissionskataster OSTLUFT, Version 2.0, November 2011.
- OSTLUFT (2006): Immissionsgrenzwert PM10, Überschreitungswahrscheinlichkeiten, INFRAS/STAMPFLI im Auftrag OSTLUFT - Die Luftqualitätsüberwachung der Ostschweizer Kantone und des Fürstentums Liechtenstein. Schlussbericht. Zürich/Bern, 23. November 2006.

Ott W., Baur M., Kaufmann Y., (2006): Assessment of Biodiversity Losses, NEEDS Deliverable D.4.2.- RS 1b/WP4.

ten Brink, B. (2000): Biodiversity Indicators for the OECD Environmental Outlook and Strategy: A Feasibility Study, RIVM report, Bilthoven.

UNECE (United Nations Economic Commission for Europe) (2004): Mapping Manual 2004. UNECE Convention on long-range transboundary air pollution. Manual on methodologies and criteria for modelling and mapping critical loads & levels and air pollution effects, risks and trends. International Cooperative Programme (ICP) on Effects of Air Pollution on Natural Vegetation and Crops.

WGE (Working Group on Effects) (2004): Review and assessment of air pollution effects and their recorded trends. Working Group on Effects (WGE), UNECE Convention on Long-range Transboundary Air Pollution. National Environmental Research Council. United Kingdom.