

AWEL Kanton Zürich, UGZ Stadt Zürich,
Fachstelle Umwelt Winterthur

Die Kosten der Luftverschmutzung 2005 bis 2015

Schlussbericht
3. April 2018

Auftraggeber

Baudirektion des Kantons Zürich
Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft (AWEL)
Abteilung Luft
Stampfenbachstrasse 12, 8090 Zürich
www.luft.zh.ch

Stadt Zürich
Umwelt- und Gesundheitsschutz
Walchestrasse 31, 8021 Zürich
www.stadt-zuerich.ch/ugz

Stadt Winterthur
Umwelt- und Gesundheitsschutz
Departement Sicherheit und Umwelt
Pionierstrasse 7, 8403 Winterthur
www.stadt.winterthur.ch/ugs

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
Stefan von Grünigen, MA UZH in Wirtschaftswissenschaften, Ökonom

Inhalt

	Zusammenfassung	i
1	Einleitung	1
1.1	Ausgangslage und Auftrag	1
1.2	Neue Erkenntnisse und Abweichungen zu früheren Erhebungen der Kosten der Luftverschmutzung	1
1.3	Analyserahmen	2
1.4	Berichtsstruktur	3
2	Gesundheitsschadenskosten	5
2.1	Vorgehen und Quellen	5
2.2	Inputs und Berechnungen	7
2.2.1	Exponierte Bevölkerung	7
2.2.2	Attributable Fälle und Fallzahlen	7
2.2.3	Kosten pro Fall und insgesamt	9
2.3	PM10-bedingte Gesundheitskosten	10
2.3.1	Ergebnisse	10
2.3.2	Determinanten der Kostenentwicklung	11
2.4	NO ₂ -bedingte Gesundheitskosten	12
2.4.1	Vorgehen	12
2.4.2	Inputs und Berechnungen	13
2.4.3	Ergebnisse	14
2.4.4	Determinanten der Kostenentwicklung für den Leitschadstoff NO ₂	15
2.5	Fazit zu den Gesundheitskosten	17
3	Gebäudeschadenskosten	19
3.1	Vorgehen und Quellen	19
3.2	Inputs und Berechnungen	21
3.2.1	Luftschadstoffbedingte Kapitalkosten durch eine kürzere Lebensdauer der Gebäudehülle	21
3.2.2	Reinigungskosten	24
3.3	Ergebnisse	25
3.4	Determinanten der Kostenentwicklung	26
3.5	Einordnung der Ergebnisse	27

4	Waldschadenskosten	29
4.1	Vorgehen und Quellen	29
4.2	Inputs und Berechnungen	31
4.2.1	Schadenskosten durch Ernteverluste	31
4.2.2	Schadenskosten durch ein erhöhtes Windwurfrisiko	34
4.3	Ergebnisse	34
4.4	Determinanten der Kostenveränderung	35
5	Biodiversitätsschadenskosten	37
5.1	Vorgehen und Quellen	37
5.2	Inputs und Berechnungen	38
5.3	Ergebnisse	40
5.3.1	Kanton Zürich	40
5.4	Determinanten der Kostenentwicklung	40
6	Ernteauffälle	43
6.1	Vorgehen und Quellen	43
6.2	Inputs und Berechnungen	43
6.3	Ergebnisse	45
6.4	Determinanten der Kostenentwicklung	46
7	Gesamtkosten und Kostenentwicklung	49
7.1	Einordnung der Ergebnisse	49
7.2	Vergleich mit den Ergebnissen der Erhebung von 2013	49
7.3	Ergebnisse	50
7.3.1	Gesamtkosten	50
7.3.2	Kostenentwicklung	52
7.3.3	Determinanten der Kostenentwicklung	53
8	Volkswirtschaftlicher Nutzen der Verbesserung der Luftqualität	57
9	Aufteilung auf die Verursachergruppen	61
9.1	Vorgehen	61
9.2	Ergebnisse	61
	Anhang	63
A-1	Ergebnisse Stadt Zürich	63
A-2	Ergebnisse Winterthur	71
A-3	Übersicht Dosis-Wirkungs-Relationen für Gesundheitsschäden	79

A-4	Bevölkerungsexpositionen	80
A-5	Aufteilung auf die Verursachergruppen im Detail	82
	Literatur	95

Zusammenfassung

Hintergrund und Ziele

Trotz einer erfolgreichen Luftreinhaltepolitik, die eine deutliche Verbesserung der Luftqualität bewirkt hat, gehört der Kanton Zürich noch immer zu den am stärksten mit Luftschadstoffen belasteten Gebieten in der Schweiz. Weitere Verbesserungen durch lufthygienische Massnahmen werden daher angestrebt. Als wichtiger Indikator für den weiteren Handlungsbedarf dient neben den Emissions-, Immissions-, und Expositionsdaten auch die Schätzung der Schadenskosten. Die Schadenskosten wurden für den Kanton Zürich sowie für die Städte Zürich und Winterthur zuletzt für die Jahre 2000 und 2010 ermittelt. Seither haben sich die lufthygienischen Massnahmen und die Luftqualität verändert. Ebenfalls verändert haben sich in einigen Schadensbereichen die Bewertungsgrundlagen und dadurch bedingt auch nationale und internationale Praktiken und Empfehlungen zur Ermittlung von luftschadstoffbedingten Kosten. Um gleichzeitig dem aktuellen Kenntnisstand Rechnung zu tragen und trotzdem eine konsistente Betrachtung über die Zeit zu ermöglichen, werden daher mit der vorliegenden Studie die Kosten der Luftverschmutzung im Kanton Zürich sowie in den Städten Zürich und Winterthur auch rückwirkend für die früheren Bewertungszeitpunkte neu ermittelt.

Analyserahmen

Betrachtet werden der Kanton Zürich sowie die Städte Zürich und Winterthur in den Jahren 2005, 2010 und 2015. Alle drei Jahre zeichnen sich durch im langfristigen Trend unauffällige Immissions- und Emissionswerte aus. Dem Territorialprinzip entsprechend werden alle *Immissionen* innerhalb der Kantons- bzw. Stadtgrenzen auf die *Emissionen* in denselben Gebieten zurückgeführt. Da angesichts der räumlichen und meteorologischen Gegebenheiten Schadstoffimporte und -exporte sich in etwa die Waage halten dürften, kann dies als vertretbare Vereinfachung eingestuft werden.

Betrachtet werden die zurzeit schadensmässig wichtigsten Stoffe. Zu diesen zählen Feinstaub (PM₁₀), Stickstoffoxide (NO_x), Ozon (O₃) und Ammoniak (NH₃). Untersucht werden deren Wirkungen in den fünf Schadensbereichen Gesundheit, Gebäude, Wald, Biodiversität und landwirtschaftliche Ernteauffälle, wobei je nach Schadensbereich unterschiedliche Schadstoffe im Vordergrund stehen.

Bei den Gesundheitsschadenskosten fokussierten bisherige nationale und regionale Erhebungen auf den in der Vergangenheit relevantesten Luftschadstoff PM₁₀ und verwendeten diesen als Leitschadstoff, da angenommen werden konnte, dass die so erstellten Schätzungen ein gutes Mass für die gesamten luftschadstoffbedingten Gesundheitskosten darstellten. Während aber die PM₁₀-Belastung im Laufe der Zeit deutlich gesenkt werden konnte, hat sich die Belastung mit dem ebenfalls schädlichen NO₂ nicht im gleichen Masse reduziert. Für die vorliegende Studie wurden daher sowohl PM₁₀-bedingte als auch NO₂-bedingte Gesundheitsschadenskosten geschätzt und separat ausgewiesen, wobei sie aufgrund von Überschneidungen der Gesundheitswirkungen nicht addiert werden dürfen.

Umgang mit Unsicherheiten: Bewertung nach «best guess» und «at least»

Die Verlässlichkeit und Validität der für die Ermittlung der Kosten der Luftverschmutzung verfügbaren Grundlagen ist unterschiedlich sowohl hinsichtlich ganzer Schadensbereiche wie auch einzelner Parameter. Nur bei guter Verlässlichkeit und Validität erfolgt die Ermittlung der Kosten als «best guess» bzw. bestmögliche Schätzung, welche in etwa gleich grosse Unsicherheitsbereiche nach oben wie auch nach unten aufweist. Bei unklarer oder eingeschränkter Verlässlichkeit und/oder Validität verfahren wir hingegen nach dem at-least-Ansatz: Das heisst, alle Annahmen, Methoden und Parameterwerte werden so gewählt, dass eher eine Unterschätzung als eine Überschätzung der Kosten der Luftverschmutzung erfolgt. Eine Ausnahme bilden die NO₂-bedingten Gesundheitskosten, für welche wir zwei Werte unter unterschiedlichen Annahmen ermitteln:

- **Mindest-Variante:** Für die Ermittlung des Mindestwertes werden bei der Schätzung der NO₂-bedingten Mortalität entsprechend den aktuell gültigen Empfehlungen der WHO¹ nur NO₂-Expositionen von über 20 µg/m³ berücksichtigt. Ausserdem wird ein Referenzwert von 20 µg/m³ verwendet, womit die Annahme verbunden ist, dass bei NO₂-Konzentrationen von weniger als 20 µg/m³ keine Gesundheitsfolgen auftreten.
- **Umfassende Variante:** Zur Berechnung des umfassenden Wertes werden bei der Schätzung der NO₂-bedingten Mortalität Expositionen ab 5 µg/m³ berücksichtigt und ein Referenzwert von 5 µg/m³ gesetzt. Dahinter steht die Annahme, dass auch bei geringen NO₂-Konzentrationen zwischen 5 und 20 µg/m³ Gesundheitsfolgen auftreten, was durch die vorhandene empirische Evidenz gestützt wird.² Allerdings ist die Dosis-Wirkungs-Relation in diesem Bereich weniger gut belegt als bei höheren Konzentrationen. Der so resultierende Schätzwert ist somit mit erhöhter Unsicherheit behaftet, jedoch nicht als Maximalwert zu verstehen.

Ergebnisse

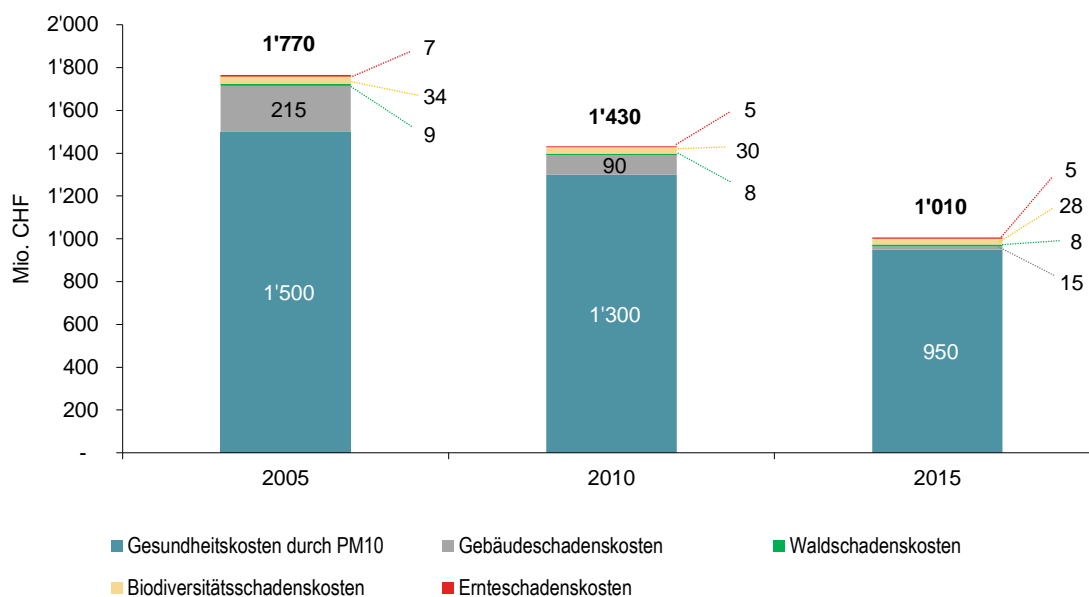
Den geltenden Konventionen folgend weisen wir die Gesamtkosten der Luftverschmutzung unter Einbezug der PM10-bedingten Gesundheitsschadenskosten aus (Figur 1). Die Gesundheitskosten machen mit Abstand den grössten Anteil aus. Gebäude-, Wald-, Biodiversität- und Ernteschadenskosten sind vergleichsweise weniger relevant.

In der Stadt Zürich fallen jeweils rund ein Drittel der Kosten des Gesamtkantons an, in Winterthur jeweils rund 7% bis 8%. Bei der Kostenentwicklung zeigt sich ein sehr ähnliches Bild wie im Gesamtkanton, hingegen sind in den Städten die Schadensbereiche Wald, Biodiversität und Ernten aufgrund der geringen Anteile natürlicher Flächen weniger relevant.

¹ HRAPIE (2013): Health risks of air pollution in Europe – HRAPIE project. Recommendations for concentration–response functions for cost–benefit analysis of particulate matter, ozone and nitrogen dioxide. World health organization WHO, 2013.

² 5 µg/m³ NO₂ können als nicht vermeidbare Grundbelastung interpretiert werden. Ebenso wie der für die Schätzung der PM10-bedingten Kosten verwendete Referenzwert von 7.5 µg/m³ PM10 liegt der Referenzwert von 5 µg/m³ NO₂ um ca. 5 µg/m³ über der auf dem Jungfraujoch gemessenen Konzentration.

Kosten der Luftverschmutzung im Kanton Zürich



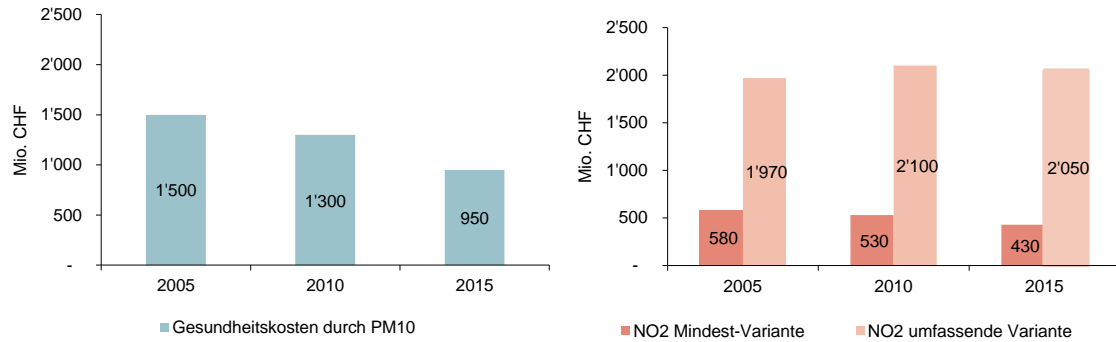
econcept

Figur 1: Kosten der Luftverschmutzung im Kanton Zürich unter Berücksichtigung der PM10-bedingten Gesundheitsschadenskosten. Ergebnisse gerundet.

Im Betrachtungszeitraum sind die Kosten der Luftverschmutzung unter Berücksichtigung der PM10-bedingten Gesundheitskosten im Kanton Zürich von rund 1.8 Mrd. CHF im Jahr 2005 auf rund 1 Mrd. CHF im Jahr 2015 gesunken. Massgeblicher Treiber dieser Kostenentwicklung ist die abnehmende PM10-Belastung, welche trotz Anstieg diverser anderer kostensteigernder Faktoren (z.B. der Bevölkerung) zu einem Kostenrückgang geführt hat. Wäre die PM10-Belastung im Jahr 2015 noch gleich hoch wie im Jahr 2005, lägen die in Figur 1 ausgewiesenen Kosten der Luftverschmutzung im Kanton Zürich im Jahr 2015 über den Werten von 2005.

Die NO₂-bedingten Gesundheitskosten sind nur so weit in den in Figur 1 dargestellten Schätzwerten enthalten, wie sie in der Schätzung der PM10-bedingten Gesundheitskosten durch Überschneidungen der Gesundheitsfolgen miterfasst werden. Die separate Schätzung der NO₂-bedingten Gesundheitskosten anhand der NO₂-Belastungen und den NO₂-spezifischen Dosis-Wirkungs-Relationen führt jedoch auf einen anderen Kostenverlauf: Sofern bei der Schätzung der NO₂-bedingten Kosten das gesamte Belastungsspektrum berücksichtigt wird (umfassende Variante), führen das Bevölkerungswachstum und der Anstieg der Kostensätze trotz leichtem Belastungsrückgang zu gleichbleibend hohen NO₂-bedingten Gesundheitsschadenskosten, die mit rund 2 Mrd. CHF deutlich über den PM10-bedingten Gesundheitskosten liegen (Figur 2). Die Mindestwerte der NO₂-bedingten Gesundheitskosten sind zwischen 2005 und 2010 rückläufig, jedoch nicht im gleichen Masse wie die PM10-bedingten Gesundheitskosten.

Gesundheitsschadenskosten durch PM10 und NO₂



econcept

Figur 2: Gesundheitsschadenskosten durch PM10 und NO₂. PM10- und NO₂-bedingte Gesundheitskosten dürfen nicht addiert werden, da sich dabei Doppelzählungen von bis einem Drittel ergeben können. Ergebnisse auf 10 Mio. CHF gerundet.

NO₂-Mindest-Variante: Erhöhte Mortalität berücksichtigt ab 20 µg/m³, Referenzwert 20 µg/m³.

NO₂ umfassende Variante: Erhöhte Mortalität berücksichtigt ab 5 µg/m³, Referenzwert 5 µg/m³.

Bisher gelten die Dosis-Wirkungs-Relationen für NO₂ als epidemiologisch weniger gut nachgewiesen als jene für PM10. Aufgrund der unterschiedlichen Belastungsentwicklung von PM10 und NO₂ und den sich abzeichnenden erheblichen NO₂-bedingten Gesundheitsschadenskosten, die nicht bei der Schätzung der PM10-bedingten Gesundheitsschadenskosten miterfasst werden, wird die Bedeutung von NO₂ zur Erhebung von luftschadstoffbedingten Gesundheitskosten zukünftig wohl weiter zunehmen.

1 Einleitung

1.1 Ausgangslage und Auftrag

Trotz einer erfolgreichen Luftreinhaltepolitik, die seit den 1980er und 1990er deutliche Verbesserungen der Luftqualität bewirkt hat, gehört der Kanton Zürich noch immer zu den am stärksten mit Luftschadstoffen belasteten Gebieten in der Schweiz. Da sich Luftschadstoffe in verschiedensten Bereichen schädlich auswirken, strebt der Kanton mit seiner Luftreinhaltepolitik daher eine weitere Verbesserung der Luftqualität an.

Neben den Emissions-, Immissions-, und Expositionsschätzungen dient dem Kanton auch die Schätzung der verursachten Schäden und Schadenskosten als Indikator für die Wirkung der lufthygienischen Massnahmen. Diese Schadenskosten wurden im Kanton Zürich zuletzt für die Jahre 2000 und 2010 ermittelt (AWEL 2013). Seither haben sich lufthygienischen Massnahmen, Emissionen, Immissionen, Expositionen und Kostensätze verändert. Ebenfalls verändert haben sich teilweise Kenntnisse sowie nationale und internationale Praktiken und Empfehlungen zur Ermittlung von luftschadstoffbedingten Kosten. Betroffen sind vor allem einzelne Dosis-Wirkungs-Relationen in verschiedenen Schadensbereichen sowie Kostensätze zur Berücksichtigung von individuellem Leid durch luftschadstoffbedingte Krankheits- und vorzeitige Todesfälle.

Neue Erkenntnisse sowie aktualisierte Praktiken und Empfehlungen wurden in das vorliegende Projekt eingearbeitet, wodurch die Ergebnisse nicht mit früheren Erhebungen der Kosten der Luftverschmutzung (AWEL 2006 und AWEL 2013) konsistent sind. Aus diesem Grund haben wir mit dem vorliegenden Projekt die Kosten der Luftverschmutzung im Kanton Zürich sowie in den Städten Zürich und Winterthur für die Jahre 2005, 2010 und 2015 neu ermittelt.

1.2 Neue Erkenntnisse und Abweichungen zu früheren Erhebungen der Kosten der Luftverschmutzung

In einem ersten Schritt des hier vorliegenden Projekts wurden, ausgehend von der bereits umfassenden Zusammenstellung des Bundesamtes für Raumentwicklung (ARE 2014), in jedem Schadensbereich neue Fachartikel und Praxisempfehlungen recherchiert, insbesondere der «Convention on Long-range Transboundary Air Pollution» der United Nations Economic Commission for Europe (UNECE) sowie der Weltgesundheitsorganisation (WHO). Für das Vorgehen zur Schätzung der Kosten der Luftverschmutzung im Kanton Zürich und den Städten Zürich und Winterthur zeigten sich insbesondere die folgenden Punkte relevant:

- *Neue Erkenntnisse zu Dosis-Wirkungs-Relationen in mehreren Bereichen:* Für luftschadstoffbedingte Gesundheitswirkungen sowie Wirkungen auf Wälder und Nutzpflanzen liegen neue Erkenntnisse bzgl. der Dosis-Wirkungs-Relationen vor, welche

für die Schätzung von luftschadstoffbedingten Krankheits- und Todesfällen sowie Ernteverlusten bei Holz und Nutzpflanzen verwendet werden.

- *Neue Empfehlungen für die Bewertung von luftschadstoffbedingter Mortalität:* Im Auftrag des ARE wurden auf Basis einer umfassenden Meta-Analyse neue Empfehlungen für die Bewertung von luftschadstoffbedingten vorzeitigen Todesfällen bzw. verlorenen Lebensjahren formuliert (ecoplan 2016).

Die Anwendung der nach aktuellem Kenntnisstand gültigen Dosis-Wirkungs-Relationen und Kostensätze für verlorene Lebensjahre führt insgesamt dazu, dass im Vergleich zu früheren Arbeiten (AWEL 2013) nun höhere Kosten der Luftverschmutzung ausgewiesen werden. Nach wie vor stellt aber das Vorgehen sicher, dass eine Überschätzung der Kosten der Luftverschmutzung unwahrscheinlich ist.

1.3 Analyserahmen

Perimeter und Untersuchungszeitraum

Betrachtet werden der Kanton Zürich sowie die Städte Zürich und Winterthur. Dabei verwenden wir Emissions- und Immissionsdaten aus den Jahren 2005, 2010 und 2015. Alle drei Jahre zeichnen sich durch im langfristigen Trend unauffällige Immissions- und Emissionswerte aus, wobei die stark witterungsabhängigen Ozonimmissionswerte zur Glättung von Schwankungen über mehrere Jahre gemittelt werden.

Schadstoffe und Schadensbereiche

Eine Vielzahl von freigesetzten Substanzen entfalten negative Umwelt- oder Gesundheitswirkungen. Für die Ermittlung der Kosten der Luftverschmutzung liegt der Fokus jedoch auf den zurzeit schadensmässig wichtigsten Stoffen. Um dabei Überschätzungen zu vermeiden, müssen die Schadenswirkungen einzelner Luftschadstoffe voneinander abgrenzbar sein. Ist dies nicht der Fall, können Leitschadstoffe verwendet werden, welche stellvertretend für weitere Substanzen in die Berechnungen eingehen.

Betrachtet werden die Schadenswirkungen in fünf Schadensbereichen: Gesundheit, Gebäude, Wald, Biodiversität und Ernten. Tabelle 1 zeigt, welche Luftschadstoffe in den einzelnen Schadensbereichen berücksichtigt werden. Mit Feinstaub (PM₁₀), Stickstoffoxide (NO_x), Ozon (O₃) und Ammoniak (NH₃) fließen die Emissionen und/oder Immissionen der zurzeit schadensmässig wichtigsten Luftschadstoffe in die Berechnungen der Schadenskosten ein. Flüchtige organische Verbindungen (NMVOC³) werden nicht direkt in den Berechnungen, jedoch bei der Aufteilung der Kosten auf die einzelnen Verursachergruppen berücksichtigt.

³ NMVOC: flüchtige organische Verbindungen ohne Methan

Betrachtete Schadstoffe und Schadensbereiche					
Schadstoffe					
Schadensbereiche	PM10	NO _x	NH ₃	NMVOC	O ₃
Gesundheit	x	x	(x)	(x)	
Gebäude	x				
Wald		(x)	(x)		x
Biodiversität		x	x		
Ernten					x

Tabelle 1: Betrachtete Schadstoffe und Schadensbereiche

x: Schadstoff direkt berücksichtigt durch Verwendung bei der Berechnung der Schadenskosten

(x): Schadstoff indirekt berücksichtigt durch anteilmässige Zurechnung der Schadenskosten

Territorialprinzip

Wie auch auf nationaler Ebene üblich, verwenden wir bei der Zuordnung der Kosten der Luftverschmutzung zu den verschiedenen Verursachergruppen das Territorialprinzip: Dem Territorialprinzip entsprechend werden alle Immissionen innerhalb der Kantons- bzw. Stadtgrenzen Emissionen innerhalb derselben Gebiete zugerechnet. Da angesichts der räumlichen und meteorologischen Gegebenheiten Schadstoffimporte und -exporte sich in etwa die Waage halten dürften, kann dies als vertretbare Vereinfachung eingestuft werden.

Umgang mit Unsicherheiten: Bewertung nach «best guess» und «at least»

Die Verlässlichkeit und Validität der für die Ermittlung der Kosten der Luftverschmutzung verfügbaren Grundlagen ist unterschiedlich, betreffend sowohl ganze Schadensbereiche wie auch einzelne Parameter. Nur bei guter Verlässlichkeit und Validität erfolgt die Ermittlung der Kosten als «best guess» bzw. bestmögliche Schätzung, welche in etwa gleich grosse Unsicherheitsbereiche nach oben wie auch nach unten aufweist. Bei unklarer oder eingeschränkter Verlässlichkeit und/oder Validität verfahren wir hingegen nach dem at-least-Ansatz: Das heisst, alle Annahmen, Methoden und Parameterwerte werden so gewählt, dass eher eine Unterschätzung als eine Überschätzung der Kosten der Luftverschmutzung erfolgt. Eine Ausnahme bilden die NO₂-bedingten Gesundheitskosten, für welche wir mehrere, unter unterschiedlichen Annahmen ermittelte Werte darlegen.

1.4 Berichtsstruktur

Der Bericht gliedert sich wie folgt:

- In den Kapitel 2 bis 6 beschreiben wir für jeden der fünf betrachteten Schadensbereiche (Gesundheit, Gebäude, Wald, Biodiversität und Ernten) das Vorgehen, die Berechnungsschritte und Berechnungsinputs sowie die Ergebnisse. Auch gehen wir auf die Determinanten der Kostenentwicklung in den jeweiligen Bereichen ein.
- In Kapitel 7 werden die Ergebnisse zu den einzelnen Schadensbereichen zu Gesamtergebnissen zusammengefasst. Auch zeigen wir die Determinanten der Gesamtkostenentwicklung auf.

- In Kapitel 8 werden schliesslich die dank der Reduktion der Luftbelastung vermiedenen Schadenskosten ausgewiesen, welche dem Nutzen der Verbesserung der Luftqualität entsprechen.
- Kapitel 9 enthält die Aufteilung Gesamtkosten auf die Verursacherguppen.

2 Gesundheitsschadenskosten

2.1 Vorgehen und Quellen

Die Schadstoffbelastung der Luft wirkt sich negativ auf die Gesundheit aus. Vor allem Atemwegs-, Herz-/Kreislaufkrankungen, 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 Feinstaub, NO₂ und Ozon. Da sich die von den verschiedenen Schadstoffen verursachten Gesundheitswirkungen nicht vollständig voneinander abgrenzen lassen, wurden die einzelnen Gesundheitswirkungen bisher anhand eines Leitschadstoffes ermittelt.

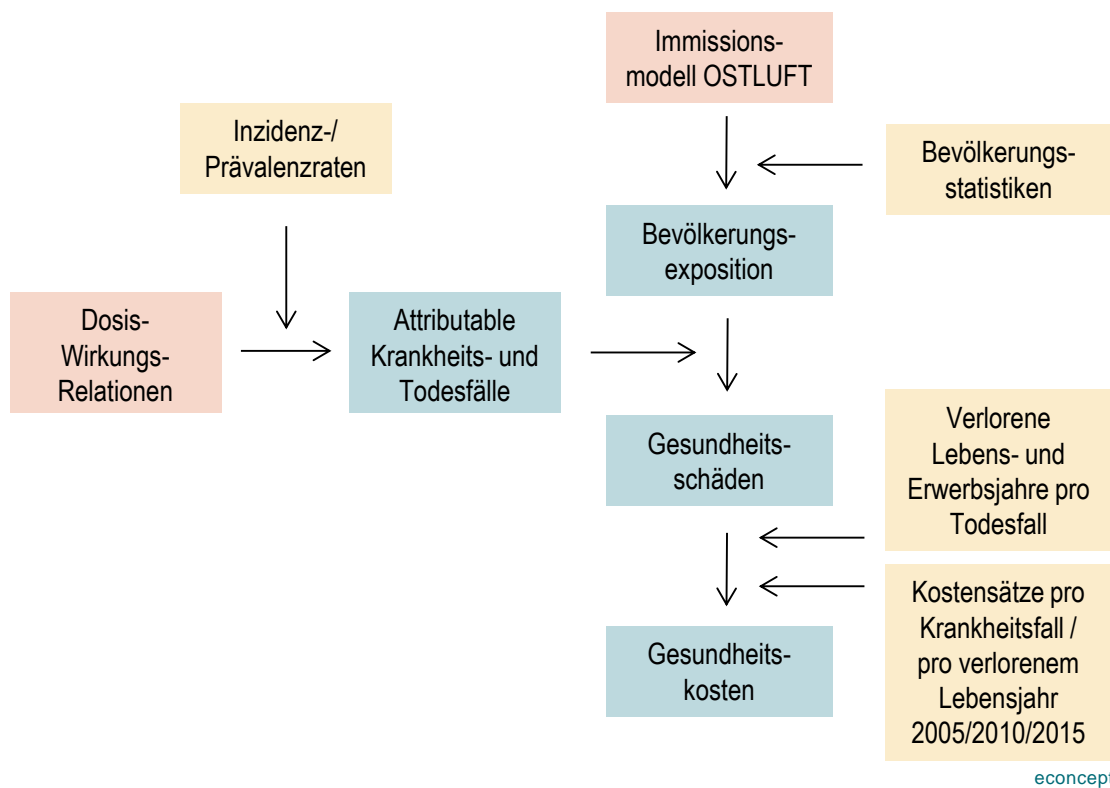
Für grossflächige Erhebungen von luftschadstoffbedingten Gesundheitsschäden in Städten, Ländern oder Ländergruppen wird in der Regel PM10 als einziger Leitschadstoff verwendet. Die Verwendung von Ozon als Leitschadstoff würde zu einer Unterschätzung der luftschadstoffbedingten Gesundheitskosten führen.⁴ Mit NO₂ werden zwar ebenso wie mit PM10 erhebliche Gesundheitsschäden assoziiert, die Zusammenhänge sind aber bisher weniger gut epidemiologisch untersucht und nachgewiesen als bei PM10. Da jedoch NO₂ aufgrund seines Schadenpotentials verstärkt in den Fokus der Luftreinhaltepolitik rückt und die durch NO₂ verursachten Schäden nur etwa zu einem Drittel in der mit PM10 als Leitschadstoff durchgeführten Kostenschätzung enthalten sind, wurden für das hier vorliegende Projekt sowohl die PM10-bedingten als auch die NO₂-bedingten Gesundheitskosten geschätzt.

In Figur 3 ist das Vorgehen zur Ermittlung der PM10- und NO₂-bedingten Gesundheitskosten dargestellt. In beiden Fällen gestaltet sich das Vorgehen wie folgt:

- Auf Basis von Schadstoffemissionen, Immissionsmodells und Bevölkerungsstatistiken wird die Bevölkerungsexposition ermittelt.
- Mittels Dosis-Wirkungs-Relationen und Inzidenz- oder Prävalenzraten (langfristige Mittelwerte) wird die Anzahl attributabler Fälle pro 10 µg/m³ Schadstoffzunahme berechnet. Der Referenzwert wird schadstoffspezifisch festgelegt.
- Anhand der attributablen Fälle und der Bevölkerungsexposition können die Schadstoffbedingten Gesundheitsschäden ermittelt werden.
- Mit Angaben zu den verlorenen Lebens- und Erwerbsjahren pro Todesfall sowie zu den durch Krankheiten und Todesfälle ausgelösten Kosten können schliesslich die luftschadstoffbedingten Gesundheitskosten ermittelt werden.

⁴ In ARE (2014) wird darauf hingewiesen, dass Ozon rund 180-mal weniger verlorene Lebensjahre verursacht als die Feinstaubbelastung und somit nur von untergeordneter Bedeutung ist.

Vorgehen zur Ermittlung der Gesundheitsschadenskosten



econcept

Figur 3: Vorgehen zur Ermittlung der Gesundheitsschadenskosten
 Gelb: Daten
 Rot: Modelle und Relationen.
 Blau: Zwischenergebnisse und Ergebnisse

Tabelle 2 gibt einen Überblick über die verwendeten Quellen:

Inputs für die Berechnung	Quellen
Immissionsbelastung und exponierte Bevölkerung pro Immissionskategorie	Modellierung OSTLUFT
Dosis-Wirkungs-Relationen bzw. Effektschätzer	ARE 2014 / HRAPIE 2013
Inzidenz und Prävalenzraten	ARE 2014
Durchschnittliche Anzahl verlorener Lebensjahre pro Todesfall	ARE 2014
Behandlungskosten	ARE 2014, Landesindex der Konsumentenpreise des BFS, Position «Gesundheitspflege» BFS
Produktionsausfallkosten	ARE 2014, Nominallohnindex
Zahlungsbereitschaft zur Vermeidung eines durch Luftschadstoffe bedingten frühzeitigen Todesfalls	OECD (2012) / Ecoplan (2016), Landesindex der Konsumentenpreise des BFS

Tabelle 2: Quellenübersicht Ermittlung Gesundheitsschadenskosten

2.2 Inputs und Berechnungen

In den folgenden Kapiteln sind Inputs und Berechnungen zur Schätzung der PM10-bedingten Gesundheitskosten dargestellt. Das Vorgehen zur Schätzung der NO₂-bedingten Gesundheitskosten ist dasselbe, nur gehen NO₂- statt PM10-Expositionen sowie NO₂-spezifische statt PM10-spezifische Dosis-Wirkungs-Relationen in die Berechnungen ein.

2.2.1 Exponierte Bevölkerung

Grundlage für die Berechnung der luftschadstoffbedingten Gesundheitskosten ist die Belastung der Bevölkerung (Tabelle 55). Im Gesamtkanton lag die mittlere Jahresbelastung 2015 nahezu bei der gesamten Bevölkerung unter dem aktuell geltenden Langzeit-Grenzwert von 20 µg/m³ im Jahresmittel. 2005 und 2010 wurde dieser Grenzwert noch für grosse Bevölkerungsteile überschritten.⁵ Auffällig sind auch die unterschiedlichen Bevölkerungsexpositionen im Kanton und in den Städten: Die städtische Bevölkerung ist durchschnittlich stärker belastet, wobei die durchschnittliche Belastung in Winterthur nur leicht höher liegt wie im Gesamtkanton. Die Bevölkerungsexposition ist in Tabelle 55 in Anhang A-4 dargestellt.

2.2.2 Attributable Fälle und Fallzahlen

Die aktuellste Zusammenstellung zu luftschadstoffbedingten Gesundheitswirkungen für die Schweiz liefern ARE (2014) und HRAPIE (2013), wobei die formulierten Empfehlungen zu den zu verwendenden Dosis-Wirkungs-Relationen deckungsgleich sind. Die dort verwendeten Dosis-Wirkungs-Relationen stammen aus verschiedenen in- und ausländischen empirischen Studien.

Anhand der Dosis-Wirkungs-Relationen (Effektschätzer), sowie der Inzidenz- und Prävalenzraten in der Schweizer Bevölkerung können die attributablen Fälle durch zusätzliche 10 µg/m³ PM10-Belastung pro 100'000 Einwohner und Jahr ermittelt werden (Tabelle 3). Ausserdem relevant für die Berechnung der attributablen Fälle sind die langfristige mittlere Belastung sowie der Referenzwert, welcher für PM10 bei 7.5 µg/m³ liegt (siehe auch Kapitel 2.1).

⁵ In der Schweiz gelten gemäss Luftreinhalte-Verordnung zwei Immissionsgrenzwerte für Feinstaub bzw. PM10: Langzeit-Grenzwert: 20 µg/m³ im Jahresmittel. Kurzzeit-Grenzwert: Maximal ein Tag pro Jahr mit einem 24-h-Mittelwert grösser als 50 µg/m³.

	Effektschätzer (Relatives Risiko ^(A) pro 10 µg/m ³)	Rate in der Bevölkerung pro 100'000 effektiv (langfristige Mittelwerte in der Schweiz)	Attributable Fälle durch zusätzliche 10 µg/m ³ PM10-Belastung pro 100'000 Einwohner und Jahr
Mortalität Erwachsene	1.045	760	33 Todesfälle
Säuglingssterblichkeit	1.040	4.2	0.2 Todesfälle
Spitaleintritte wegen Atemweg- serkrankungen	1.014	890	12 Eintritte
Spitaleintritte wegen Herz/Kreislaferkrankungen	1.007	1'852	13 Eintritte
Inzidenz chronische Bronchitis bei Erwachsenen	1.117	318	33 Fälle
Prävalenz von Bronchitis bei Kindern	1.080	2'531	187 Fälle
Tage mit Asthmasymptomen bei Erwachsenen	1.029	17'106	482 Tage
Tage mit Asthmasymptomen bei Kindern	1.028	312'988	8'518 Tage
Tag mit eingeschränkter Aktivität	1.034	1'547'693	50'843 Tage

Tabelle 3: Inputs und Ergebnisse attributable Fälle durch die PM10-Belastung, berechnet mit einer Referenzwertkonzentration von 7.5 µg/m³ und einer langfristigen mittleren Belastung von 17.8 µg/m³ (Mittelwert 2005, 2010 und 2015).

^(A) Relatives Risiko = $P(\text{Auftreten} \mid \text{mit Risikofaktor}) / P(\text{Auftreten} \mid \text{ohne Risikofaktor})$

Die Multiplikation der attributablen Fälle mit der Bevölkerungszahl, die im jeweiligen Jahr von einer bestimmten PM10-Schadstoffexposition betroffen ist (siehe Tabelle 55), ergibt die geschätzte Anzahl PM10-bedingter Krankheits- und Todesfälle in Zürich:

Geschätzte Anzahl Krankheits- und Todesfälle aufgrund der PM10-Belastung im Kanton Zürich			
	2005	2010	2015
Mortalität Erwachsene (Todesfälle)	550	460	340
Säuglingssterblichkeit (Todesfälle)	3	2	2
Spitaleintritte wegen Atemwegserkrankungen	210	170	130
Spitaleintritte wegen Herz/Kreislaferkrankungen	220	180	140
Inzidenz (Neuaufreten) chronische Bronchitis bei Erwachsenen	560	470	350
Prävalenz von Bronchitis bei Kindern (Fälle)	3'170	2'640	1'960
Tage mit Asthmasymptomen bei Erwachsenen	8'150	6'790	5'060
Tage mit Asthmasymptomen bei Kindern	144'160	120'060	89'390
Tage mit eingeschränkter Aktivität	860'430	716'590	533'570

Tabelle 4: Geschätzte jährliche Anzahl Krankheits- und Todesfälle aufgrund der PM10-Belastung. Ergebnisse gerundet.

Für die weiteren Berechnungen ebenfalls benötigt wird die Anzahl verlorener Lebens- und Erwerbsjahre pro Todesfall: Gemäss ARE (2014) sterben in der Schweiz pro Jahr 2'840 Personen frühzeitig aufgrund von Luftverschmutzung, mit insgesamt 28'891 verlorenen Lebensjahren. Bei einem Todesfall durch Luftverschmutzung sind demnach durchschnittlich 10.2 verlorene Lebensjahre (und 1.1 verlorene Erwerbsjahre) zu beklagen.

2.2.3 Kosten pro Fall und insgesamt

Um die luftschadstoffbedingten Erkrankungen und Todesfälle zu monetarisieren, werden Kostensätze für deren Bewertung benötigt. Die Kostensätze setzen sich zusammen aus:

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

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 den Empfehlungen von ecoplan (2016) zuhanden des ARE und der bfu⁶ entnommen, welche sich insbesondere auf eine durch die OECD durchgeführte, umfassende Metastudie stützen (OECD 2012). Die übrigen Kostenanteile, bestehend aus Behandlungskosten und Produktionsausfall, werden von Marktpreisen abgeleitet und wurden aus ARE (2014) übernommen. Alle Kostensätze wurden mit jeweils adäquaten Preisstatistiken teuerungsbereinigt: Die medizinischen Behandlungskosten mit dem LIK⁷-Gesundheitspflege, die Produktionsausfallkosten mit dem Nominallohnindex und die immateriellen Kosten mit dem LIK-Total.

Kostensätze pro Krankheits- und Todesfall (in CHF)		2005	2010	2015
Mortalität				
Verlorenes Lebensjahr	pro Lebensjahr	212'470	222'000	217'885
Verlorenes Erwerbsjahr	pro Erwerbsjahr	13'595	14'686	15'233
Wiederbesetzungskosten (Durchschnitt m/f)	pro Todesfall	31'897	34'455	35'739
Spitaleintritte wegen Atemwegserkrankungen	pro Fall	1'854	1'890	1'849
Spitaleintritte wegen Herz/Kreislaufkrankungen bei Erwachsenen	pro Fall	2'389	2'426	2'373
Inzidenz chronische Bronchitis bei Erwachsenen	pro Neuauftreten	112'343	117'063	114'846
Prävalenz von Bronchitis bei Kindern	pro Bronchitisfall	343	356	349
Tage mit Asthmasymptomen bei Erwachsenen	pro Asthmaanfall	83	87	86
Tage mit Asthmasymptomen bei Kindern	pro Asthmaanfall	72	75	74
Tag mit eingeschränkter Aktivität	pro Tag	243	255	253

Tabelle 5: Kostensätze zur Bewertung der immissionsbedingten Gesundheitskosten [CHF/Fall] (Quelle: ARE 2014, OECD 2012, Landesindex der Konsumentenpreise BFS (Total und Gesundheitspflege), Nominallohnindex BFS, eigene Berechnungen)

Mittels dieser Kostensätze können die luftschadstoffbedingten Krankheits- und Todesfälle im Kanton Zürich und den Städten Zürich und Winterthur bewertet werden. Die Ergebnisse sind im nächsten Kapitel dargestellt.

⁶ Beratungsstelle für Unfallverhütung

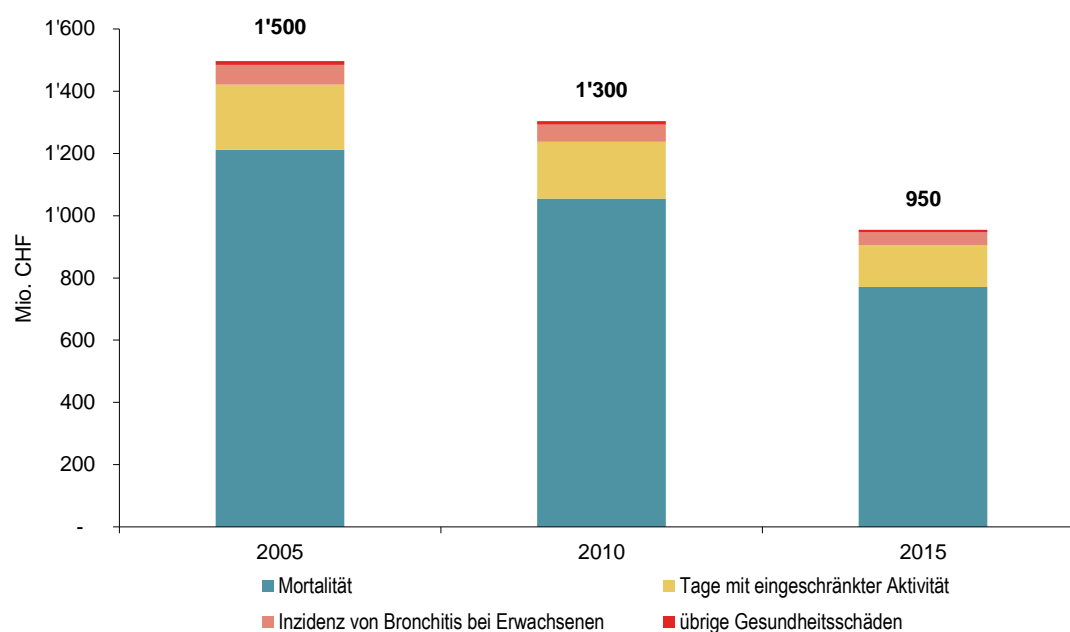
⁷ Landesindex der Konsumentenpreise

2.3 PM10-bedingte Gesundheitskosten

2.3.1 Ergebnisse

Seit dem Jahr 2005 sind die PM10-bedingten Gesundheitskosten im Kanton Zürich markant zurückgegangen, von rund 1.5 Mrd. CHF im Jahr 2005 auf rund 950 Mio. CHF im Jahr 2015 (Figur 4). Da in allen drei Erhebungsjahren nebst denselben Dosis-Wirkungs-Relationen auch dieselben Inzidenz- und Prävalenzraten in die Berechnungen eingehen sowie konsistente Kostensätze verwendet werden, bleiben die Anteile der verschiedenen Gesundheitsbeeinträchtigungen in allen Jahren konstant.

PM10-bedingte Gesundheitskosten im Kanton Zürich



econcept

Figur 4: PM10-bedingte Gesundheitskosten im Kanton Zürich. Ergebnisse auf 10 Mio. CHF gerundet.

Luftschadstoffbedingte Gesundheitsschadenskosten im Kanton Zürich [Mio. CHF]			
	2005	2010	2015
Mortalität gesamt	1'210	1'060	770
Verlorenes Lebensjahr	1'200	1'050	760
Verlorenes Erwerbsjahr	8.3	7.5	5.8
Wiederbesetzungskosten	2.1	1.9	1.5
Spitaleintritte wegen Atemwegserkrankungen	0.4	0.3	0.2
Spitaleintritte wegen Herz/Kreislaufkrankungen bei Erwachsenen	0.5	0.4	0.3
Inzidenz chronische Bronchitis bei Erwachsenen	65	55	40
Prävalenz von Bronchitis bei Kindern	1.1	0.9	0.7
Tage mit Asthmasymptomen bei Erwachsenen	0.7	0.6	0.4
Tage mit Asthmasymptomen bei Kindern	10	9.0	6.6
Tage mit eingeschränkter Aktivität	210	180	140
Total	1'500	1'300	950

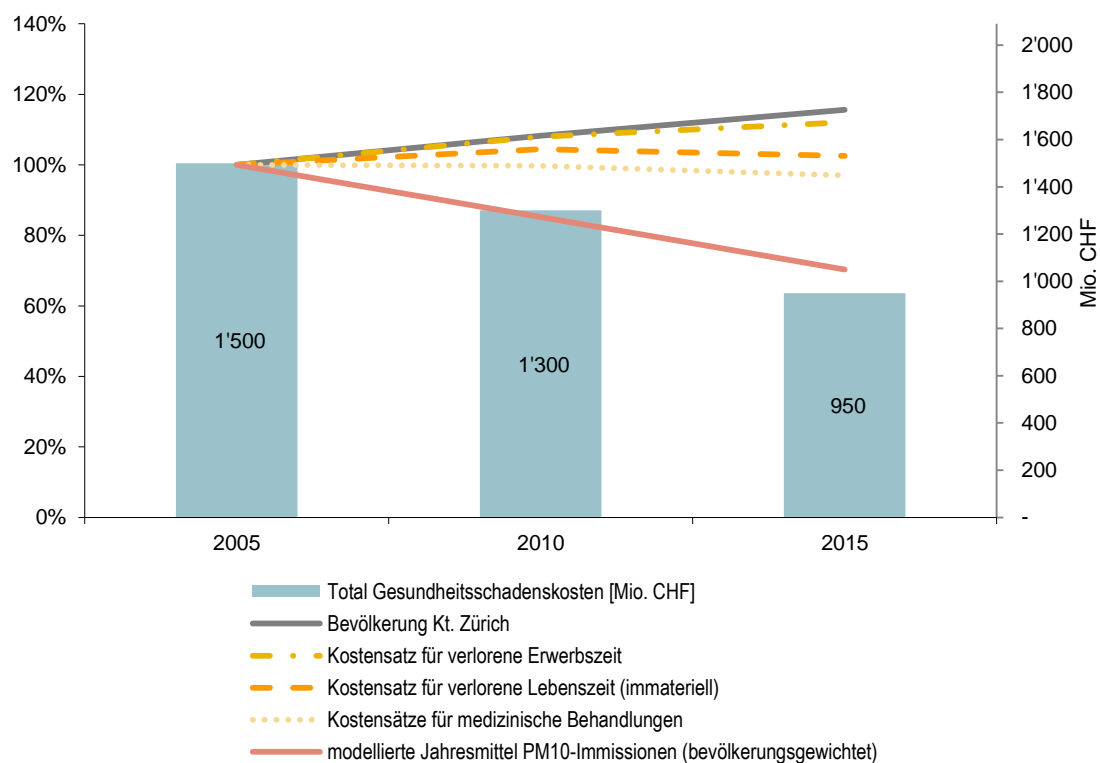
Tabelle 6: Luftschadstoffbedingte Gesundheitsschadenskosten. Ergebnisse gerundet.

In Tabelle 6 finden sich die Zahlenwerte für die einzelnen Gesundheitsfolgen. Den weit- aus grössten Anteil an den Gesamtkosten hat mit rund 80% bzw. 770 Mio. CHF im Jahr 2015 die PM10-bedingte Mortalität (Tabelle 6). Ebenfalls stark kostenrelevant sind Fälle von chronischer Bronchitis bei Erwachsenen und Tage mit eingeschränkter Aktivität.

2.3.2 Determinanten der Kostenentwicklung

Die PM10-bedingten Gesundheitsschadenskosten im Kanton Zürich sind von 2005 bis 2015 gesamthaft um ungefähr 37% gesunken und liegen im Jahr 2015 noch bei rund 950 Mio. CHF. Grund für die Reduktion der Kosten ist die veränderte PM10-Belastung: Diese ist stark zurückgegangen, während die Bevölkerung gewachsen und die Kostensätze gestiegen oder ungefähr konstant geblieben sind.

Veränderung der gesundheitsbedingten Kosten der Luftverschmutzung durch PM10



econcept

Figur 5: Veränderung der Gesundheitsbedingten Kosten der Luftverschmutzung und ihrer Treiber.
Linke Skala: Determinanten der Gesundheitsschadenskosten (Linien) in Prozent. Wert im Jahr 2005 = 100%.
Rechte Skala: Gesundheitskosten in Mio. CHF (Säulen). Ergebnisse auf 10 Mio. CHF gerundet.

2.4 NO₂-bedingte Gesundheitskosten

2.4.1 Vorgehen

Mit NO₂ werden ebenso wie mit PM10 erhebliche Gesundheitsschäden assoziiert, die Zusammenhänge sind aber bisher epidemiologisch weniger gut untersucht und nachgewiesen als bei PM10 (HRAPIE 2013).

Da jedoch NO₂ aufgrund seines Schadenpotentials in den letzten Jahren verstärkt in den Fokus der Luftreinhaltepolitik gerückt ist, werden in diesem Kapitel ergänzend zu den PM10-bedingten auch die NO₂-bedingten Gesundheitskosten abgeschätzt. Das Vorgehen unterscheidet sich dabei nicht vom Vorgehen bei PM10 (vgl. Figur 3), jedoch werden die Bevölkerungsexposition mit NO₂ und die für NO₂ gültigen Dosis-Wirkungs-Relationen verwendet. Die übrigen Inputs sind dieselben wie bei den Berechnungen mit PM10.

Im Gegensatz zu PM10 können bei NO₂ nur zwei durch langfristige Exposition auftretende Gesundheitswirkungen quantifiziert werden: Spitaleintritte wegen Atemwegserkrankungen und Mortalität. Die Dosis-Wirkungs-Relationen wurden wie auch bei PM10 aus HRAPIE (2013) übernommen. HRAPIE (2013) weist jedoch darauf hin, dass die Dosis-Wirkungs-Relation für Mortalität nur für Belastungen von mehr als 20 µg/m³ NO₂ empirisch genügend belegt und deshalb auch nur für diesen Bereich anzuwenden ist. Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass NO₂ auch bei einer Belastung von weniger als 20 µg/m³ zu Gesundheitsschäden führt. Inwiefern die Dosis-Wirkungs-Relation für Mortalität aus HRAPIE (2013) auch unterhalb von 20 µg/m³ angewendet werden kann, ist daher Gegenstand aktueller Diskussionen (Walton et. al 2015), jedoch noch nicht geklärt. Möglich wäre beispielsweise, dass die Dosis-Wirkungs-Relation im Bereich unter 20 µg/m³ eine andere Steigung aufweist.

Um diesen Unsicherheiten Rechnung zu tragen, berechnen wir die NO₂-bedingten Gesundheitsschadenskosten in zwei Varianten:

- **Mindest-Variante:** Für die Ermittlung des Mindestwertes werden bei der Schätzung der NO₂-bedingten Mortalität entsprechend den Empfehlungen von HRAPIE (2013) nur NO₂-Expositionen von über 20 µg/m³ berücksichtigt. Ausserdem wird ein Referenzwert von 20 µg/m³ verwendet, womit die Annahme verbunden ist, dass bei NO₂-Konzentrationen von weniger als 20 µg/m³ keine Gesundheitsfolgen auftreten.
- **Umfassende Variante:** Zur Berechnung des umfassenden Wertes werden bei der Schätzung der NO₂-bedingten Mortalität Expositionen ab 5 µg/m³ berücksichtigt und ein Referenzwert von 5 µg/m³ gesetzt. Dahinter steht die Annahme, dass auch bei geringen NO₂-Konzentrationen zwischen 5 und 20 µg/m³ Gesundheitsfolgen auftreten, was durch die vorhandene empirische Evidenz gestützt wird.⁸ Wie beschrieben ist allerdings die Dosis-Wirkungs-Relation in diesem Bereich weniger gut belegt als

⁸ 5 µg/m³ NO₂ können als nicht vermeidbare Grundbelastung interpretiert werden. Ebenso wie der für die Schätzung der PM10-bedingten Kosten verwendete Referenzwert von 7.5 µg/m³ PM10 liegt der Referenzwert von 5 µg/m³ NO₂ um ca. 5 µg/m³ über der auf dem Jungfraujoch gemessenen Konzentration.

bei höheren Konzentrationen. Der mit der umfassenden Variante resultierende Schätzwert ist nicht als Maximalwert zu verstehen.

Die Dosis-Wirkungs-Relation für NO₂-bedingte Spitaleintritte wegen Atemwegserkrankungen wird in beiden Varianten auf Belastungen ab 5 µg/m³ und angewendet, wobei ein Referenzwert von 5 µg/m³ verwendet wird.

2.4.2 Inputs und Berechnungen

Die für die Berechnung verwendete Bevölkerungsexposition mit NO₂ ist in Tabelle 56 in Anhang A-4 abgebildet. Die verwendeten Kostensätze unterscheiden sich nicht von der Berechnung mit PM10.

Da für die Schätzung der NO₂-bedingten Mortalität in der Mindest-Variante ein andere Referenzkonzentration verwendet wird als in der umfassenden Varianten, unterscheiden sich auch die attributablen Fälle⁹ (Tabelle 7). Auf die Ergebnisse hat dies jedoch nur einen geringen Einfluss. Entscheidender ist, dass bei der Mindest-Variante davon ausgegangen wird, dass unterhalb von 20 µg/m³ keine Gesundheitsschäden auftreten.

		Referenzkonzentration	Effektschätzer (Relatives Risiko ^(A) pro 10 µg/m ³)	Rate in der Bevölkerung pro 100'000 effektiv (langfristige Mittelwerte in der Schweiz)	Attributable Fälle durch zusätzliche 10 µg/m ³ NO ₂ -Belastung pro 100'000 Einwohner und Jahr
Mindest-Variante	Mortalität Erwachsene	20 µg/m ³	1.055	760	38 Todesfälle
	Spitaleintritte wegen Atemwegserkrankungen	5 µg/m ³	1.018	890	16 Eintritte
Umfassende Variante	Mortalität Erwachsene	5 µg/m ³	1.055	760	41 Todesfälle
	Spitaleintritte wegen Atemwegserkrankungen	5 µg/m ³	1.018	890	16 Eintritte

Tabelle 7: Attributable Fälle durch die NO₂-Belastung, berechnet mit einer langfristigen mittleren Belastung von 23.05 µg/m³ (Mittelwert 2005, 2010 und 2015). Quelle: Université de Genève, equiterre, Swiss TPH, EMPA, ecoplan, M.I.S. Trend (2016), eigene Berechnungen

^(A) Relatives Risiko = P(Auftreten | mit Risikofaktor) / P(Auftreten | ohne Risikofaktor)

Die Multiplikation der attributablen Fälle mit der Bevölkerungszahl, die im jeweiligen Jahr von einer bestimmten NO₂-Schadstoffexposition betroffen ist, ergibt die geschätzte Anzahl NO₂-bedingter Krankheits- und Todesfälle in Zürich:

⁹ Die geschätzte Dosis-Wirkungs-Relation ist zwar linear, das geschätzte relative Risiko und die Referenzkonzentration gehen jedoch nicht linear in die Berechnung der attributablen Fälle ein, weswegen die Verwendung einer anderen Referenzkonzentration auf eine andere Anzahl attributabler Fälle führt. Die Anleitung zur Berechnung der attributablen Fälle findet sich in ARE (2004a).

Geschätzte Anzahl Krankheits- und Todesfälle aufgrund der NO ₂ -Belastung im Kanton Zürich		2005	2010	2015
Mindest-Variante	Mortalität Erwachsene (Todesfälle)	270	240	200
	Spitaleintritte wegen Atemwegserkrankungen	380	380	380
Umfassende Variante	Mortalität Erwachsene (Todesfälle)	930	940	940
	Spitaleintritte wegen Atemwegserkrankungen	380	380	380

Tabelle 8: Geschätzte jährliche Anzahl Krankheits- und Todesfälle aufgrund der NO₂-Belastung. Ergebnisse gerundet.

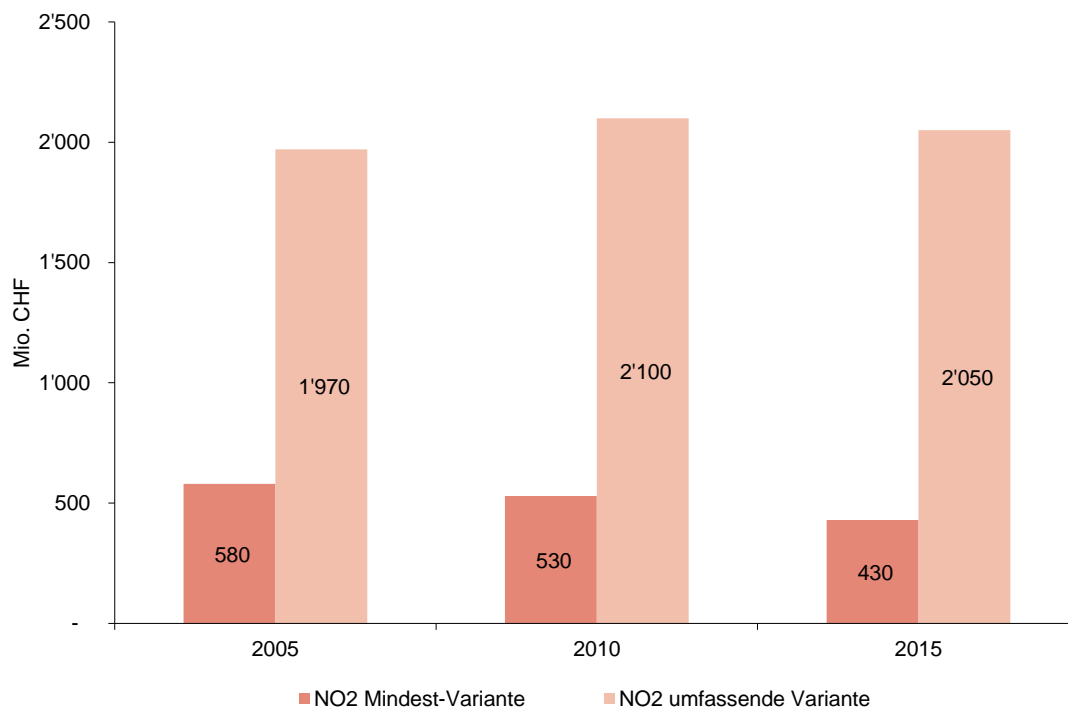
2.4.3 Ergebnisse

Tabelle 9 und Figur 6 zeigen die Ergebnisse für die NO₂-bedingten Gesundheitsschadenskosten.

NO ₂ -bedingte Gesundheitsschadenskosten im Kanton Zürich [Mio. CHF]		2005	2010	2015
Mindest-werte	Spitaleintritte wegen Atemwegserkrankungen (alle Alter)	0.7	0.7	0.7
	Mortalität insgesamt	580	530	430
	Verlorenes Lebensjahr	570	530	430
	Verlorenes Erwerbsjahr	4.0	3.8	3.3
	Wiederbesetzungskosten	1.0	1.0	0.8
NO₂-bedingte Gesundheitsschadenskosten		580	530	430
Umfassende Werte	Spitaleintritte wegen Atemwegserkrankungen (alle Alter)	0.7	0.7	0.7
	Mortalität insgesamt	1'970	2'100	2'050
	Verlorenes Lebensjahr	1'960	2'080	2'030
	Verlorenes Erwerbsjahr	13.8	15.1	15.6
	Wiederbesetzungskosten	3.5	3.8	4.0
NO₂-bedingte Gesundheitsschadenskosten		1'970	2'100	2'050

Tabelle 9: NO₂-bedingte Gesundheitsschadenskosten im Kanton Zürich. Ergebnisse gerundet.
 Mindest-Variante: Erhöhte Mortalität berücksichtigt ab 20 µg/m³, Referenzwert 20 µg/m³.
 Umfassende Variante: Erhöhte Mortalität berücksichtigt ab 5 µg/m³, Referenzwert 5 µg/m³.

NO₂-bedingte Gesundheitskosten



econcept

Figur 6: NO₂-bedingte Gesundheitsschadenskosten im Kanton Zürich. Ergebnisse auf 10 Mio. CHF gerundet.
 Mindest-Variante: Erhöhte Mortalität berücksichtigt ab 20 µg/m³, Referenzwert 20 µg/m³.
 Umfassende Variante: Erhöhte Mortalität berücksichtigt ab 5 µg/m³, Referenzwert 5 µg/m³.

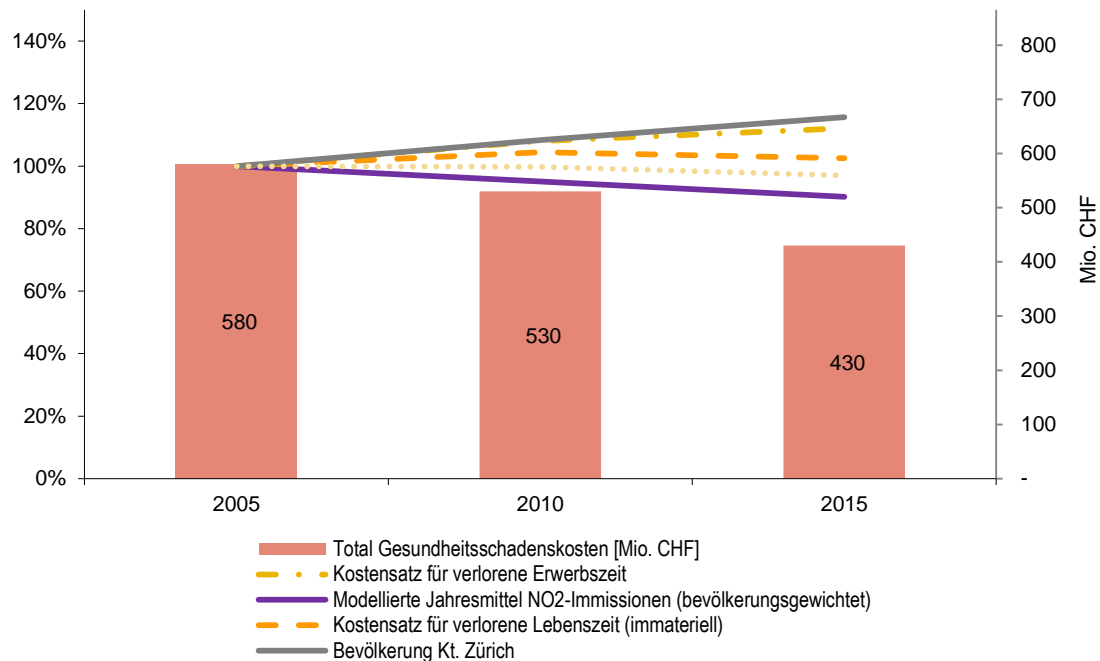
2.4.4 Determinanten der Kostenentwicklung für den Leitschadstoff NO₂

Figur 7 zeigt die Entwicklung der NO₂-basierten Gesundheitsschadenskosten sowie deren Determinanten für die zwei berechneten Varianten.

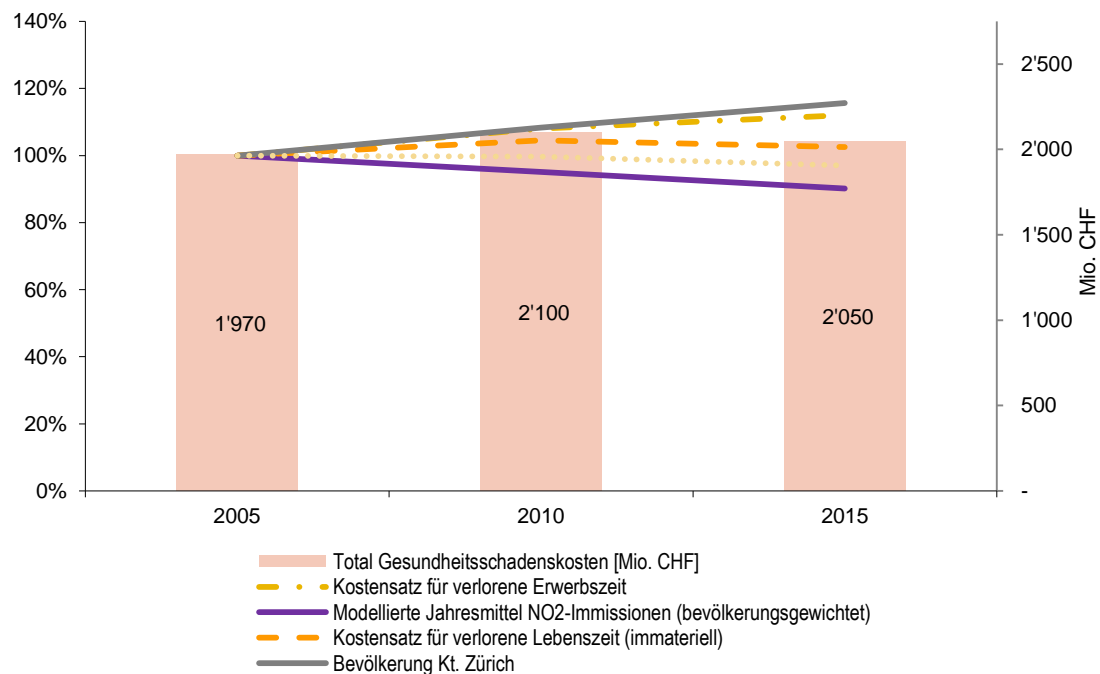
Mit der Mindest-Variante, welche der NO₂-Belastung erst ab einem modellierten Jahresmittel von 20 µg/m³ eine erhöhte Mortalität zuweist, wird ein Rückgang der luftschadstoffbedingten Gesundheitskosten ausgewiesen, da der Anteil der Bevölkerung, welche einer mittleren NO₂-Belastung von über 20 µg/m³ ausgesetzt ist, in diesem Zeitraum zurückgegangen ist. Bei der umfassenden Variante, welche alle Belastungen ab 5 µg/m³ berücksichtigt, wirkt sich der Belastungsrückgang weniger stark aus. Daher zeigt sich bei der umfassenden Variante trotz der Abnahme der durchschnittlichen Luftbelastung zwischen 2005 und 2015 eine Stagnation der luftschadstoffbedingten Kosten, bedingt durch die Bevölkerungszunahme und den Anstieg der Kostensätze.

Determinanten Entwicklung Gesundheitsschadenskosten durch NO₂

Mindestvariante



Umfassende Variante



econcept

Figur 7: NO₂-bedingte Gesundheitsschadenskosten und Determinanten der Kostenentwicklung.
 Linke Skala: Determinanten der Gesundheitsschadenskosten (Linien) in Prozent. Wert im Jahr 2005 = 100%.
 Rechte Skala: Gesundheitsschadenskosten im Mio. CHF (Säulen). Ergebnisse auf 10 Mio. CHF gerundet.

2.5 Fazit zu den Gesundheitskosten

Trotz Bevölkerungswachstum und steigenden Kostensätzen und verbunden mit einem deutlichen Rückgang der Feinstaubbelastung sind die PM10-bedingten Gesundheitskosten im Kanton Zürich seit 2005 markant zurückgegangen, von rund 1.5 Mrd. CHF im Jahr 2005 auf rund 950 Mio. CHF im Jahr 2015.

Die NO₂-bedingten Gesundheitskosten sind gemäss der geschätzten Mindestvariante zwischen 2005 und 2015 ebenfalls zurückgegangen, von 580 auf 430 Mio. CHF. Dies weil der Anteil der mit über 20 µg/m³ NO₂ belasteten Bevölkerung in diesem Zeitraum gesunken ist und Belastungen von unter 20 µg/m³ bei der Mindest-Variante nicht berücksichtigt werden. Die umfassende Variante, welche Belastungen ab 5 µg/m³ berücksichtigt, weist daher für den Kanton Zürich stagnierende NO₂-bedingte Gesundheitskosten aus, welche sich zwischen 2005 und 2015 im Bereich von 2 Mrd. CHF pro Jahr bewegen.

Beim stark kostenrelevanten Bereich der Mortalität wird die Höhe der möglichen Doppelzählungen bei der Addition von PM10- und NO₂-bedingten Gesundheitskosten auf maximal ein Drittel geschätzt (HRAPIE 2013). Trotzdem ist das Zusammenrechnen von PM10- und NO₂-bedingten Gesundheitskosten bisher nicht üblich, weswegen auch hier darauf verzichtet wird. Den bisherigen Konventionen folgend werden die Gesamtkosten der Luftverschmutzung mit den PM10-bedingten Gesundheitsschadenskosten ausgewiesen.

3 Gebäudeschadenskosten

3.1 Vorgehen und Quellen

Luftschadstoffe führen bei verschiedensten Materialien zu Verschmutzungen und Korrosion. Gebäudehüllen an belasteten Standorten müssen daher häufiger gereinigt werden und weisen ausserdem eine verkürzte Lebensdauer auf. Figur 8 zeigt das Vorgehen zur Erhebung der dadurch entstehenden Gebäudeschadenskosten:

- Mithilfe des Immissionsmodells OSTLUFT wird die PM10-Belastungssituation (mittlere Jahresbelastung) in den verschiedenen Agglomerationstypen¹⁰ im Kanton Zürich bestimmt.
- Aus ARE 2004 ist der Zusammenhang zwischen PM10-Belastung und Erneuerungs- bzw. Reinigungsfrequenzen bekannt:
 - Je höher die PM10-Belastung, desto kürzer die Lebensdauer der Fassade und desto höher die Erneuerungsfrequenz.
 - An verkehrsbelasteten Lagen ist im Vergleich zu nicht verkehrsbelasteten Lagen bei Glas-, Metall- und Fensterflächen von Nicht-Wohngebäuden¹¹ eine zusätzliche Reinigung pro Jahr notwendig.
- 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.

Bei den Reinigungskosten ist zu beachten, dass sie nicht auf Basis aktueller Immissionsdaten berechnet werden. Die Methode stützt hingegen auf den Anteilen verkehrsbelasteter Flächen pro Agglomerationstyp ab, welche 2003 erhoben und bisher auch auf nationaler Ebene noch nicht aktualisiert wurden. Da aber die Verkehrsleistung sowohl im Strassen- wie auch im Schienenverkehr seit 2003 weiterhin zugenommen hat¹², ist davon

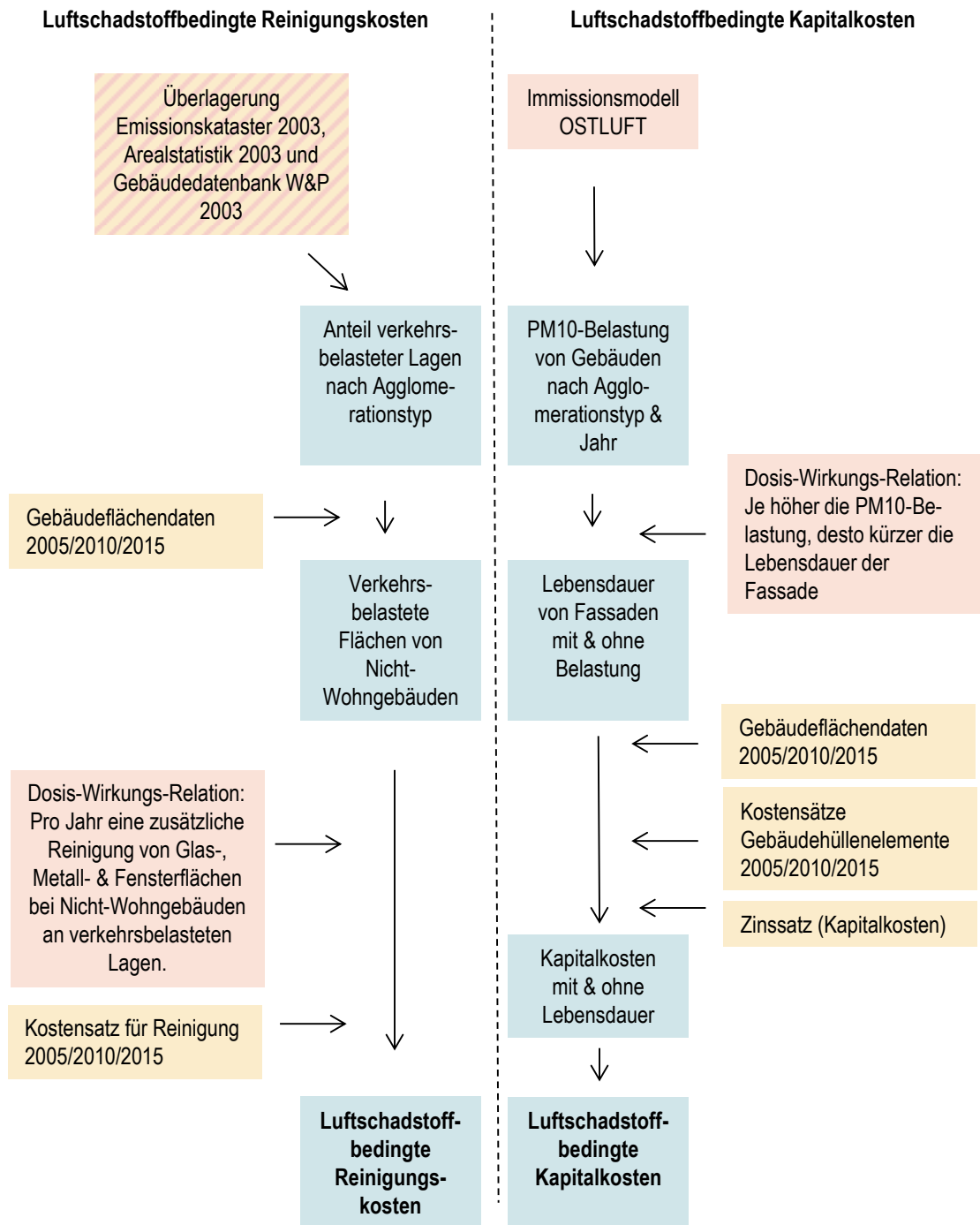
¹⁰ Agglomerationstypen gemäss Volkszählung Bundesamt für Statistik 2000.

¹¹ 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.

¹² <https://www.bfs.admin.ch/bfs/de/home/statistiken/mobilitaet-verkehr/personenverkehr/leistungen.html>

auszugehen, dass die Anteile verkehrsbelasteter Flächen trotz Umfahrungsprojekten u.ä. nicht in grösserem Ausmass zurückgegangen sind. Die Berechnungsweise der Reinigungskosten hat zur Folge, dass sich ihre Veränderung nur aus der Veränderung der Gebäudeflächen und der Nominallohnentwicklung ergibt. Mit der abnehmenden PM10-Belastung an verkehrsbelasteten Lagen werden daher zunehmend zu hohe Reinigungskosten ausgewiesen.

Vorgehen zur Ermittlung der Gebäudeschadenskosten



Figur 8: Vorgehen zur Ermittlung der Gebäudeschadenskosten. Gelb: Daten. Rot: Modelle und Relationen. Blau: Zwischenergebnisse und Ergebnisse.

Tabelle 10 fasst zusammen, auf Basis welcher Quellen die luftschadstoffbedingten Kapital- und Reinigungskosten berechnet werden.

	Input für die Berechnung	Quellen
Immissionsdaten	PM10-Immissionen im Kanton Zürich 2005, 2010 und 2015 (differenziert nach Agglomerationstyp)	OSTLUFT
Flächendaten	Fassadenflächen Kanton Zürich, Stadt Zürich und Stadt Winterthur im Jahr 2005, 2010 und 2015 (differenziert nach Agglomerationstyp, Fassadenbauart und Gebäudenutzung)	Projektspezifische Auswertung Gebäudedatenbank WüestPartner 2017
	Anteil verkehrsbelasteter Fassadenflächen	ARE (2004) basierend auf Gebäudedatenbank Wüest&Partner 2003/2004, BFS/GEOSTAT 2003 und BUWAL/SAEFL 2003
Dosis-Wirkungs-Relationen	Dosis-Wirkungs-Relation zwischen PM-10-Immission und Verkürzung der Fassadenlebensdauer	ARE (2004)
	Dosis-Wirkungs-Relation zwischen PM-10-Immission und Reinigungsfrequenzen	ARE (2004)
Kostensätze und Zinssatz	Kosten verschiedener Fassadenbauarten [CHF/m ²]	ARE (2004) und ARE (2008) Baukostenindex Hochbau des BFS
	Reinigungskosten für Fensterflächen [CHF/m ²]	ARE (2004) und ARE (2008) Nominallohnindex Dienstleistungen des BFS
	Realzinssatz (langfristige durchschnittliche reale Kapitalkosten)	Zinsinformationen SNB und diverse Geschäftsbanken

Tabelle 10: Quellenübersicht Ermittlung Gebäudeschadenskosten

Nicht berücksichtigt werden Schäden an Kunst- und Baudenkmälern.

3.2 Inputs und Berechnungen

3.2.1 Luftschadstoffbedingte Kapitalkosten durch eine kürzere Lebensdauer der Gebäudehülle

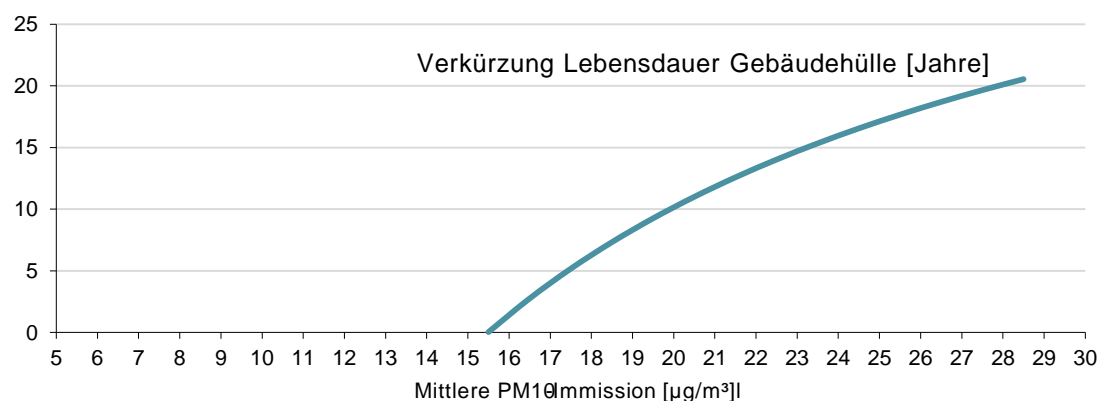
Ausgangspunkt für die Berechnung der luftschadstoffbedingten Kapitalkosten durch eine verkürzte Lebensdauer der Gebäudehülle sind die mittleren PM10-Immissionen pro Agglomerationstyp in den drei Erhebungsjahren:

Raumeinheiten	Anzahl Gemeinden	Mittlere PM10-Immissionen [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]		
		2005	2010	2015
Metropolen	1	22.0	18.8	15.7
Agglomerationen von Metropolen	102	19.4	16.3	13.2
Kerngemeinden in Metropolitanräumen	2	20.2	17.2	14.0
Sonstige Agglomeration in Metropolitanräumen	21	18.8	15.8	12.7
Ländliche Gemeinden	42	18.1	15.1	12.0
Stadt Zürich		22.0	18.8	15.7
Winterthur		20.5	17.4	14.2

Tabelle 11: Mittlere PM10-Immissionen nach Agglomerationstyp. Daten: AWEL Kanton Zürich 2017.

Mit der Dosis-Wirkungs-Relation (Figur 9) kann unter Verwendung der mittleren Immissionen (Tabelle 11) berechnet werden, um wie viele Jahre sich die Fassadenlebensdauer in den verschiedenen Agglomerationstypen verkürzt. Zu beachten ist dabei der Verlauf der Dosis-wirkungs-Relation: Erst ab einer mittleren PM10-Immissionen von über 15.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ stellen sich gemäss dieser Relation relevante Korrosionseffekte bei Fassaden ein, welche deren Lebensdauern verkürzen. Zudem steigt die Verkürzung mit zunehmenden Immissionen deutlich, so dass umgekehrt auch eine Verbesserung der Luftqualität die Verkürzung deutlich reduziert.

Relation zwischen PM10-Immissionen und Verkürzung der Fassadenlebensdauer



econcept

Figur 9: Relation zwischen PM10-Immissionen und Verkürzung der Fassadenlebensdauer. Quellen: ARE 2004, eigene Darstellung.

In Tabelle 12 sind die Ergebnisse zur luftschadstoffbedingten Verkürzung der Lebensdauer von Fassaden dargestellt: Während 2005 noch von einer Verkürzung der Lebensdauer von bis zu 13.3 Jahren (Metropolen bzw. Stadt Zürich) ausgegangen werden musste, Schränken Luftschadstoffe im Jahr 2015 die Lebensdauer von Gebäudehüllenelementen kaum noch ein.

Verkürzung der Fassadenlebensdauer nach Agglomerationstyp [Jahre]	2005			2010			2015		
Metropolen	13.3	8.0	0.6						
Agglomerationen von Metropolen	9.0	2.3	-						
Kerngemeinden innerhalb Metropolitanräumen	10.6	4.4	-						
Sonstige Agglomeration innerhalb Metropolitanräumen	7.8	0.8	-						
Ländliche Gemeinden	6.4	-	-						
Stadt Zürich	13.3	8.0	0.6						
Stadt Winterthur	11.0	4.9	-						

Tabelle 12: Verkürzung der Gebäudehüllenlebensdauer nach Agglomerationstyp. Daten: Eigene Berechnungen auf Basis ARE (2004) und AWEL (2017).

Auf Basis der Verkürzung der Lebensdauer werden die durch Luftverschmutzung zusätzlich verursachten Kapitalkosten berechnet. Grundlage hierfür bilden die durchschnittlichen Erstellungskosten von Gebäudehüllenelementen (Tabelle 14) sowie die Gebäudeflächen, differenziert nach Gebäudehüllenelement, Agglomerationstyp und Erhebungs-

jahr.¹³ Durch Multiplikation von Flächen (Tabelle 13) und Erstellungskosten (Tabelle 14) ergeben sich die Erstellungskosten (Tabelle 15).

Fassadenflächen im Kanton Zürich [m²] inkl. Fenster, Türen und Tore			
	2005	2010	2015
Metropolen	30'305'082	31'911'069	33'672'037
Agglomerationen von Metropolen	54'535'001	57'792'950	60'543'421
Kerngemeinden innerhalb Metropolitanräumen	9'459'376	9'979'092	10'387'877
Sonstige Agglomeration innerhalb Metropolitanräumen	7'312'219	7'795'006	8'116'653
Ländliche Gemeinden	6'253'327	6'513'417	6'746'112
Total Kanton Zürich	107'865'006	113'991'534	119'466'099
<hr/>			
Stadt Zürich	30'305'082	31'911'069	33'672'037
Stadt Winterthur	7'984'337	8'371'664	8'699'363

Tabelle 13: Fassadenflächen im Kanton Zürich [m²] inkl. Fenster, Türen und Tore

Erstellungskosten von Gebäudehüllen-Elementen [CHF/m²]			
	2005	2010	2015
Verputzte Fassaden	98	109	112
Rohe Fassaden ^(A)	234	259	265
Glas/Metall-Fassaden	657	728	746
Vorgehängte Fassaden	251	278	285
Türen/Tore	583	646	662
Fenster	721	799	818

Tabelle 14: Erstellungskosten von Gebäudehüllen-Elementen. Quellen: ARE (2014), Baupreisindex Hochbau des BFS.

^(A) Sichtbackstein, Sichtbeton oder Holz

Erstellungskosten von Fassaden, Fenster, Türen und Toren [Mio. CHF]			
	2005	2010	2015
Metropolen	8'900	10'500	11'500
Agglomerationen von Metropolen	16'600	19'600	21'100
Kerngemeinden innerhalb Metropolitanräumen	2'800	3'300	3'600
Sonstige Agglomeration innerhalb Metropolitanräumen	2'100	2'500	2'700
Ländliche Gemeinden	1'800	2'000	2'200
Total Kanton Zürich	32'200	38'000	41'000
<hr/>			
Stadt Zürich	8'900	10'500	11'500
Stadt Winterthur	2'400	2'800	3'000

Tabelle 15: Ungefähre Erstellungskosten der Gebäudehüllen. Quellen: Auszug Gebäudedatenbank Wüest-Partner 2017, ARE (2014), Baupreisindex Hochbau des BFS, eigene Berechnungen.

Durch Annuisierung¹⁴ werden die Erstellungskosten in jährliche Kapitalkosten umgerechnet (Tabelle 16). Die Differenz der jährlichen Kapitalkosten mit normaler und durch Luft-

¹³ Die Gebäudeflächendaten wurden der Gebäudedatenbank von WüestPartner entnommen.

¹⁴ Gestützt auf Zinsinformationen SNB und diverse Geschäftsbanken wird ein Zinssatz von 2% verwendet.

schadstoffe verkürzter Lebensdauer ergibt schliesslich die Luftschadstoffbedingten Kapitalkosten (Tabelle 16).

Kapitalkosten Gebäudehüllen (Annuitäten) [Mio. CHF]									
	Normale Lebensdauer (45 Jahre)			Verkürzte Lebensdauer			Differenz = Luftschadstoffbedingte Kapitalkosten		
	2005	2010	2015	2005	2010	2015	2005	2010	2015
Metropolen	301	355	389	381	404	392	79.9	48.2	3.2
Agglomerationen von Metropolen	563	665	716	651	687	716	88.5	22.6	-
Kerngemeinden innerhalb Metropolitanräumen	95	112	121	114	120	121	18.4	7.6	-
Sonstige Agglomeration innerhalb Metropolitanräumen	73	86	92	82	87	92	9.6	1.0	-
Ländliche Gemeinden	60	69	74	66	69	74	6.2	-	-
Total Kanton Zürich	1091	1288	1391	1294	1366	1391	202.7	79.4	3.2
Stadt Zürich	301	355	389	381	404	392	79.9	48.2	3.2
Stadt Winterthur	80	94	101	97	101	96	16.3	7.2	-

Tabelle 16: Kapitalkosten Gebäudehüllen [Mio. CHF]

3.2.2 Reinigungskosten

Wie oben bereits beschrieben (siehe Kapitel 3.1) werden die luftschadstoffbedingten Reinigungskosten nicht anhand von aktuellen Immissionsdaten ermittelt, sondern anhand der Anteile verkehrsbelasteter Flächen pro Agglomerationstyp (Tabelle 18). Unter der Annahme, dass Glas-, Metall- und Fensterflächen an verkehrsbelasteten Lagen eine zusätzliche Reinigung pro Jahr benötigen, werden die Anteile verkehrsbelasteter Gebäudeflächen mit den Glas-, Metall- und Fensterflächen pro Agglomerationstyp (Tabelle 18) und mit den Reinigungskosten pro Flächeneinheit (Tabelle 19) multipliziert. Daraus ergeben sich die Reinigungskosten (Tabelle 20).

Anteile verkehrsbelasteter Flächen	
Metropolen	31%
Agglomerationen von Metropolen	17%
Kerngemeinden innerhalb Metropolitanräumen	22%
Sonstige Agglomeration innerhalb Metropolitanräumen	17%
Ländliche Gemeinden	8%
Stadt Zürich	31%
Stadt Winterthur	22%

Tabelle 17: Anteile verkehrsbelasteter Flächen. Quelle: ARE (2004).

Glas-, Metall- und Fensterflächen [m²] (Insgesamt inkl. nicht belastete Flächen)			
	2005	2010	2015
Metropolen (Stadt Zürich)	3'552'191	3'841'196	4'159'854
Agglomerationen von Metropolen	4'841'332	5'104'074	5'325'460
Kerngemeinden innerhalb Metropolitanräumen	950'977	1'004'724	1'060'801
Sonstige Agglomeration innerhalb Metropolitanräumen	515'000	544'450	567'605
Ländliche Gemeinden	451'407	465'182	477'960
Stadt Zürich	3'552'191	3'841'196	4'159'854
Stadt Winterthur	809'192	850'966	902'921

Tabelle 18: Glas-, Metall- und Fensterflächen [m²]. Quelle: Gebäudedatenbank WüestPartner.

Reinigungskosten [CHF/m²]		
2005	2010	2015
4.85	5.25	5.45

Tabelle 19: Reinigungskosten [CHF/m²]. Quellen: ARE (2004), Nominallohnindex Dienstleistungen des BFS.

Luftschadstoffbedingte Reinigungskosten [Mio. CHF]			
	2005	2010	2015
Metropolen (Stadt Zürich)	5.4	6.3	7.1
Agglomerationen von Metropolen	4.0	4.6	5.0
Kerngemeinden innerhalb Metropolitanräumen	1.0	1.2	1.3
Sonstige Agglomeration innerhalb Metropolitanräumen	0.4	0.5	0.5
Ländliche Gemeinden	0.2	0.2	0.2
Total Kanton Zürich	11.0	12.7	14.0
Stadt Zürich	5.4	6.3	7.1
Stadt Winterthur	0.9	1.0	1.1

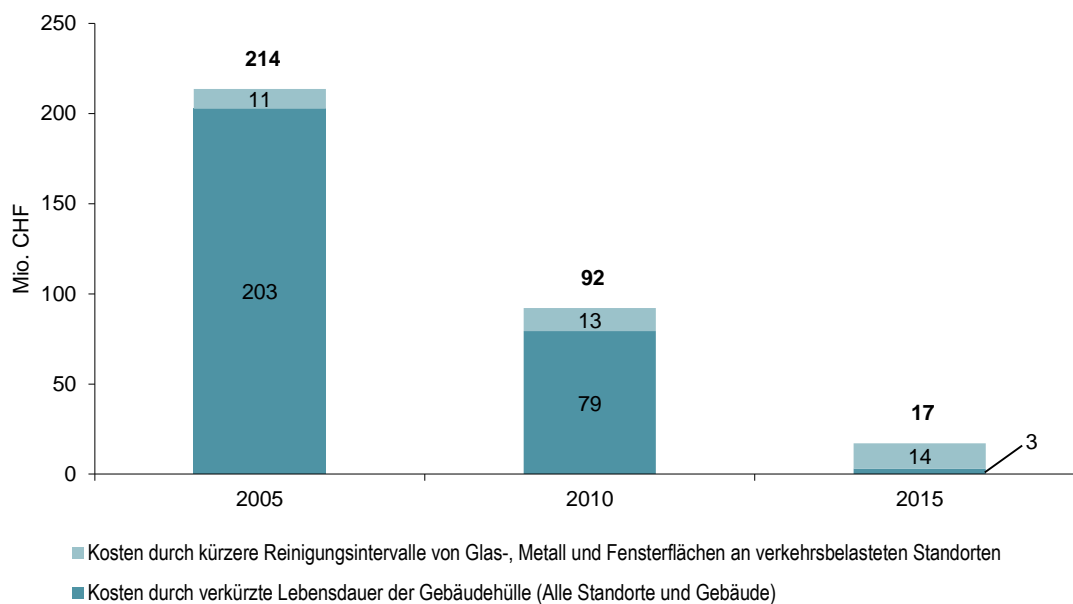
Tabelle 20: Luftschadstoffbedingte Reinigungskosten

3.3 Ergebnisse

Die luftschadstoffbedingten Gebäudeschadenskosten sind insgesamt von 214 Mio. CHF im Jahr 2005 auf nur mehr 17 Mio. CHF im Jahr 2015 gesunken, was einem Rückgang um 92% entspricht. Massiv rückläufig waren dabei die Kosten durch eine verkürzte Lebensdauer der Gebäudehülle, während die Kosten durch kürzere Reinigungsintervalle leicht gestiegen sind.

Der im Verhältnis zum Rückgang der Feinstaubbelastung stark überproportionale Rückgang der Kapitalkosten ist darauf zurückzuführen, dass sich die Feinstaubbelastung im Jahr 2015 vielerorts dem für Gebäude kritischen Wert («critical value») angenähert oder diesen sogar unterschritten hat. Wie oben beschrieben ist gemäss vorhandener Kenntnisse (ARE 2004) ab einem PM10-Immissionswert von unter 15.5 µg/m³ (im Jahresmittel) keine Verkürzung der Fassadenlebensdauer mehr zu verzeichnen.

Luftschadstoffbedingte Gebäudeschadenskosten im Kanton Zürich



econcept

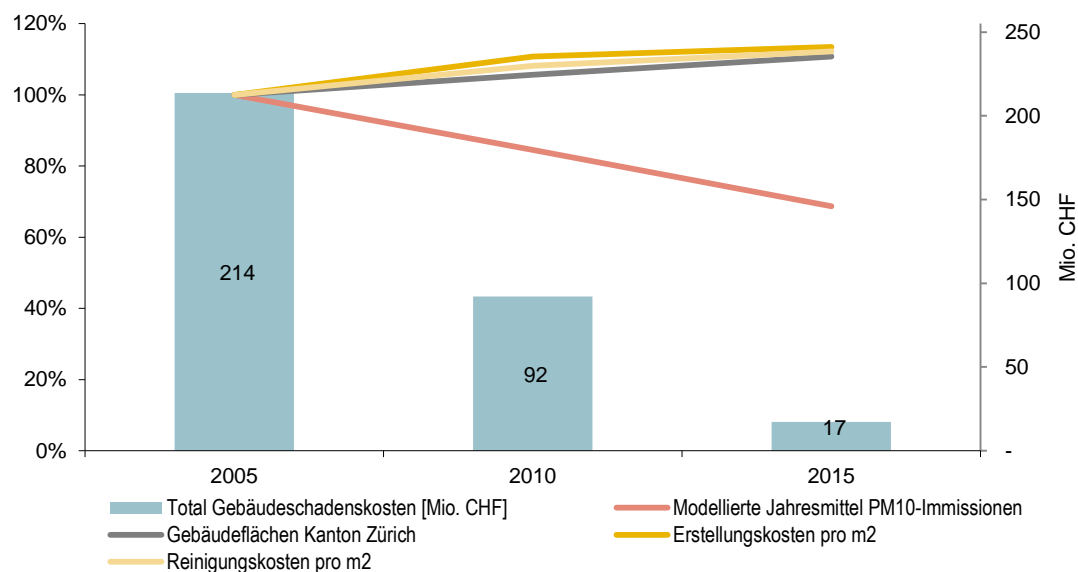
Figur 10: Luftschadstoffbedingte Gebäudeschadenskosten im Kanton Zürich

3.4 Determinanten der Kostenentwicklung

Grund für den deutlichen Rückgang der luftschadstoffbedingten Gebäudeschadenskosten ist der deutliche Rückgang der PM₁₀-Immissionen von im Mittel rund 19.7 µg/m³ im Jahr 2005 auf rund 13.5 µg/m³ im Jahr 2015.¹⁵ Damit sind die Immissionswerte vielerorts unter den für Gebäudeschäden relevanten Referenzwert von rund 15.5 µg/m³ gefallen. Alle anderen kostentreibenden Faktoren (Erstellungskosten, Reinigungskosten, Gebäudeflächen) sind zwar zwischen 2005 und 2015 deutlich gestiegen, die damit potentiell ausgelösten Kostensteigerungen wurden jedoch durch die Senkung der PM₁₀-Immissionen mehr als ausgeglichen.

¹⁵ Die hier aufgeführten PM₁₀-Immissionsmittelwerte sind nicht dieselben wie bei den Gesundheitskosten: Die für die Gesundheitskosten massgeblichen Mittelwerte sind im Gegensatz zu den hier dargestellten mit der Bevölkerungsexposition gewichtet.

Determinanten der Kostenentwicklung bei den Gebäudeschäden



econcept

Figur 11: Determinanten der Kostenentwicklung
 Linke Skala: Determinanten der Gebäudeschadenskosten (Linien) in Prozent. Wert im Jahr 2005 = 100%.
 Rechte Skala: Gebäudeschadenskosten in Mio. CHF (Säulen).

3.5 Einordnung der Ergebnisse

Das angewendete Vorgehen entspricht der zurzeit einzigen verfügbaren Methoden, um luftschadstoffbedingte Gebäudeschadenskosten nicht nur für einzelne Materialien oder Gebäude, sondern flächendeckend für grosse Perimeter mit einem relativ geringen Aufwand zu erheben. Hat die Methode zum Zeitpunkt ihrer Entwicklung noch plausible und verlässliche Ergebnisse geliefert, offenbaren sich mit der deutlich abnehmenden PM10-Belastungen nun zunehmend Schwächen.

Laut der zu verwendenden Dosis-Wirkungs-Relation zwischen PM10-Belastung und der Verkürzung der Fassadenlebensdauer stellen sich relevante Korrosionseffekte erst ab einer Belastung von $15.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ein. Gleichzeitig steigt ab dieser Belastung die Verkürzung mit zunehmenden Immissionen deutlich, so dass umgekehrt auch eine Verbesserung der Luftqualität die Verkürzung deutlich reduziert. Während 2005 die PM10-Immissionen im Kanton noch zwischen 18 und $22 \mu\text{g}/\text{m}^3$ lagen, liegen sie im Jahr 2015 vielerorts unterhalb des kritischen Wertes von $15.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Dadurch wird zwischen 2005 und 2015 ein massiver Rückgang der Gebäudeschadenskosten im Kanton Zürich von 214 Mio. CHF auf 17 Mio. CHF ausgewiesen, was einer Reduktion um 92% entspricht.

Ein im Verhältnis zur Immissions-Entwicklung so stark überproportionaler Rückgang der Kosten ist auf unserer Sicht zu hinterfragen. Klärung kann nur eine neuerliche Überprüfung der Dosis-Wirkungs-Relation bringen.

Eine weitere Schwäche der Methode ist, dass bei der Ermittlung von luftschadstoffbedingten Reinigungskosten keine aktuellen Immissions-, sondern nur Gebäudeflächen-

und Lohn-Daten einfließen. Die dadurch bedingte Ungenauigkeit in den Ergebnissen wird umso grösser, je weiter sich die PM10-Immissionen vom Niveau wegbewegen, auf welchem sie zum Zeitpunkt der Methodenentwicklung lagen. Auch hier ist aus unserer Sicht eine Erneuerung der Bewertungsgrundlagen angebracht.

Insbesondere ist aber zu klären, ob mit dem heutigen Belastungsniveau überhaupt in relevanten Masse Schäden an Gebäuden entstehen, die zukünftig für die Bestimmung der Kosten der Luftverschmutzung zu berücksichtigen sind.

4 Waldschadenskosten

4.1 Vorgehen und Quellen

Stickstoffeintrag und Ozonimmissionen wirken sich nachweislich negativ auf Wälder aus, beispielsweise indem sie zu Bodenversauerung und zu verändertem Wachstum, gestörten Nährstoffhaushalten, zu verminderter Standfestigkeit und Kronenverlichtungen führen. Quantitativ erfassen lassen sich aktuell vor allem zwei Auswirkungen:

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

Die Waldschadenskosten werden wie folgt ermittelt (vgl. Figur 12):

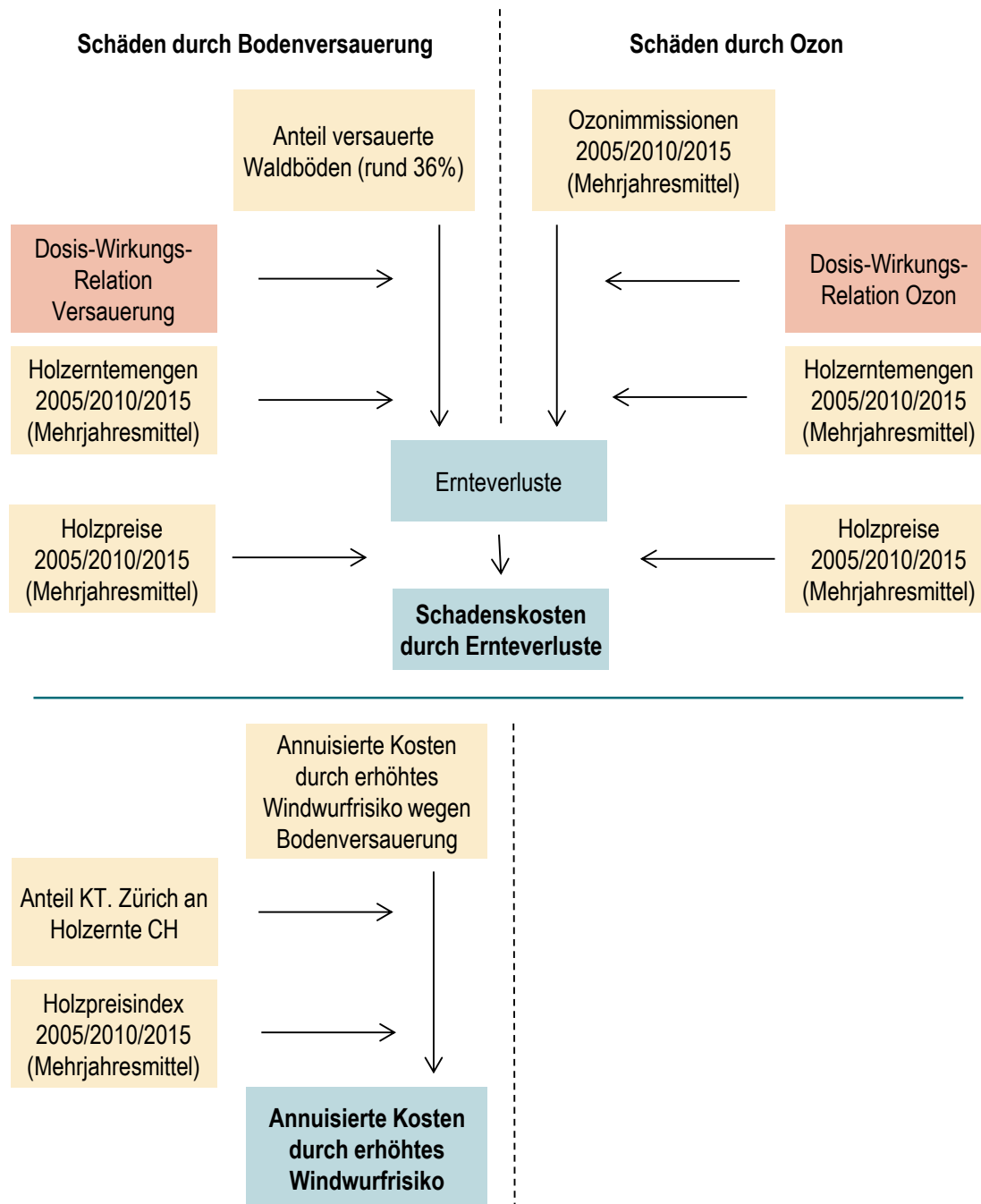
- **Durch Versauerung vermindertes Holzwachstum:** Der Anteil versauerter Waldböden mit einer Basensättigung von unter 40% liegt gemäss aktuellem Kenntnisstand bei rund 36% und verändert sich nur sehr langsam. Mangels anderer Datengrundlagen wird er für die drei Erhebungsjahre 2005, 2010 und 2015 als konstant angenommen. Die Stickstoffemissionen der Landwirtschaft und des Verkehr gelten als Haupttreiber dieser Entwicklung.¹⁶ Mittels Dosis-Wirkungs-Relationen und Holzermengungen können die durch Versauerung entstehenden Ernteverluste berechnet und mittels Holzpreisen monetarisiert werden. Sowohl bei den Holzpreisen wie auch bei den Erntemengen verwenden wir aufgrund der jährlichen Schwankungen langjährige Mittelwerte. *In die Berechnung der durch Bodenversauerung bedingten Holzernsterverluste fliessen folglich keine Emissions- oder Immissionsdaten ein.*
- **Durch Versauerung erhöhtes Windwurfrisiko:** Die Kosten durch ein erhöhtes Windwurfrisiko im Kanton Zürich werden von den schweizweiten Kosten¹⁷ abgeleitet, anhand des Anteils des Kantons Zürich an der schweizweiten Holzernte. *In die Berechnung der durch Bodenversauerung bedingten Kosten durch ein erhöhtes Windwurfrisiko fliessen folglich keine Emissions- oder Immissionsdaten ein.*
- **Durch Ozon vermindertes Holzwachstum:** Ausgehend von den Ozonemissionen und unter Verwendung von Dosis-Wirkungs-Relationen und Holzerntemengen können die ozonbedingten Ernteverluste berechnet und anschliessend mittels Holzpreisen monetarisiert werden. Aufgrund der jährlichen Schwankungen von Ozonimmissionen,

¹⁶ Schweizerischer Bundesrat (2017)

¹⁷ Die Schätzung der schweizweiten Kosten geht auf das Sturmereignis Lothar zurück, anhand dessen der Zusammenhang zwischen Versauerung und Windwurf sowie auch die Kosten solcher Sturmereignisse mit guter Verlässlichkeit eruiert werden konnten.

Holzerntemengen und Holzpreisen verwenden wir für alle drei Inputfaktoren Mehrjahresmittelwerte.

Vorgehen zur Ermittlung der Waldschadenskosten



econcept

Figur 12: Vorgehen zur Ermittlung der Waldschadenskosten
 Gelb: Daten
 Rot: Modelle und Relationen.
 Blau: Zwischenergebnisse und Ergebnisse

4.2 Inputs und Berechnungen

Im Folgenden werden Inputs und Berechnungen für den Kanton Zürich gezeigt. Die in den Städten Zürich und Winterthur entstehenden Waldschadenskosten werden von den kantonalen Ergebnissen abgeleitet, anhand der städtischen Anteile an bestockten Flächen an den bestockten Flächen im Gesamtkanton.

4.2.1 Schadenskosten durch Ernteverluste

Wie oben dargestellt entstehen Ernteverluste zum einen durch Bodenversauerung, zum anderen durch Ozonimmissionen.

Ernteverluste durch Bodenversauerung

Mit dem Anteil versauerter Waldböden (Tabelle 21) in der Schweiz und der dortigen Wachstumsreduktion bei Nadel- und Laubbäumen (Tabelle 22) kann berechnet, um wie viel grösser die Holzerntemengen (Tabelle 23) ohne Versauerung gewesen wären. Die Differenz zwischen effektiven und potentiellen Erntemengen bewertet mit den Holzpreisen (Tabelle 24) ergibt die Waldschadenskosten durch Ernteverluste aufgrund versauerter Waldböden (Tabelle 25).

Anteil versauerter Waldböden in der Schweiz

36%

Tabelle 21: Anteil versauerter Waldböden in der Schweiz. Quelle: Bericht des Bundesrates in Erfüllung des Postulats von Siebenthal (13.4201) vom 2. Februar 2017.

Reduktion Holzwachstum auf versauerten Böden

Nadelbäume	18%
Laubbäume	12%

Tabelle 22: Reduktion Holzwachstum auf versauerten Böden. Quellen: Ouimet 2001, WEG 2004, ARE 2014.

Holzerntemengen [Festmeter] langjährige Mittelwerte

		2004 - 2006	2009 - 2011	2014-2015
Nadel	Stammholz	285'476	168'806	149'076
	Industrieholz	26'643	18'685	13'453
	Stück-Energieholz	17'699	9'776	7'662
	Hack-Energieholz	36'920	35'428	37'744
Laub	Stammholz	33'750	31'523	31'519
	Industrieholz	10'367	13'282	12'886
	Stück-Energieholz	46'322	49'634	45'047
	Hack-Energieholz	39'701	79'336	103'929

Tabelle 23: Holzerntemengen [Festmeter] langjährige Mittelwerte. Quelle: Schweizerische Forststatistik des BFS.

Holzpreise [CHF pro Festmeter]		2004 - 2006	2009 - 2011	2014-2015
Nadel	Stammholz	70	90	82
	Industrieholz	31	39	37
	Stück-Energieholz	73	84	86
	Hack-Energieholz	57	66	68
Laub	Stammholz	95	123	112
	Industrieholz	51	50	50
	Stück-Energieholz	90	111	105
	Hack-Energieholz	55	63	65

Tabelle 24: Holzpreise [CHF pro Festmeter]. Quelle: BAFU (2016).

Waldschadenskosten durch Ernteverluste wegen Bodenversauerung [Mio. CHF]		2004 - 2006	2009 - 2011	2014-2015
Nadel	Stammholz	3.52	2.69	2.16
	Industrieholz	0.15	0.13	0.09
	Stück-Energieholz	0.23	0.15	0.12
	Hack-Energieholz	0.37	0.42	0.45
Laub	Stammholz	0.38	0.46	0.42
	Industrieholz	0.06	0.08	0.08
	Stück-Energieholz	0.49	0.65	0.56
	Hack-Energieholz	0.26	0.60	0.80
Total [Mio. CHF]		5.5	5.2	4.7

Tabelle 25: Waldschadenskosten durch Ernteverluste wegen Bodenversauerung [Mio. CHF]

Ernteverluste durch Ozonimmissionen

Folgende Formel beschreibt den Zusammenhang zwischen dem Stammvolumen (indirekt Holzertrag) und der Ozonkonzentration:

$$\text{Relatives Stammvolumen (in \%)} = 100 + m \cdot \text{AOT40f}^{18}$$

Das relative Stammvolumen bezeichnet das Stammvolumen bei einer bestimmten Ozonbelastung im Verhältnis zum Stammvolumen an einem Standort ohne Belastung (gemessen anhand des AOT40f-wertes). m entspricht der baumartenspezifischen, prozentualen Reduktion des Stammvolumens pro zusätzlicher Einheit ppm*h Ozonbelastung. m kann somit auch als prozentuale Reduktion der Holzzuwachses pro zusätzlicher Einheit ppm*h Ozonbelastung interpretiert werden.

Das relative Stammvolumen kann folglich mittels der baumartenspezifischen Werte des Parameters m (Tabelle 27) und den Ozonbelastungswerten (Tabelle 26) berechnet werden. Die Ergebnisse sind in Tabelle 28 dargestellt. Anhand des relativen Stammvolumens, der Holzerntemengen (Tabelle 23) und der Holzpreise (Tabelle 24) können schliesslich die Waldschadenskosten durch ozonbedingte Holzernteverluste berechnet werden (Tabelle 29).

¹⁸ 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 (Messhöhe) auf 20m beträgt 1.03.

Dosis AOT40f in ppm*h					
2004	16.2	2009	13.3	2014	11.6
2005	15.2	2010	14.7	2015	17.5
2006	19.8	2011	16.0		
Ø 2004-2006	17.1	Ø 2009 - 2011	14.7	Ø 2014- 2015	14.6
Dosis AOT40f in ppm*h mit Höhenkorrektur von 4m (Messhöhe) auf 20m					
Ø 2004-2006	17.6	Ø 2009 - 2011	15.1	Ø 2014- 2015	15.0

Tabelle 26: Dosis AOT40f in ppm*h. Messdaten Station Dübendorf EMPA, 432 m.ü.M., vorstädtisch. Quelle: European air quality database version 7, CLRTAP (2017).

Werte Parameter m für verschiedene Baumarten:	
Baumart	Reduktion des Stammvolumens / des Holzzuwachses pro zusätzlicher ppm*h Ozonbelastung (Steigung m)
Buche	-0.54
Eiche	-0.38
Birke	-0.54
Fichte	-0.14
Föhre	-0.48

Tabelle 27: Dosis-Wirkungs-Relation. Quelle: ARE (2014) bzw. Braun & Rihm (2012), Karlsson et al. (2005).

Relatives Stammvolumen bei Ozonbelastung [Prozent]			
	2002-2006	2007-2011	2012-2015
Buche	90	92	92
Eiche	93	94	94
Birke	90	92	92
Mittelwert Laubbäume	91	93	93
Fichte	98	98	98
Föhre	92	93	93
Mittelwert Nadelbäume	95	95	95

Tabelle 28: Relatives Stammvolumen bei Ozonbelastung.

Waldschadenskosten durch ozonbedingte Holzernteverluste [Mio. CHF]				
		2004 - 2006	2009 - 2011	2014-2015
Nadel	Stammholz	1.09	0.71	0.57
	Industrieholz	0.05	0.03	0.02
	Stück-Energieholz	0.07	0.04	0.03
	Hack-Energieholz	0.12	0.11	0.12
Laub	Stammholz	0.27	0.28	0.26
	Industrieholz	0.05	0.05	0.05
	Stück-Energieholz	0.36	0.41	0.35
	Hack-Energieholz	0.19	0.37	0.49
Total		2.2	2.0	1.9

Tabelle 29: Waldschadenskosten durch ozonbedingte Holzernteverluste

4.2.2 Schadenskosten durch ein erhöhtes Windwurfrisiko

Wie oben bereits beschrieben werden die Kosten durch ein erhöhtes Windwurfrisiko im Kanton Zürich von den schweizweiten Kosten¹⁹ abgeleitet, anhand des Anteils des Kantons Zürich an der schweizweiten Holzernte.

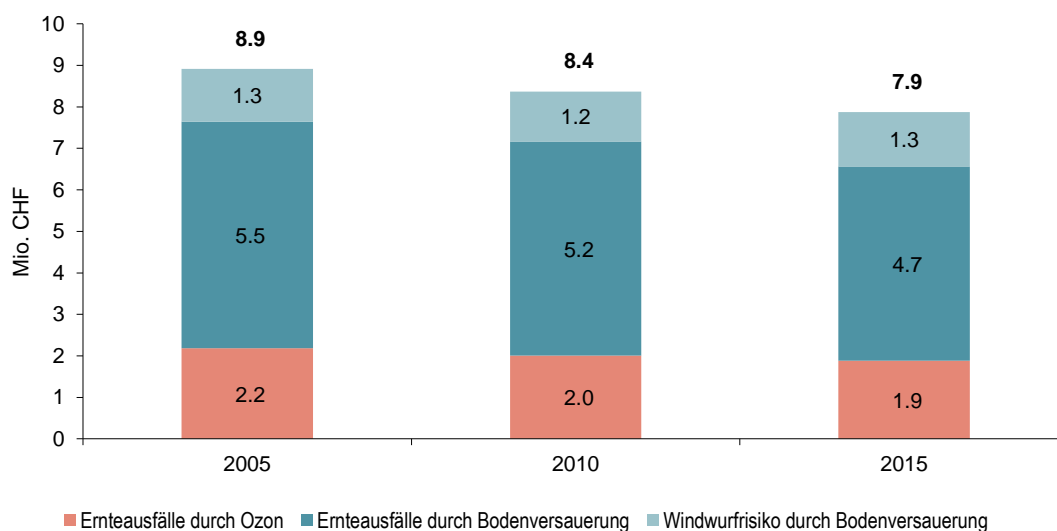
Parameter	2004-2006	2009-2011	2014-2015
Schweizweite Kosten erhöhtes Windwurfrisiko [Mio. CHF]	5.0	5.7	5.0
Anteil Kanton Zürich an schweizweiter Holzernte	5%	4%	4%
Kosten erhöhtes Windwurfrisiko im Kanton Zürich [Mio. CHF]	0.23	0.23	0.21

Tabelle 30: Berechnung der Schadenskosten durch ein erhöhtes Windwurfrisiko. Quellen: ARE (2014), Schweizerische Forststatistik des BFS (2016).

4.3 Ergebnisse

Die luftschadstoffbedingten Walschadenskosten sind ebenso wie die Kosten in den anderen Schadensbereichen zwischen 2005 und 2015 zurückgegangen. Im Jahr 2005 lagen sie bei 8.9 Mio. CHF, im Jahr 2010 bei 8.4 Mio. CHF und im Jahr 2015 noch bei 7.9 Mio. CHF.

Luftschadstoffbedingte Waldschadenskosten im Kanton Zürich



econcept

Figur 13: Luftschadstoffbedingte Waldschadenskosten im Kanton Zürich

Mit gut zwei Drittel haben in allen drei Jahren die Kosten durch Ernteauffälle wegen Bodenversauerung den grössten Anteil an den gesamten Waldschadenskosten. Bei knapp einem Drittel liegt jeweils der Anteil der ozonbedingten Ernteauffälle. Die Kosten durch

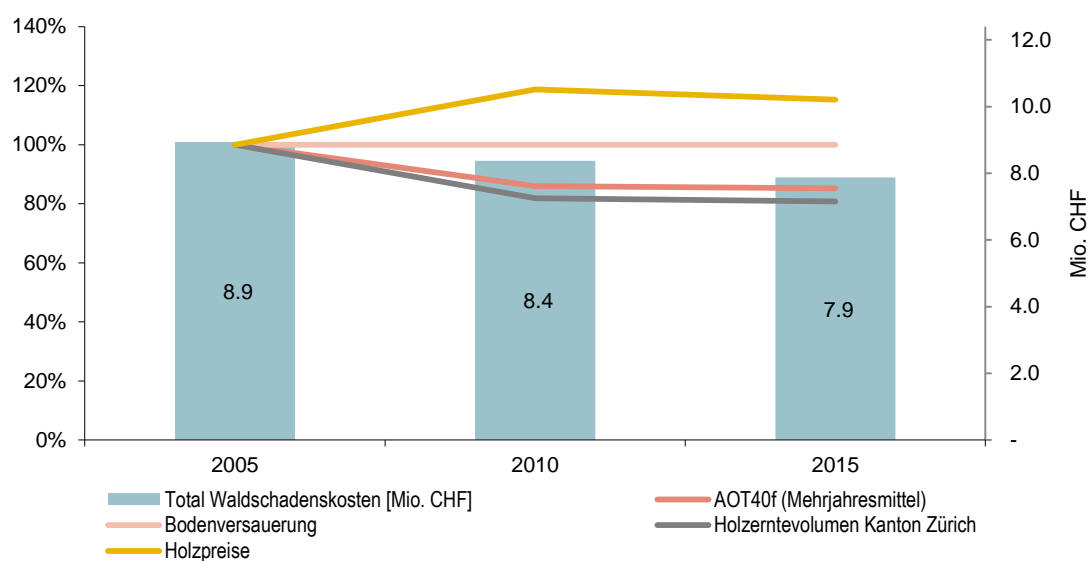
¹⁹ Die Schätzung der schweizweiten Kosten geht auf das Sturmereignis Lothar zurück, anhand dessen der Zusammenhang zwischen Versauerung und Windwurf sowie auch die Kosten solcher Sturmereignisse mit guter Verlässlichkeit eruiert werden konnten.

ein erhöhtes Windwurfrisiko sind vergleichsweise gering und machen nur 2-3% der gesamten Waldschadenskosten aus.

4.4 Determinanten der Kostenveränderung

Die rückläufige Entwicklung der Waldschadenskosten zwischen 2005 und 2015 ist zum einen bedingt durch die Abnahme der Ozonimmissionen. Zum anderen haben die tieferen Holzermengungen zur Kostensenkung beigetragen. Zusammen haben diese beiden Effekte die kostensteigernde Wirkung der zunehmenden Holzpreise mehr als ausgeglichen.

Determinanten der Kostenentwicklung bei den Waldschadenskosten



econcept

Figur 14: Determinanten der Kostenentwicklung bei den Waldschadenskoste
Linke Skala: Determinanten der Waldschadenskosten (Linien) in Prozent. Wert im Jahr 2005 = 100%.
Rechte Skala: Waldschadenskosten in Mio. CHF (Säulen)

5 Biodiversitätsschadenskosten

Die übermässige Freisetzung von Stickstoff führt zur Eutrophierung und Versauerung von Böden, wodurch Pflanzenarten verdrängt werden, die an nährstoffärmere Böden angepasst sind. Somit wirken sich NO_x - und NH_3 -Emissionen negativ auf die Biodiversität aus.

5.1 Vorgehen und Quellen

Das EU-Forschungsprojekt NEEDs (Ott et al. 2006, NEEDS 2008) stellt noch immer die aktuellsten Grundlagen für eine mit relativ geringem Aufwand mögliche Grobschätzung der luftschadstoffbedingten Biodiversitätsschadenskosten zur Verfügung. Die durch NEEDs (2008) ermittelten länderspezifischen Kostensätze und damit auch die verwendete Methode haben sich etabliert und werden unter anderem in der UBA Methodenkonvention 2.0 (UBA 2013) aufgeführt.

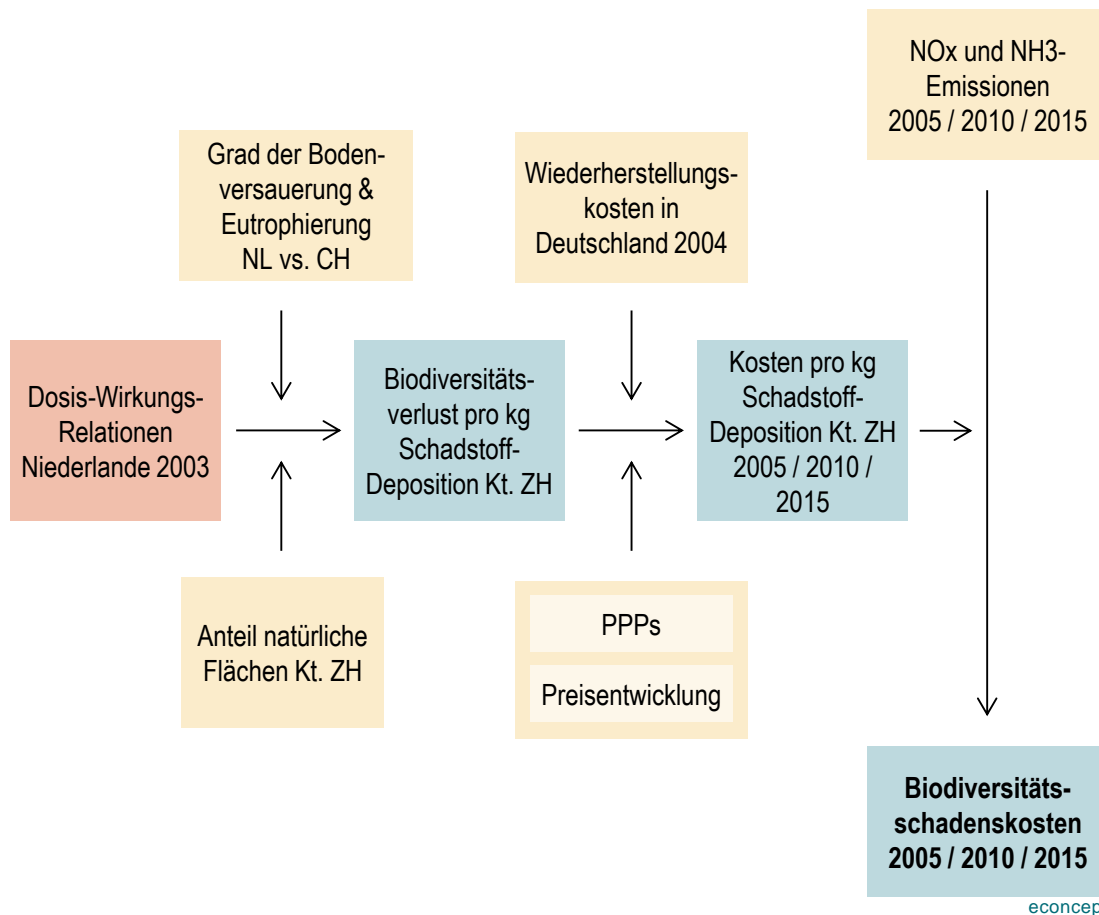
Neben den Stickstoffverbindungen gilt heute auch Ozon als potentiell schädlich für die Biodiversität, jedoch werden die empirischen Grundlagen als noch lückenhaft bezeichnet (WGE 2017), weswegen hier keine ozonbedingten Biodiversitätsschadenskosten ermittelt werden.

So wie bereits in früheren kantonsspezifischen Erhebungen der Biodiversitätsschadenskosten verwenden wir nicht die in NEEDs (2008) für die Schweiz ermittelten Kostensätze (Kosten pro Tonne Luftschadstoff NO_x und NH_3), sondern berechnen kantonsspezifische Kostensätze, um dem im Kanton Zürich deutlich geringeren Anteil natürlicher Flächen Rechnung zu tragen.

Figur 15 verdeutlicht das Vorgehen: Ausgangspunkt der Berechnungen bilden die für die Niederlande ermittelten Dosis-Wirkungs-Relationen zwischen Schadstoffdeposition und Biodiversitätsverlusten. Die Relationen werden mittels des jeweiligen Grades von Bodenversauerung und Eutrophierung in den Niederlanden und in der Schweiz sowie dem Anteil natürlicher Flächen im Kanton Zürich an den Kanton Zürich angepasst. Anschliessend werden unter Verwendung von für Deutschland ermittelten Wiederherstellungskosten und entsprechender Umrechnungen die Biodiversitätsschadenskosten pro kg Schadstoffdeposition im Kanton Zürich ermittelt.

Die Biodiversitätsschadenskosten in den Städten werden anhand ihrer jeweiligen Anteile an den natürlichen Flächen des Kantons Zürich ermittelt.

Vorgehen zur Ermittlung der Biodiversitätsschadenskosten



econcept

Figur 15: Vorgehen zur Ermittlung der Biodiversitätsschadenskosten. Die Abkürzung PPPs steht für Purchasing Power Parity, ein Umrechnungsfaktor, mittels welchem Preise über Länder kaufkraftbereinigt werden können.

Gelb: Daten

Rot: Modelle und Relationen.

Blau: Zwischenergebnisse und Ergebnisse

5.2 Inputs und Berechnungen

Wie oben bereits erwähnt dient als Grundlage für die Berechnungen ein niederländisches Schadensmodell, welches für marginale Änderungen von 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 liegt zwischen 0 und 1 und zeigt, welcher Anteil der ursprünglich in einem Habitattyp vorkommenden typischen Arten durch die Deposition von Luftschadstoffen stark gefährdet ist.

Folgende Tabelle zeigt die Dosis-Wirkungs-Beziehungen für die Niederlande sowie für den Kanton Zürich, wobei der unterschiedliche Grad der bestehenden Versauerung und Eutrophierung sowie der Anteil natürlicher Flächen im Kanton berücksichtigt sind.

Schadstoff	Veränderung PDF pro μg Deposition ($\text{PDF}\cdot\text{m}^2/\mu\text{g}$) in NL bei 100% natürlicher Fläche	Veränderung PDF pro μg Deposition ($\text{PDF}\cdot\text{m}^2/\mu\text{g}$) im Kanton Zürich bei effektivem Anteil natürlicher Flächen (33%)
NO _x	$9.52\cdot 10^{-6}$	$2.09\cdot 10^{-6}$
NH ₃	$25.94\cdot 10^{-6}$	$5.71\cdot 10^{-6}$

Tabelle 31: Dosis-Wirkungs-Relationen für die Niederlande und den Kanton Zürich. Quellen: Eco-indicator (1999), Ott et al. (2006).

Lesebeispiel: Ein μg NO_x deponiert auf einem m^2 Land führt in den Niederlande zu einer PDF-Veränderung von $9.52\cdot 10^{-6}$.

Bewertet werden die in PDF gemessenen Biodiversitätsverluste mittels der Wiederherstellungskosten. Dabei wird diejenige Landnutzungsänderung mit den geringsten Kosten für die «Produktion» von Biodiversität, d.h. für eine positive PDF-Veränderungen, verwendet (at-least-Ansatz). Dies ist der Übergang von integrierter Landwirtschaft zu Biolandwirtschaft mit Kosten von 0.47 Euro/($\text{PDF}\cdot\text{m}^2$) in Deutschland im Jahr 2004. Unter Berücksichtigung von Kaufkraftparitäten und Preisentwicklungen ergeben sich die folgenden CHF-Beträge:

Wiederherstellungskosten Biodiversität: CHF/($\text{PDF}\cdot\text{m}^2$)			
	2005	2010	2015
	0.70	0.73	0.72

Tabelle 32: CHF/($\text{PDF}\cdot\text{m}^2$)

Anhand von Tabelle 31 und Tabelle 32 lassen sich für den Kanton Zürich gültige Kostensätze für Biodiversitätsschäden durch Luftschadstoffe berechnen (Tabelle 33). Multipliziert mit den Emissionen (Tabelle 34) ergeben sich so die Biodiversitätsschadenskosten (Tabelle 35).

Kosten pro kg Schadstoff-Deposition [CHF pro kg]			
	2005	2010	2015
NO _x	1.46	1.53	1.50
NH ₃	3.98	4.16	4.09

Tabelle 33: Kosten pro kg Schadstoff-Deposition [CHF pro kg]

Schadstoffemissionen im Kanton Zürich [t/a]			
	2005	2010	2015
NO _x	12'487	10'037	8'543
NH ₃	3'921	3'839	3'603

Tabelle 34: Schadstoffemissionen im Kanton Zürich [t/a]

Biodiversitätsschadenskosten im Kanton Zürich [Mio. CHF]			
	2005	2010	2015
NO _x	18.3	15.3	12.8
NH ₃	15.6	16.0	14.7
Total	33.9	31.3	27.5

Tabelle 35: Biodiversitätsschadenskosten im Kanton Zürich [Mio. CHF]

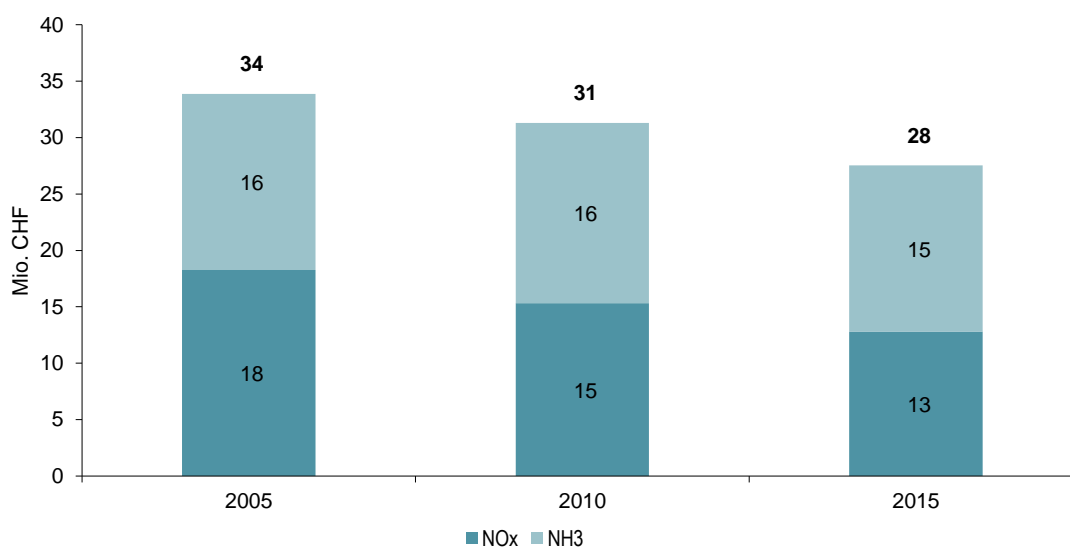
Die Biodiversitätsschadenskosten in den Städten Zürich und Winterthur werden gemäss ihrer jeweiligen Anteile an den natürlichen Flächen im Kanton Zürich bestimmt.

5.3 Ergebnisse

5.3.1 Kanton Zürich

Die luftschadstoffbedingten Biodiversitätsschadenskosten lagen im Kanton Zürich im Jahr 2005 bei rund 34 Mio. CHF und sind seither ebenso wie die verursachenden Emissionen (NO_x und NH_3) zurückgegangen. Im Jahr 2010 betrug die Biodiversitätsschadenskosten nur noch rund 31 Mio. CHF, im Jahr 2015 rund 28 Mio. CHF. Die Schadenskosten sind jeweils etwa zur Hälfte durch NO_x - und NH_3 -Emissionen bedingt. Zwar wird im Kanton sehr viel mehr NO_x als NH_3 emittiert, jedoch sind NH_3 -Emissionen für die Biodiversität schädlicher.

Luftschadstoffbedingte Biodiversitätsschadenskosten im Kanton Zürich



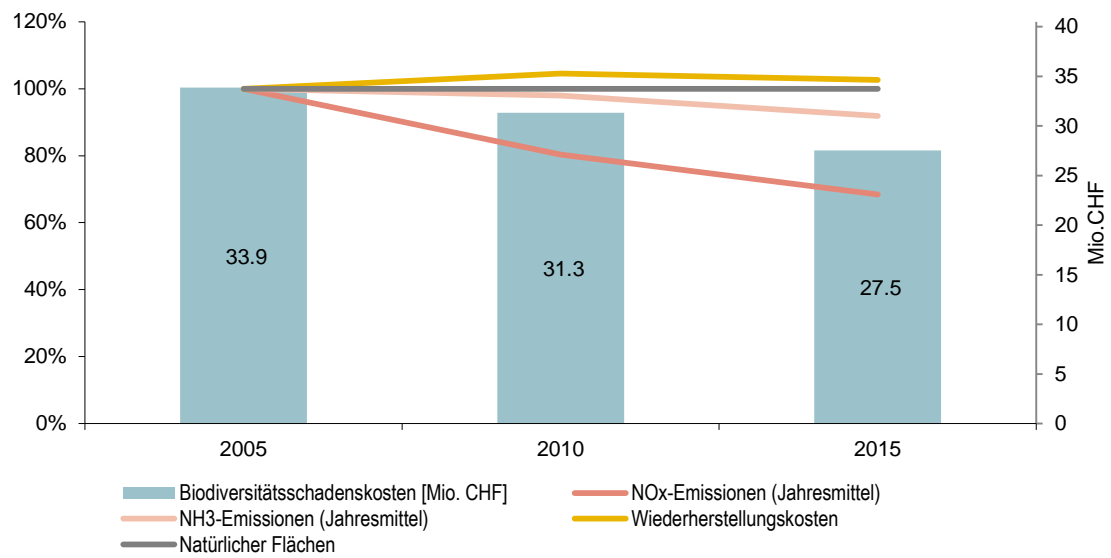
econcept

Figur 16: Luftschadstoffbedingte Biodiversitätsschadenskosten im Kanton Zürich [Mio. CHF]

5.4 Determinanten der Kostenentwicklung

Der Rückgang der Biodiversitätsschadenskosten ist auf die deutliche Abnahme der NO_x - und NH_3 -Emissionen zurückzuführen, welche den leichten Anstieg der Wiederherstellungskosten mehr als ausgleichen haben.

Determinanten der Kostenentwicklung bei den Biodiversitätsschadenskosten



econcept

Figur 17: Determinanten der Kostenentwicklung bei den Biodiversitätsschadenskosten
Linke Skala: Determinanten der Biodiversitätsschadenskosten (Linien) in Prozent. Wert im Jahr 2005 = 100%.
Rechte Skala: Biodiversitätsschadenskosten in Mio. CHF (Säulen).

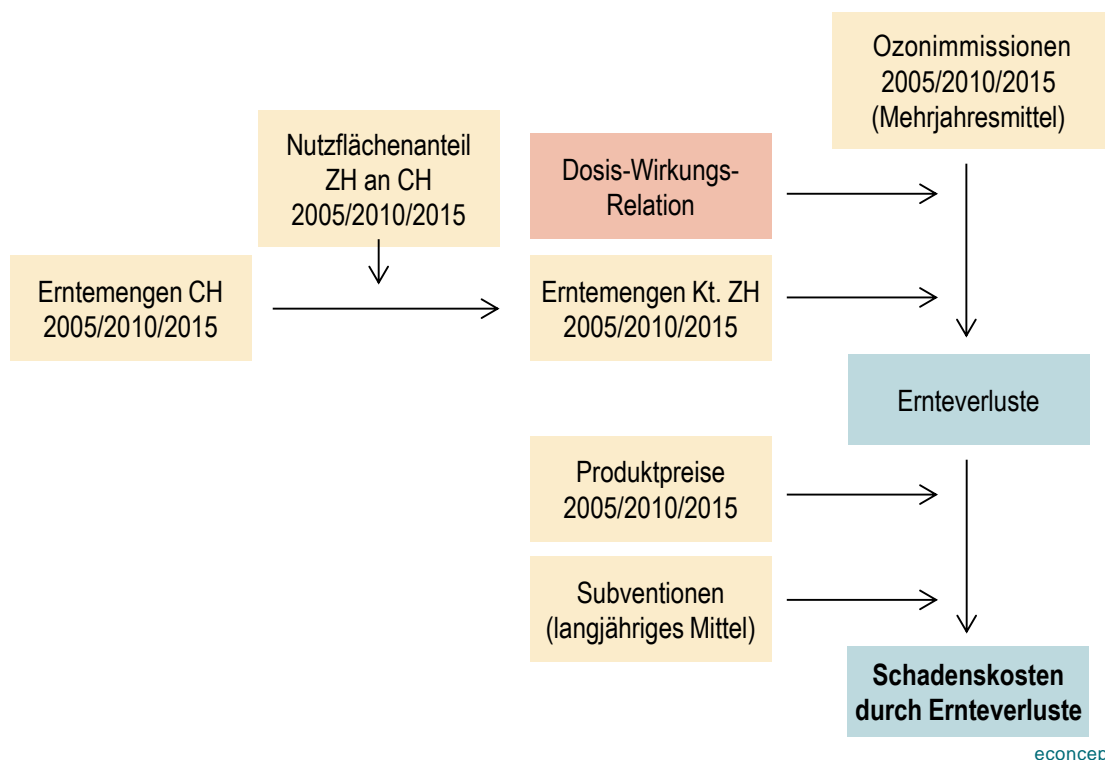
6 Ernteauffälle

6.1 Vorgehen und Quellen

Verschiedene Luftschadstoffe können negative Auswirkungen auf Nutzpflanzen haben. Besonders ausgeprägt und gut dokumentiert ist jedoch der Einfluss von bodennahem Ozon. Dieses entsteht unter dem Einfluss von Sonnenlicht aus Stickoxiden, Kohlenmonoxid, Sauerstoff und organischen Kohlenstoffverbindungen.

Die im Kanton Zürich durch bodennahes Ozon entstehenden Ernteverluste lassen sich mittels Dosis-Wirkungs-Relationen, Nutzflächenangaben und Erntertragsdaten quantifizieren. Um die Kosten der Ernteauffälle zu bestimmen, werden die Ernteauffälle mit den jeweiligen Produzentenpreisen multipliziert, wobei zur Bestimmung der volkswirtschaftlichen Kosten der subventionierte Anteil herausgerechnet wird.

Vorgehen zur Ermittlung der Ernteauffälle



Figur 18: Vorgehen zur Ermittlung der Ernteauffälle

6.2 Inputs und Berechnungen

Mit der Messstation EMPA-Dübendorf wird die Ozonbelastung von Landwirtschaftsflächen im Kanton Zürich am besten wiedergegeben, wobei die für Nutzpflanzen massgebli-

che Belastung mit dem AOT40c-Wert²⁰ erfasst wird. Da die Ozonbelastung stark witterungsabhängig ist, werden langjährige Mittelwerte verwendet:

Dosis AOT40c in ppm*h					
2004	9.8	2009	7.2	2014	9.4
2005	11.4	2010	11.1	2015	12.6
2006	17.0	2011	9.7		
Ø 2004 - 2006	12.7	Ø 2009 - 2011	9.4	Ø 2014 - 2015	11.0
Dosis AOT40c in ppm*h mit Höhenkorrektur von 4m (Messhöhe) auf 1m					
Ø 2004 - 2006	11.7	Ø 2009 - 2011	8.6	Ø 2014 - 2015	10.1

Tabelle 36: Dosis AOT40c in ppm*h. Quellen: European air quality database version 7, CLRTAP (2017)

Die ozonbedingten Ernteauffälle werden anhand des relativen Ernteertrages berechnet. Dieser entspricht dem Ernteertrag bei einer bestimmten Ozonbelastung relativ zum Ernteertrag an einem Standort ohne Belastung (gemessen anhand des AOT40c-Wertes). Die Formel lautet:

$$\text{Relativer Ernteertrag (in \%)} = 100 + m * \text{AOT40c.}$$

wobei m der nutzpflanzenspezifische, prozentuale Reduktion der Biomasse pro zusätzlicher Einheit ppm*h Ozonbelastung entspricht.

Dosis-Wirkungs-Relation (Steigung m) Reduktion des Ernteertrags pro zusätzlicher ppm*h Ozonbelastung			
Weizen	-1.61	Kartoffeln	-0.57
Gerste	-0.06	Raps	-0.56
Körnermais	-0.36	Sonnenblumen	-1.2
Zuckerrüben	-0.58	Frischgemüse allgemein	-0.95

Tabelle 37: Dosis-Wirkungs-Relationen (Steigung m) und Relative Ernteerträge

Anhand der Dosis-Wirkungs-Relationen für die verschiedenen Nutzpflanzen (Tabelle 37) sowie der Belastungswerte (Tabelle 36) lässt sich der relative Ernteertrag pro Nutzpflanzenart berechnen (Tabelle 38). Mittels der Ernteerträgen im Kanton Zürich (Tabelle 39), der Produzentenpreise²¹ sowie des Subventionsanteils²² lassen sich schliesslich die volkswirtschaftlich relevanten luftschadstoffbedingten Ernteschadenskosten bestimmen.

Für die beiden Städte werden keine Ernteschadenskosten berechnet.

²⁰ 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).

²¹ Die Produzentenpreise sind dem Agrarbericht des BLW 2016 entnommen.

²² Verwendet wird ein langjähriges Mittel. Gemäss OECD-Angaben lag der PSE (Producer support estimate) zwischen 2005 und 2012 durchschnittlich bei 58%.

Relativer Ernteertrag in %			
	2005	2010	2015
Weizen	78.3	84.8	83.7
Gerste	99.2	99.4	99.4
Körnermais	95.2	96.6	96.4
Zuckerrüben	92.2	94.5	94.1
Kartoffeln	92.3	94.6	94.2
Raps	92.5	94.7	94.3
Sonnenblumen	83.8	88.7	87.8
Frischgemüse allgemein	87.2	91.0	90.4

Tabelle 38: Relativer Ernteertrag in %.

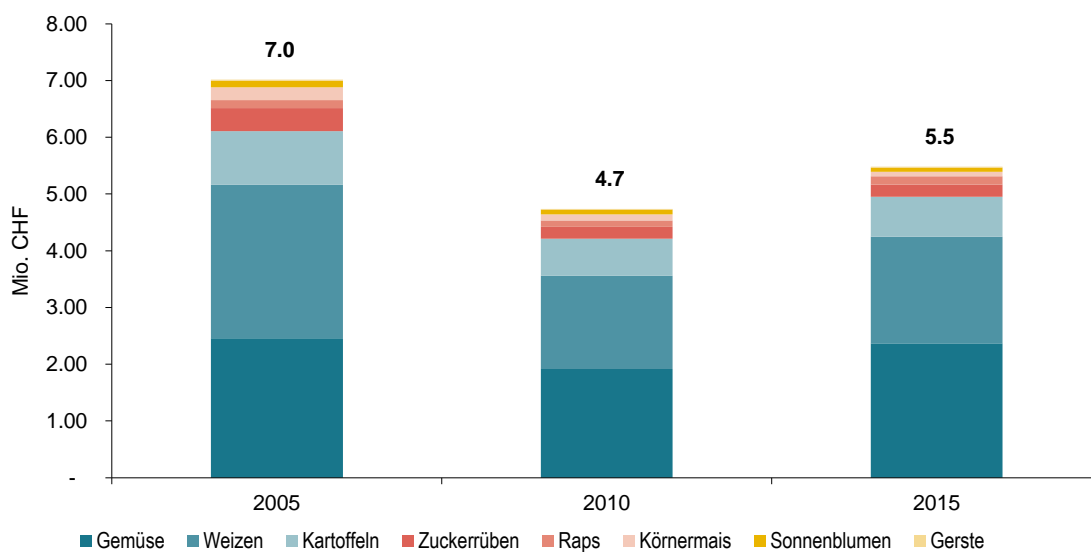
Ernteerträge in Kanton Zürich [t], anhand der Ernteflächen abgeleitet von den schweizweiten Erntemengen			
	2005	2010	2015
Weizen	55'000	53'000	52'000
Gerste	16'000	13'000	16'500
Körnermais	27'500	21'500	13'000
Zuckerrüben	114'500	112'000	116'000
Kartoffeln	74'500	66'500	59'500
Raps	6'000	6'500	8'000
Sonnenblumen	2'000	2'000	1'500
Gemüse	28'500	27'000	30'000

Tabelle 39: Ernteerträge in Kanton Zürich [t]. Quellen: BFS, Agrarbericht BLW (2015).

6.3 Ergebnisse

Die Ernteschadenskosten lagen im Kanton Zürich im Jahr 2005 bei rund 7.0 Mio. CHF. In den Jahren 2010 und 2015 lagen die Ernteschadenskosten jeweils bei 4.7 bzw. 5.5 Mio. CHF.

Luftschadstoffbedingte Ernteschadenskosten im Kanton Zürich [Mio. CHF]



econcept

Figur 19: Luftschadstoffbedingte Ernteschadenskosten im Kanton Zürich [Mio. CHF]

In Tabelle 40 finden sich die Zahlenwerte für die einzelnen Nutzpflanzen.

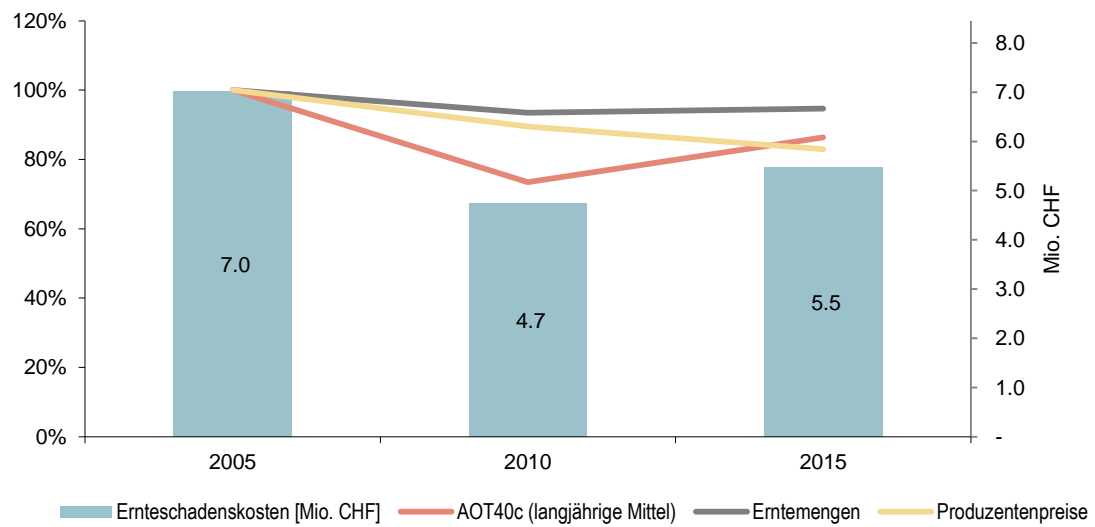
Ernteauschadenskosten im Kanton [Mio. CHF]			
	2005	2010	2015
Weizen	2.71	1.64	1.88
Gerste	0.02	0.01	0.01
Körnermais	0.22	0.11	0.08
Zuckerrüben	0.41	0.21	0.21
Kartoffeln	0.94	0.66	0.71
Raps	0.14	0.11	0.15
Sonnenblumen	0.12	0.09	0.07
Gemüse	2.46	1.91	2.37
Total	7.0	4.7	5.5

Tabelle 40: Ernteausfälle und subventionsbereinigte Ernteschadenskosten

6.4 Determinanten der Kostenentwicklung

Figur 20 zeigt, dass die Abnahme der Ernteschadenskosten auf die Abnahme des AOT40-Wertes und auf die Abnahme der Produzentenpreise zurückgeht, während die Erntemengen über die betrachteten Jahre ungefähr konstant geblieben sind.

Determinanten der Kostenentwicklung bei den Ernteschadenskosten



econcept

Figur 20: Determinanten der Kostenentwicklung bei den Ernteschadenskosten
Linke Skala: Determinanten der Biodiversitätsschadenskosten (Linien) in Prozent. Wert im Jahr 2005 = 100%.
Rechte Skala: Biodiversitätsschadenskosten in Mio. CHF (Säulen).

7 Gesamtkosten und Kostenentwicklung

7.1 Einordnung der Ergebnisse

Die im Folgenden dargestellten Gesamtergebnisse für die Kosten der Luftverschmutzung werden massgeblich geprägt durch die Gesundheitsschadenskosten. In den Gesamtkosten berücksichtigt werden konventionsgemäss die PM10-bedingten (und nicht die NO₂-bedingten) Gesundheitsschadenskosten. Jedoch verlieren die PM10-bedingten Gesundheitskosten als Indikator für die gesamten luftschadstoffbedingten Gesundheitskosten zunehmend an Aussagekraft, bedingt durch die divergierende Belastungsentwicklung von PM10 und NO₂.²³ Daher werden an dieser Stelle auch die NO₂-bedingten Gesundheitskosten nochmals aufgezeigt. Bei der Betrachtung von PM10- und NO₂-bedingten Gesundheitskosten ist weiter zu berücksichtigen, dass die Gesundheitswirkungen nicht vollständig voneinander abgegrenzt werden können. Bei einer Addition ergeben sich daher Doppelzählungen von bis zu einem Drittel (HRAPIE 2013).

7.2 Vergleich mit den Ergebnissen der Erhebung von 2013

Zwischen den Ergebnissen der letzten Analyse der Kosten der Luftverschmutzung (AWEL 2013) und den jetzigen zeigen sich deutliche Unterschiede, insbesondere bei den PM10-bedingten Gesundheitskosten und den Gebäudeschadenskosten.

Unterschiede in den PM10-bedingten²⁴ Gesundheitsschadenskosten

Das Niveau der mit dem Schadstoff PM10 ermittelten Gesundheitskosten liegt in der vorliegenden Studie aufgrund neuer, höherer Kostensätze, vor allem für Todesfälle, höher als noch in der Studie von 2013. Zudem hat sich der Trend der Kostenentwicklung von leicht steigenden Kosten zwischen 2000 – 2010 zu deutlich abnehmenden Kosten von 2005 – 2015 entwickelt. Dies hat folgende Gründe:

- Die Kostensätze weisen zwischen 2010 und 2015 meist keinen weiteren Anstieg auf oder fallen sogar leicht. Damit werden die abnehmenden Immissionen nicht mehr überkompensiert wie noch in der Studie von 2013.
- Die in AWEL (2013) zugrundeliegende Modellierung der PM10-Immissionen hat den Wert für 2010 aus heutiger Sicht etwas überschätzt.
- Die hier verwendeten, differenzierteren Klassen zur Belastung der Bevölkerung zeigen, dass die Belastungswerte für 2010 mit den damals verwendeten, breiteren Belastungsklassen im Mittel überschätzt wurden.

²³ Die PM10-Belastung konnte in der Vergangenheit deutlich gesenkt werden, während sich die Belastung mit dem ebenfalls schädlichen NO₂ nicht im gleichen Masse reduziert hat.

²⁴ NO₂-bedingte Gesundheitsschadenskosten wurden 2013 nicht ermittelt

- Die langsame Annäherung der mittleren Immissionen an den Referenzwert für die Gesundheitskosten von $7.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ führt zu einer überproportionalen Abnahme der Gesundheitskosten.

Unterschiede bei den Gebäudeschadenskosten

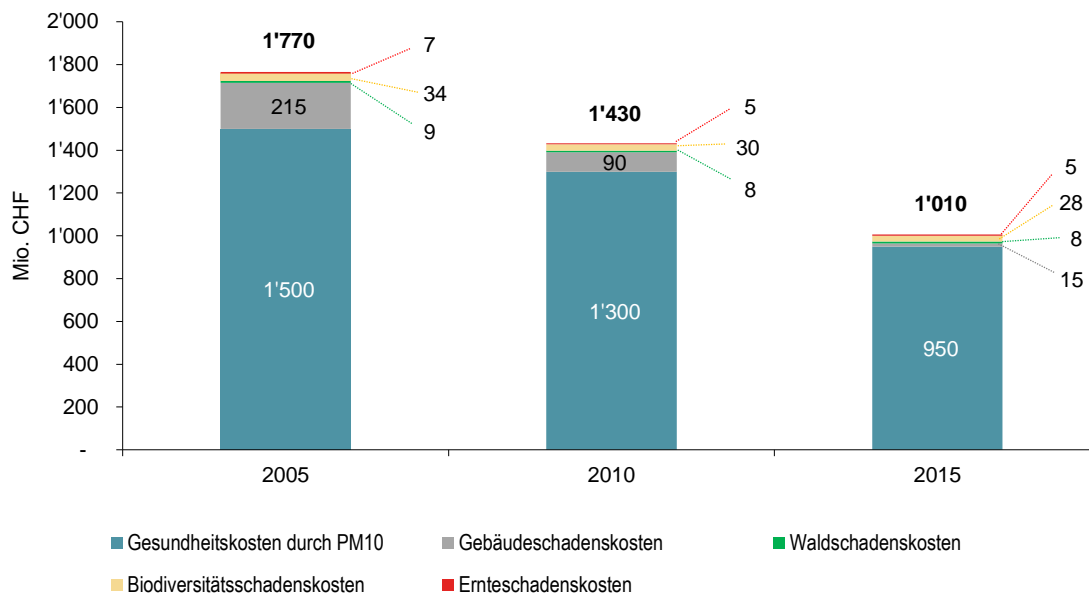
Die im Vergleich zu AWEL (2013) deutlich tieferen Gebäudeschadenskosten begründen sich darin, dass die in AWEL (2013) zugrundeliegende Modellierung der PM10-Immissionen den Wert für 2010 aus heutiger Sicht etwas überschätzt hat. Die durchschnittlichen PM10-Immissionen lagen im Jahr 2010 in allen Gemeindetypen rund $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ tiefer als in AWEL (2013) angenommen. Die deutliche Abnahme der Gebäudeschadenskosten zwischen 2005 und 2015 geht darauf zurück, dass vielerorts die Wirkungsschwelle von $15.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ unterschritten wird, wodurch keine luftschadstoffbedingten Gebäudeschadenskosten mehr ausgewiesen werden.

7.3 Ergebnisse

7.3.1 Gesamtkosten

Die Gesamtkosten der Luftverschmutzung werden den aktuellen Konventionen folgend unter Berücksichtigung der PM10-bedingten Gesundheitskosten sowie von Gebäude-, Wald-, Biodiversität- und Ernteschadenskosten ausgewiesen. Im Betrachtungszeitraum sind sie von rund 1.8 Mrd. CHF im Jahr 2005 auf rund 1 Mrd. CHF im Jahr 2015 gesunken. NO_2 -bedingte Gesundheitskosten sind nur so weit in diesen Schätzwerten enthalten, wie sie in der Schätzung der PM10-bedingten Gesundheitskosten miteingerechnet werden. Dabei ist maximal von einem Drittel Überschneidungen zwischen PM10- und NO_2 -bedingten Gesundheitswirkungen auszugehen.

Kosten der Luftverschmutzung im Kanton Zürich

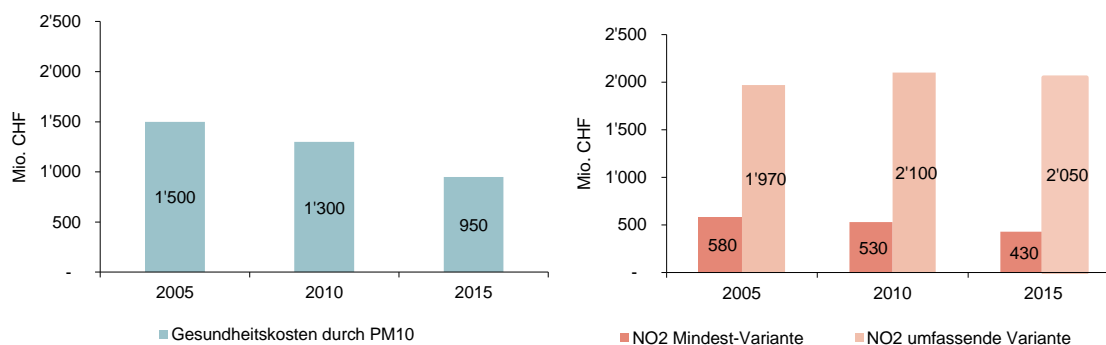


econcept

Figur 21: Kosten der Luftverschmutzung im Kanton Zürich unter Berücksichtigung der PM10-bedingten Gesundheitsschadenskosten. Ergebnisse gerundet.

Während die PM10-Belastung zwischen 2005 und 2015 deutlich gesenkt werden konnte, ist bei der NO₂-Belastung nur ein geringer Rückgang zu verzeichnen. Die unterschiedliche Belastungsentwicklung führt auch zu unterschiedlichen Kostenentwicklungen: Sofern bei der Schätzung der NO₂-bedingten Kosten das gesamte Belastungsspektrum berücksichtigt wird (umfassende Variante), führen das Bevölkerungswachstum und der Anstieg der Kostensätze trotz leichtem Belastungsrückgang zu gleichbleibend hohen NO₂-bedingten Gesundheitsschadenskosten, die mit rund 2 Mrd. deutlich über den PM10-bedingten Gesundheitskosten liegen (Figur 22). Die Mindestwerte der NO₂-bedingten Gesundheitskosten sind zwischen 2005 und 2015 rückläufig, was jedoch methodisch bedingt ist (siehe Kapitel 7.3.2).

Gesundheitsschadenskosten durch PM10 und NO₂



econcept

Figur 22: Gesundheitsschadenskosten durch PM10 und NO₂. Ergebnisse auf 10 Mio. CHF gerundet.
 NO₂-Mindest-Variante: Erhöhte Mortalität berücksichtigt ab 20 µg/m³, Referenzwert 20 µg/m³.
 NO₂ umfassende Variante: Erhöhte Mortalität berücksichtigt ab 5 µg/m³, Referenzwert 5 µg/m³

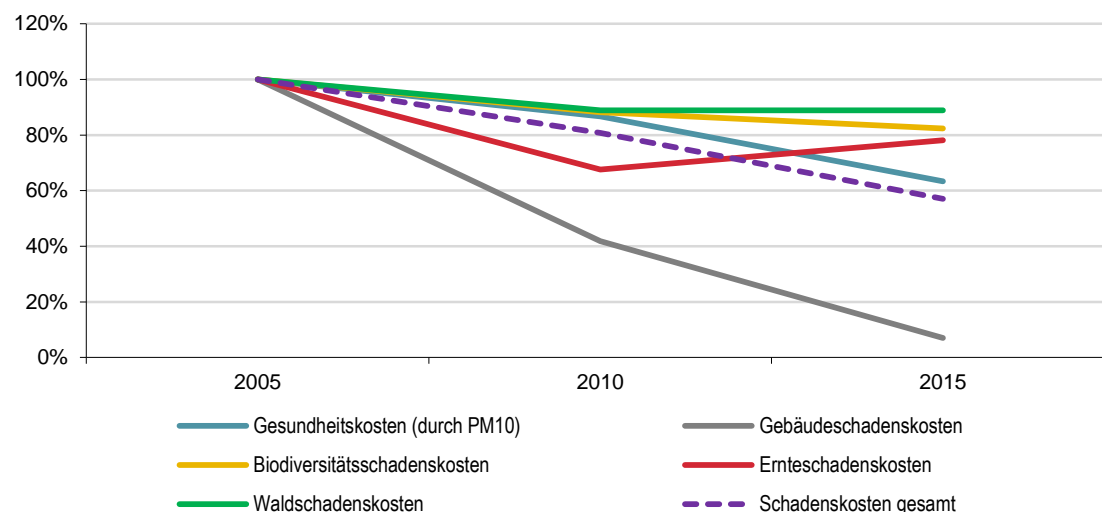
An dieser Stelle sei nochmals erwähnt, dass PM10- und NO₂-bedingte Gesundheitsschadenskosten nicht addiert werden dürfen, da sich dabei Doppelzählungen von bis zu einem Drittel ergeben können.

7.3.2 Kostenentwicklung

Figur 23 zeigt die Entwicklung der Kosten der Luftverschmutzung insgesamt und in den einzelnen Bereichen. Die Entwicklung der Gesamtschadenskosten wird entscheidend durch die Entwicklung der Gesundheitsschadenskosten geprägt. Da konventionsgemäss die PM10-bedingten Gesundheitsschadenskosten einfließen, zeigt sich auch bei den Gesamtkosten eine deutliche Abnahme (-43% zwischen 2005 und 2015).

Ebenfalls relevant für die Gesamtkosten ist der massive Rückgang der Gebäudeschadenskosten (-92% zwischen 2005 und 2015). Wie in Kapitel 3 bereits beschrieben, ist dieser darauf zurückzuführen, dass sich die Feinstaubbelastung im Jahr 2015 vielerorts dem für Gebäude kritischen Wert («critical value») angenähert oder diesen sogar unterschritten hat. Wie ebenfalls in Kapitel 3 erwähnt ist ein im Verhältnis zur Immissionsentwicklung so stark überproportionaler Rückgang der Kosten zu hinterfragen. Sollen die Gebäudeschadenskosten auch zukünftig erhoben werden, drängt sich aus unserer Sicht eine neuerliche Überprüfung der Dosis-Wirkungs-Relation auf.

Kostenentwicklung insgesamt und in den einzelnen Bereichen

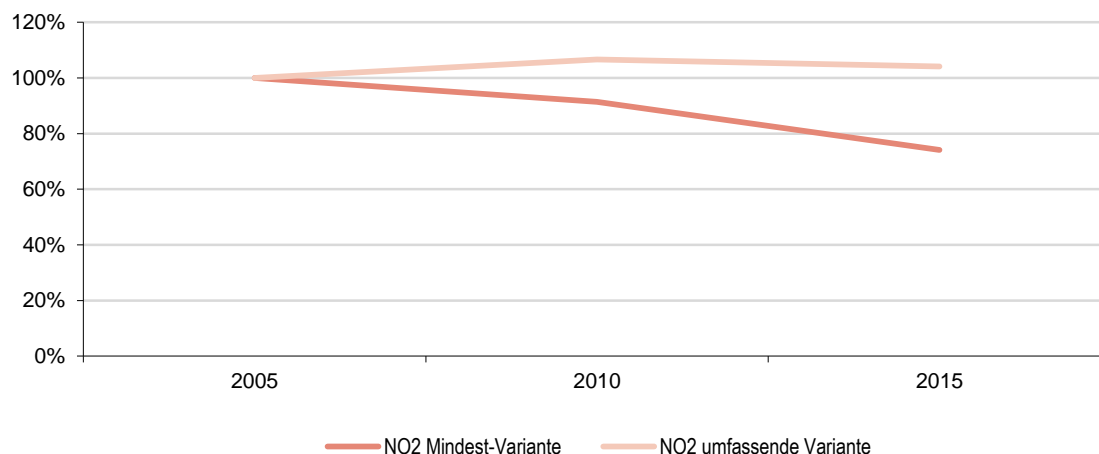


econcept

Figur 23: Kostenentwicklung insgesamt und in den einzelnen Bereichen

Im Gegensatz zu den PM10-bedingten Gesundheitskosten sind die NO₂-bedingten Gesundheitskosten nicht so stark zurückgegangen: Die Mindest-Variante verzeichnet zwischen 2005 und 2015 einen Kostenrückgang um 26%, dies jedoch bedingt durch die vollständige Vernachlässigung der Belastungen von unter 20 µg/m³. Bei der umfassenden Variante, welche alle Belastungen schon ab 5 µg/m³ berücksichtigt, zeigt sich daher im gleichen Zeitraum ein Anstieg um 6%.

Entwicklung der NO₂-bedingte Gesundheitsschadenskosten



econcept

Figur 24: Entwicklung NO₂-bedingte Gesundheitsschadenskosten
 Mindest-Variante: Erhöhte Mortalität berücksichtigt ab 20 µg/m³, Referenzwert 20 µg/m³.
 Umfassende Variante: Erhöhte Mortalität berücksichtigt ab 5 µg/m³, Referenzwert 5 µg/m³.

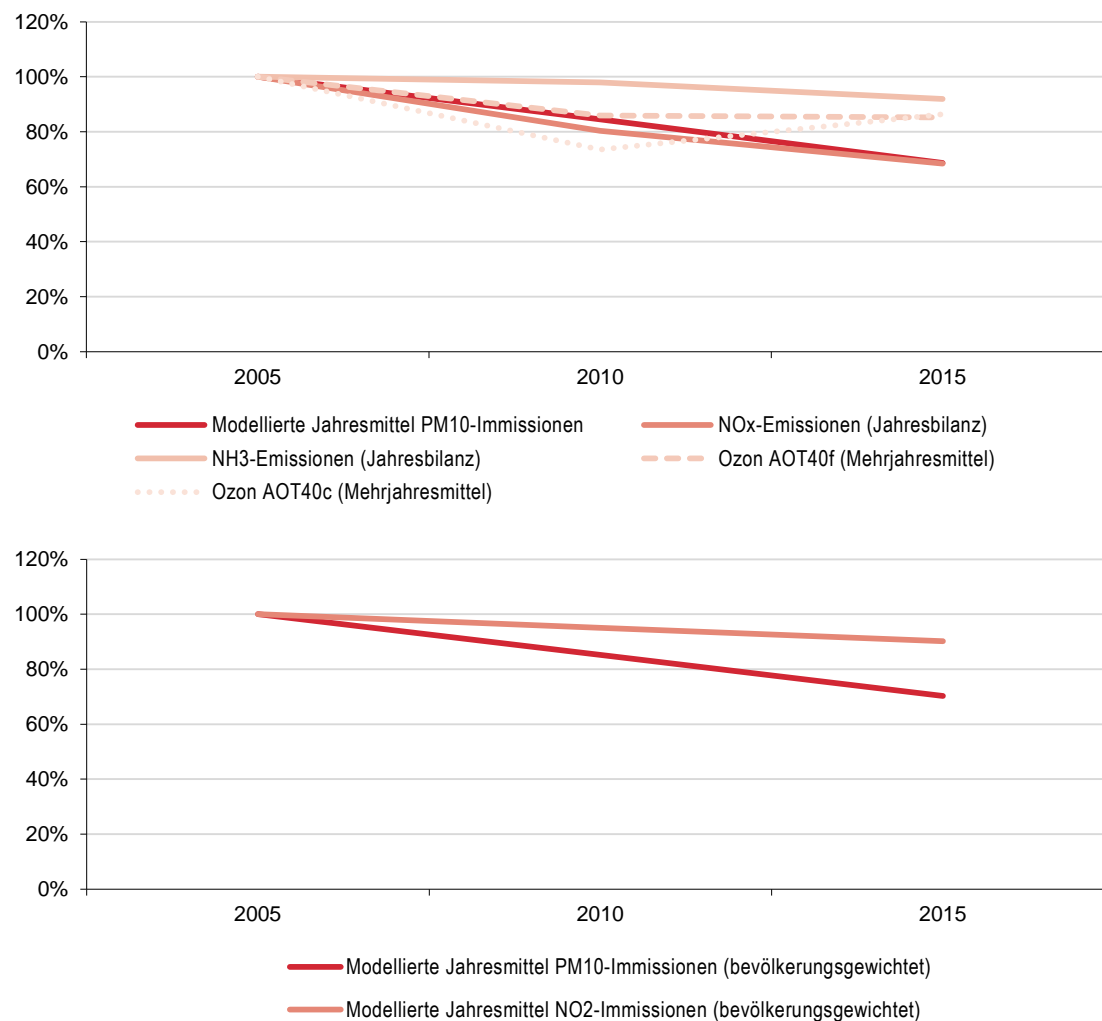
Der grosse Unterschied zwischen den Ergebnissen für die PM₁₀- und NO₂-bedingten Gesundheitsschadenskosten ist in der unterschiedlichen Belastungsentwicklung begründet: Zwar ist die NO₂-Belastung ebenso wie die PM₁₀-Belastung zwischen 2005 und 2015 zurückgegangen, jedoch in geringerer Masse. Bei der umfassenden Variante reicht deswegen der Rückgang der NO₂-Belastung nicht aus, um die kostensteigernde Wirkung des Bevölkerungswachstums und die Zunahme der Kostensätze auszugleichen. Der Mindest-Wert sinkt hingegen, da für dessen Berechnung nur Expositionen über 20 µg/m³ berücksichtigt werden, welche überdurchschnittlich abgenommen haben.

7.3.3 Determinanten der Kostenentwicklung

Schadstoffbelastung

Figur 25 zeigt, dass zwischen 2005 und 2015 sowohl die ungewichtete als auch die für die Analyse der Gesundheitsschadenskosten benötigte bevölkerungsgewichtete Feinstaubbelastung deutlich zurückgegangen sind. Die Reduktion der Feinstaubbelastung ist für den überaus deutlichen Rückgang der Gebäudeschadenskosten und auch für die Senkung der PM₁₀-bedingten Gesundheitsschadenskosten verantwortlich.

Determinanten der Kostenentwicklung: Schadstoffbelastung



econcept

Figur 25: Determinanten der Kostenentwicklung: Schadstoffbelastung

Im Gebäudebereich ist bzw. war Feinstaub tatsächlich auch der hauptsächliche Verursacher von Schäden. Im Gesundheitsbereich hingegen wirken sich neben Feinstaub auch verschiedene andere Stoffe schädlich aus, insbesondere NO_2 .

Die bevölkerungsgewichtete NO_2 -Belastung ist weniger stark gesunken als die PM10-Belastung, weswegen die NO_2 -bedingten Gesundheitskosten zwischen 2005 und 2010 bedingt durch die Bevölkerungsentwicklung gestiegen sind, zumindest bei der umfassenden Variante. Der mit der Mindest-Variante geschätzte Wert ist hingegen gesunken, da für diesen nur Expositionen über $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ berücksichtigt werden, welche zwischen 2005 und 2015 stärker zurückgegangen sind als Expositionen unter $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

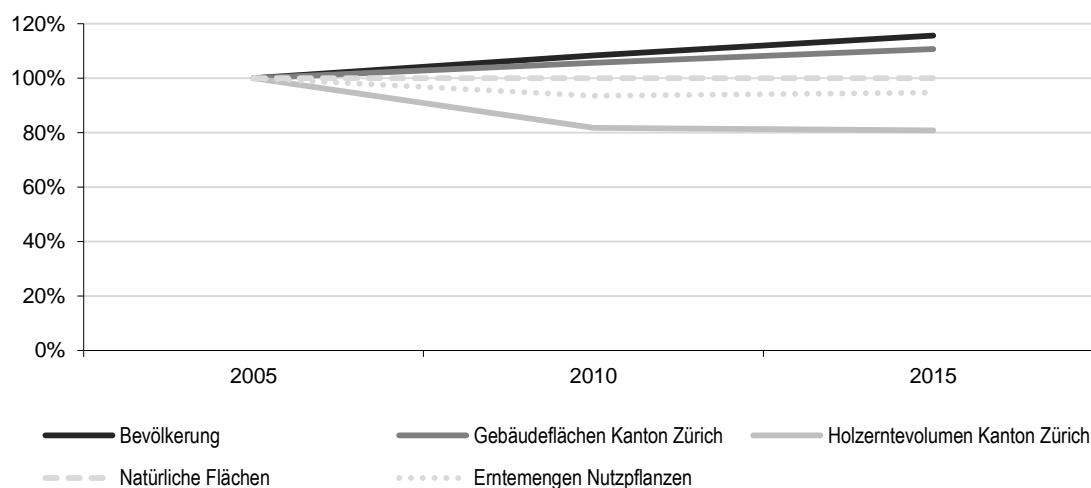
Auch die für Eutrophierung und Bodenversauerung mitverantwortliche Ammoniakbelastung ist zurückgegangen, was zu einer Reduktion der Biodiversitätsschadenskosten ge-

führt hat.²⁵ Gesunken ist auch die Ozonbelastung, wobei diese witterungsbedingt stärker schwankt als die Belastungen durch die übrigen Schadstoffe.

Potentiell betroffene Personen, Gebäude, Flächen und Erntevolumen

Bevölkerung und Fassadenflächen haben im Kanton Zürich zwischen 2005 und 2015 zugenommen, womit auch das Schadenspotential bei Gesundheit und Gebäuden gestiegen ist.

Potentiell betroffene Personen, Gebäude, Flächen und Erntevolumen



econcept

Figur 26: Determinanten der Kostentwicklung: Potentiell betroffene Personen, Gebäude, Flächen und Erntevolumen

Die potentiell durch Schäden betroffenen natürlichen Flächen sind konstant geblieben. Holz- und Nutzpflanzenerntevolumen sind gesunken, was nebst der Reduktion der Ammoniak, Stickstoff- und Ozonimmissionen den Rückgang der Wald- und Ernteschadenskosten begünstigt hat.

Kostensätze

Die für die Bewertung der Schäden verwendeten Preise und Kostensätze sind grösstenteils zwischen 2005 und 2015 gestiegen. Ganz leicht gesunken sind lediglich die medizinischen Behandlungskosten sowie die den Produzenten vergüteten Preise für Nutzpflanzen. Insgesamt ist jedoch festzustellen, dass die Preis- und Kostensatzveränderungen eher kostentreibend gewirkt haben.

²⁵ Bei den Waldschadenskosten geht die aktuelle Ammoniakbelastung nicht in die Berechnung ein. Hingegen wird die bestehende Bodenversauerung verwendet, welche sich nur langsam verändert und nur in grossen zeitlichen Abständen erhoben wird.

Determinanten der Kostenentwicklung



econcept

Figur 27: Determinanten der Kostenentwicklung: Kostensätze

8 Volkswirtschaftlicher Nutzen der Verbesserung der Luftqualität

Der durch die Verbesserung der Luftqualität bedingte Rückgang der Kosten der Luftverschmutzung stiftet Nutzen. Dieser kann beziffert werden, indem berechnet wird, wie hoch die Kosten bei gleichbleibend hohem Belastungsniveau gewesen wären. Die Differenz zwischen den Kosten mit gleichbleibend hohem Belastungsniveau und mit dem tatsächlichen, sinkenden Belastungsniveau ergibt den Nutzen der Verbesserung der Luftqualität.

Betrachtet werden hier nur die Gesundheitskosten. Auf den Einbezug der übrigen Schadensbereiche verzichten wir aus den folgenden Gründen:

- *Gebäudeschadenskosten:* Der im Verhältnis zur massgeblichen Belastungsreduktion stark überproportionale Rückgang der Gebäudeschadenskosten lässt Zweifel an der Verlässlichkeit der Ergebnisse aufkommen (siehe Kapitel 3.5). Daher wird darauf verzichtet, den aus diesem Rückgang assoziierten Nutzen zu beziffern.
- *Wald- und Ernteschadenskosten:* Für die Veränderung dieser luftschadstoffbedingten Kosten ist zum einen der Anteil versauerter Waldböden, zum anderen die Ozonbelastung ausschlaggebend. Der Anteil versauerter Waldböden verändert sich nur langsam und wird nur unregelmässig und mit grossen zeitlichen Abständen erhoben, weswegen in allen drei Erhebungsjahren derselbe Wert in die Berechnungen eingeht. Die Ozonbelastung hingegen ist stark witterungsabhängig, weswegen wir auf die Berechnung eines auf diesen Rückgang zurückgehenden Nutzens verzichten. Aufgrund der untergeordneten Bedeutung der Wald- und Ernteschadenskosten hat die Nichtberücksichtigung bei der Nutzenberechnung auf das Gesamtergebnis jedoch so gut wie keinen Einfluss.
- *Biodiversitätsschadenskosten:* Der durch vermiedene Biodiversitätsschadenskosten generierte Nutzen liegt im Kanton Zürich bei rund 5 Mio. CHF im Jahr 2010 und bei rund 7 Mio. CHF im Jahr 2015 (Referenzjahr 2005). Diese Beträge sind in Anbetracht der Höhe der vermiedenen Gesundheitsschadenskosten nur in geringem Masse ergebnisrelevant und werden daher im Weiteren nicht mit ausgewiesen.

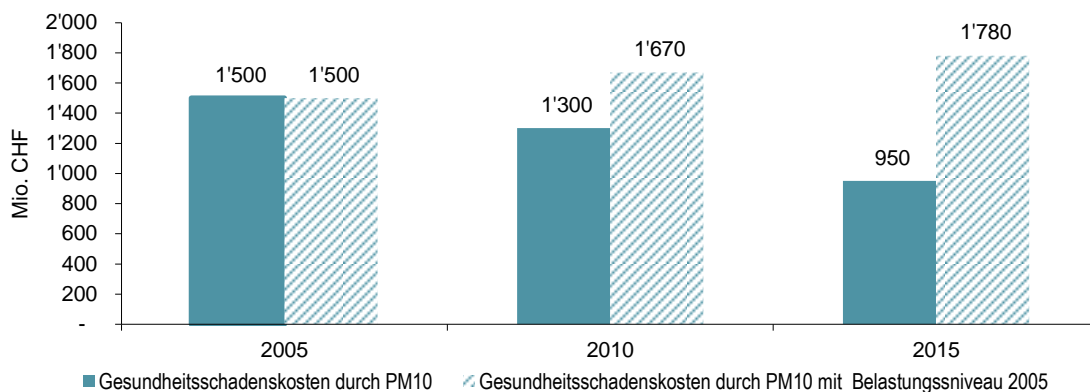
In Zusammenhang mit den Gesundheitskosten ist die Verbesserung der Luftqualität sowohl bzgl. Feinstaub und als auch bzgl. Stickoxiden relevant. Die sich daraus ergebenden Nutzen werden im Folgenden separat ausgewiesen, dürfen jedoch nicht addiert werden, da dies zu Doppelzählungen führt.

Figur 28 zeigt die im jeweiligen Jahr berechneten PM10-bedingten Gesundheitsschadenskosten im Kanton Zürich sowie deren Höhe mit dem Belastungsniveau von 2005 (Referenzjahr). Die Differenz ergibt die vermiedenen Schadenskosten und damit den Nutzen der Senkung der PM10-Belastung. Der Rückgang der PM10-Belastung²⁶ von 21 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ im Jahr 2005 auf 18 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ im Jahr 2010 und auf 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ im Jahr 2015 bewirkt

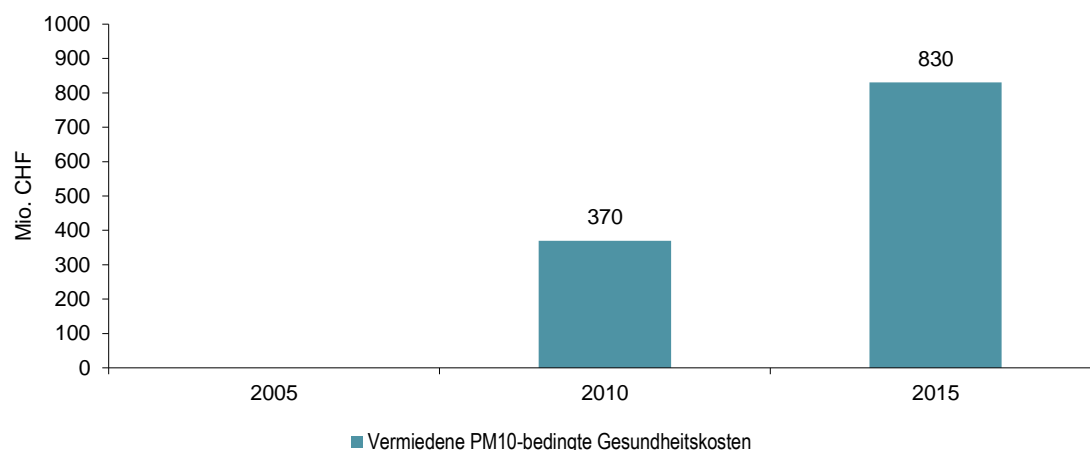
²⁶ modellierte Jahresmittel NO₂-Immissionen bevölkerungsgewichtet

somit schätzungsweise einen Nutzen von rund 370 Mio. CHF im Jahr 2010 und 830 Mio. CHF im Jahr 2015.

Gesundheitsschadenskosten mit und ohne Senkung der PM10-Belastung



Vermiedene PM10-bedingte Gesundheitskosten



econcept

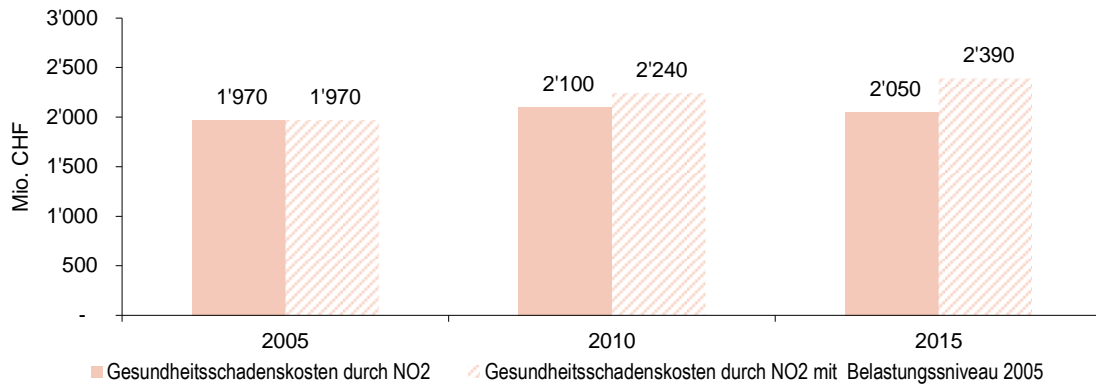
Figur 28: PM10-bedingte Gesundheitsschadenskosten mit und ohne Senkung der PM10-Belastung und der resultierende Nutzen in Kanton Zürich mit Referenzjahr 2005

Während in Figur 28 die PM10-basierten Gesundheitsschadenskosten verwendet werden, fliessen in Figur 29 die NO₂-basierten Gesundheitsschadenskosten ein.

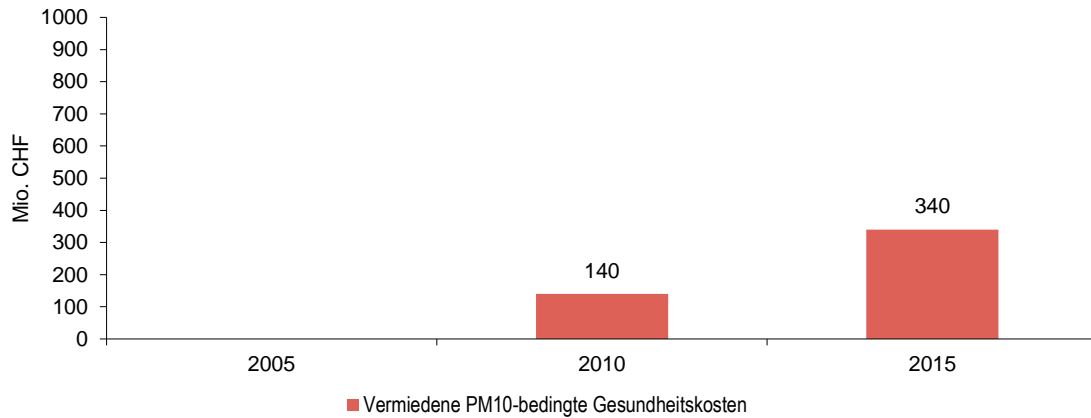
Wir gehen davon aus, dass mit der NO₂-Mindest-Variante der mit dem Rückgang der NO₂-Belastung assoziierte Nutzen überschätzt wird. Um nicht einen zu hohen Nutzen auszuweisen, verwenden wir deswegen hier die mit der umfassenden Variante ermittelten Werte. Der Rückgang der NO₂-Belastung²⁷ von 24 µg/m³ im Jahr 2005 auf 23 µg/m³ im Jahr 2010 und auf 22 µg/m³ im Jahr 2015 bewirkt somit schätzungsweise einen Nutzen von rund 140 Mio. CHF im Jahr 2010 und 340 Mio. CHF im Jahr 2015.

²⁷ modellierte Jahresmittel NO₂-Immissionen bevölkerungsgewichtet

Gesundheitsschadenskosten mit und ohne Senkung der NO₂-Belastung



Vermiedene NO₂-bedingte Gesundheitsschadenskosten



econcept

Figur 29: NO₂-bedingte Gesundheitsschadenskosten (umfassende Variante) mit und ohne Senkung der NO₂-Belastung sowie der resultierende Nutzen im Kanton Zürich (Referenzjahr 2005).

9 Aufteilung auf die Verursachergruppen

9.1 Vorgehen

Den geltenden Konventionen folgend werden die Gesamtkosten der Luftverschmutzung unter Berücksichtigung der PM10-bedingten Gesundheitsschadenskosten (und nicht der NO₂-bedingten Gesundheitskosten) auf die Verursachergruppen aufgeteilt. Auf die *Anteile* der Verursachergruppen an den Gesamtkosten hat dies allerdings keinen Einfluss, da der Verteilschlüssel in beiden Fällen derselbe ist. Unterschiede bestehen hingegen im Niveau der Gesamtkosten und damit auch in den pro Verursachergruppe ausgewiesenen Frankenbeträgen: Diese lägen für alle Verursachergruppen höher, wenn NO₂-bedingte Gesundheitskosten verwendet worden wären.

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. In den Bereichen Gebäude und Biodiversität sowie bei den ozonbedingten Wald- und Ernteschadenskosten gehen die schadensverursachenden Stoffe direkt in die Berechnungen ein, so dass die jeweiligen Anteile der Schadstoffe an den Kosten direkt aus den Ergebnissen ableitbar sind. Im Gesundheitsbereich erfolgt die Aufteilung anhand eines Verteilschlüssels, welcher auf Basis der im NEEDS-Projekt berechneten Kostensätze (siehe Anhang A-5) der einzelnen Schadstoffe sowie anhand der Emissionsmenge pro Schadstoff (OSTLUFT 2013) gebildet wurde, womit die anhand des Leitschadstoffes PM10 berechneten Gesundheitskosten auf die Schadstoffe PM10, NO_x, NH₃ und NMVOC aufgeteilt werden. Die durch Bodenversauerung bedingten Waldschäden schliesslich werden jeweils zur Hälfte den Schadstoffen NO_x und NH₃ zugewiesen, da die Grundlagen für einen differenzierteren Verteilschlüssel fehlen.
- 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.

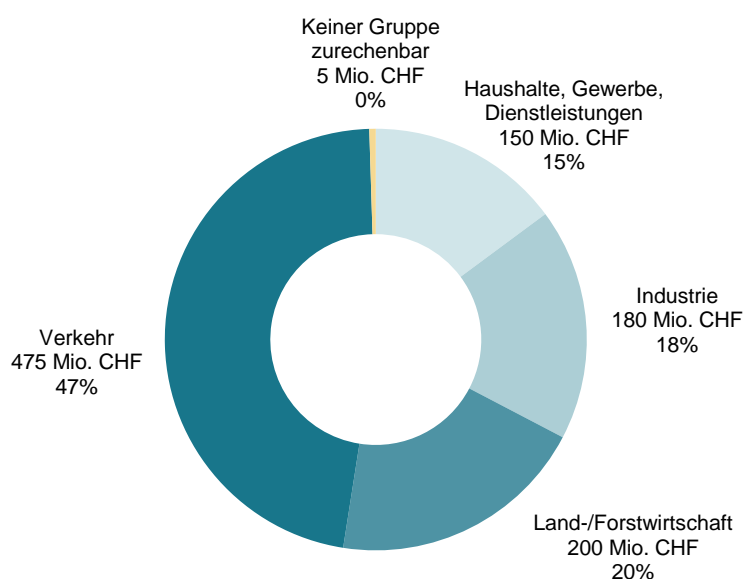
9.2 Ergebnisse

Ausgehend von den Kostenanteilen der einzelnen Schadstoffe können die Kosten der Luftverschmutzung den Verursachergruppen zugeteilt werden (Figur 30 und Tabelle 41). Den grössten Anteil an den luftschadstoffbedingten Gesamtkosten im Kanton Zürich hat in allen Erhebungsjahren der Verkehr, bedingt durch seine hohen Anteile an den kantonalen PM10- und NO_x-Emissionen (siehe Anhang A-5.2). Unter Berücksichtigung der PM10-beindgten Gesundheitskosten verursacht er im Jahr 2015 luftschadstoffbedingte Kosten von rund 475 Mio. CHF. Dies entspricht 47% der Gesamtschadenskosten. Innerhalb der Gruppe Verkehr ist der Strassenverkehr der weitaus grösste Emittent. Ebenfalls

relevant ist der Luftverkehr, Schienen- und Schiffsverkehr sind für die Luftverschmutzung hingegen von untergeordneter Bedeutung (siehe Anhang A-5.2).

Die übrigen Verursachergruppen sind in geringerem, aber immer noch relevantem Ausmass für luftschadstoffbedingte Kosten verantwortlich: Im Jahr 2015 sind rund 200 Mio. CHF der Gruppe «Land-/Waldwirtschaft» zuzurechnen, 180 Mio. CHF der Gruppe «Industrie und rund 150 Mio. CHF der Gruppe «Haushalte, Gewerbe, Dienstleistungen». Innerhalb dieser Gruppen sind Feuerungen, Baumaschinen, landwirtschaftliche Fahrzeuge sowie industrielle und gewerbliche Prozesse die relevantesten Emittenten (siehe Anhang A-5.2).

Aufteilung auf die Verursachergruppen im Kanton Zürich 2015



econcept

Figur 30: Aufteilung der Kosten der Luftverschmutzung auf die Verursachergruppen im Kanton Zürich im Jahr 2015. Ergebnisse gerundet. Die Frankenbeträge gelten unter Einbezug der PM10-bedingten Gesundheitsschadenskosten.

Anteile der Verursachergruppen an den Kosten der Luftverschmutzung im Kanton Zürich 2005 - 2015			
	2005	2010	2015
Haushalte, Gewerbe, Dienstleistungen	14%	15%	15%
Industrie	18%	18%	18%
Land-/Forstwirtschaft	16%	18%	20%
Verkehr	51%	48%	47%
Keiner Gruppe zurechenbar	1%	0%	1%
Total	100%	100%	100%

Tabelle 41: Anteile der Verursachergruppen an den Kosten der Luftverschmutzung im Kanton Zürich 2005 bis 2015

Anhang

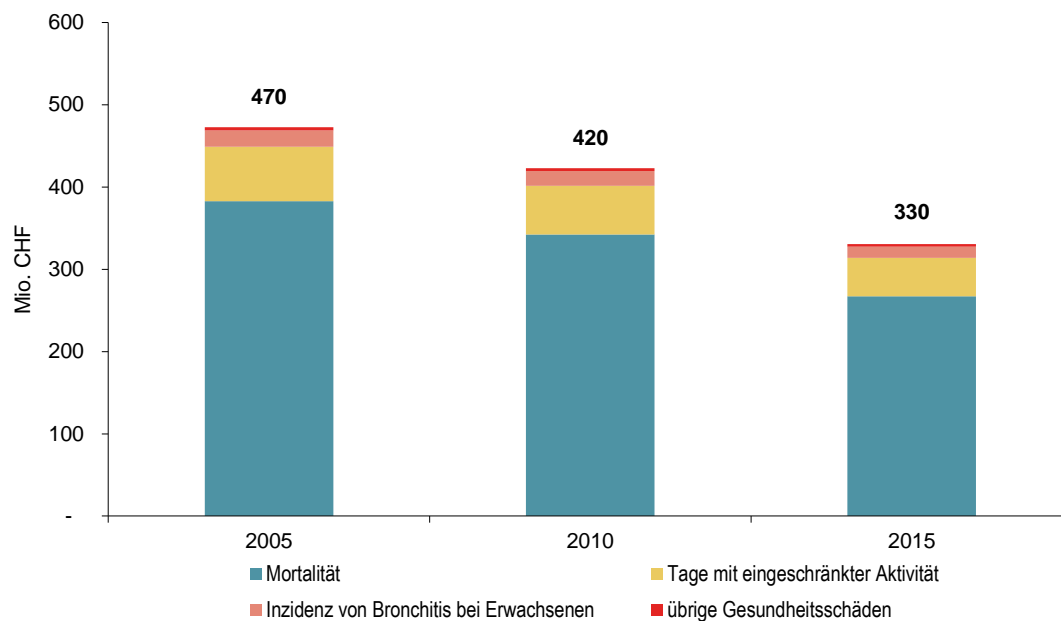
A-1 Ergebnisse Stadt Zürich

A-1.1 PM10-bedingte Gesundheitsschadenskosten

Geschätzte Krankheits- und Todesfälle aufgrund der PM10-Belastung in der Stadt Zürich im Jahr 2015	
Mortalität Erwachsene (Todesfälle)	120
Säuglingssterblichkeit (Todesfälle)	1
Spitaleintritte wegen Atemwegserkrankungen	45
Spitaleintritte wegen Herz/Kreislaufferkrankungen	45
Inzidenz (Neuaufreten) chronische Bronchitis bei Erwachsenen	120
Prävalenz von Bronchitis bei Kindern (Fälle)	680
Tage mit Asthmasymptomen bei Erwachsenen	1'750
Tage mit Asthmasymptomen bei Kindern	30'960
Tage mit eingeschränkter Aktivität	184'790

Tabelle 42: Geschätzte jährliche Anzahl Krankheits- und Todesfälle aufgrund der PM10-Belastung (pro Jahr). Ergebnisse gerundet.

PM10-bedingte Gesundheitskosten in der Stadt Zürich



Figur 31: PM10-bedingte Gesundheitskosten in der Stadt Zürich. Ergebnisse auf 10 Mio. Ergebnisse gerundet.

Luftschadstoffbedingte Gesundheitsschadenskosten in der Stadt Zürich [Mio. CHF]			
	2005	2010	2015
Mortalität	380	340	270
Verlorenes Lebensjahr	380	340	270
Verlorenes Erwerbsjahr	2.6	2.4	2.0
Wiederbesetzungskosten	0.7	0.6	0.5
Spitaleintritte wegen Atemwegserkrankungen	0.1	0.1	0.1
Spitaleintritte wg. Herz/Kreislaufkrankungen bei Erwachsenen	0.2	0.1	0.1
Inzidenz von Bronchitis bei Erwachsenen	20	20	15
Prävalenz von Bronchitis bei Kindern	0.3	0.3	0.2
Tage mit Asthmasymptomen bei Erwachsenen	0.2	0.2	0.2
Tage mit Asthmasymptomen bei Kindern	3.3	2.9	2.3
Tage mit eingeschränkter Aktivität	65	60	45
Total	470	420	330

Tabelle 43: Luftschadstoffbedingte Gesundheitsschadenskosten in der Stadt Zürich. Ergebnisse gerundet.

A-1.2 NO₂-bedingte Gesundheitsschadenskosten

Geschätzte Anzahl Krankheits- und Todesfälle aufgrund der NO ₂ -Belastung in der Stadt Zürich				
	2005	2010	2015	
Mindest-Variante	Mortalität Erwachsene (Todesfälle)	170	160	130
	Spitaleintritte wegen Atemwegserkrankungen	140	150	140
Umfassende Variante	Mortalität Erwachsene (Todesfälle)	350	360	350
	Spitaleintritte wegen Atemwegserkrankungen	140	150	140

Tabelle 44: Geschätzte jährliche Anzahl Krankheits- und Todesfälle aufgrund der NO₂-Belastung. Ergebnisse gerundet.

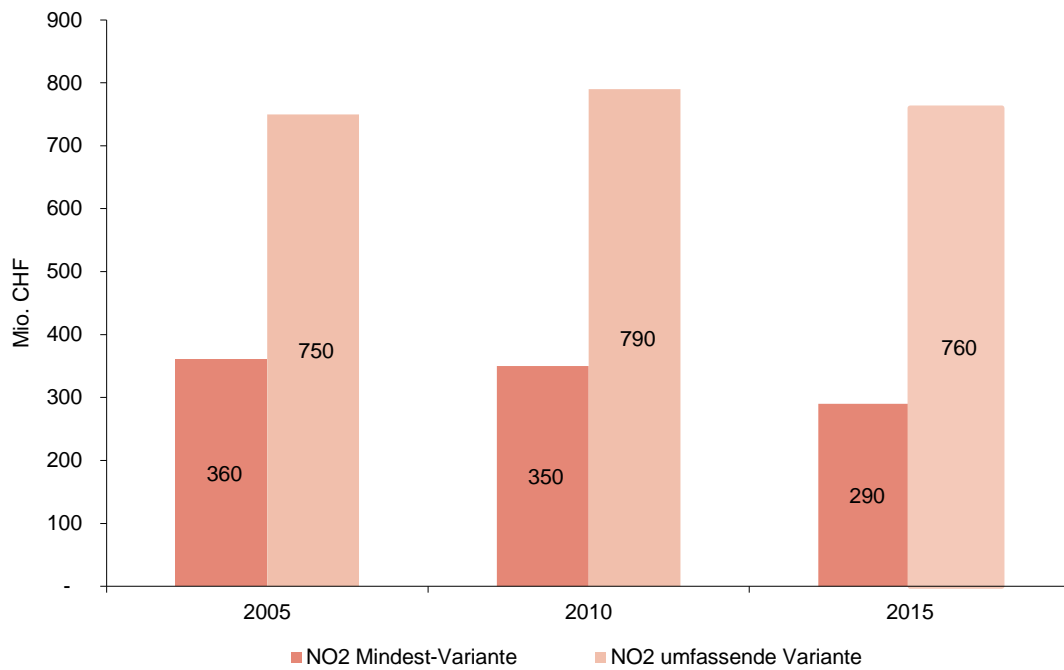
NO ₂ -bedingte Gesundheitsschadenskosten in der Stadt Zürich[Mio. CHF]				
	2005	2010	2015	
Mindest-Werte	Spitaleintritte wegen Atemwegserkrankungen (alle Alter)	0.3	0.3	0.3
	Mortalität insgesamt	360	350	290
	Verlorenes Lebensjahr	360	350	290
	Verlorenes Erwerbsjahr	2.5	2.5	2.2
	Wiederbesetzungskosten	0.6	0.6	0.6
	NO₂-bedingte Gesundheitsschadenskosten	360	350	290
Umfassende Werte	Spitaleintritte wegen Atemwegserkrankungen (alle Alter)	0.3	0.3	0.3
	Mortalität insgesamt	750	790	760
	Verlorenes Lebensjahr	750	790	750
	Verlorenes Erwerbsjahr	5.3	5.7	5.8
	Wiederbesetzungskosten	1.3	1.5	1.5
	NO₂-bedingte Gesundheitsschadenskosten	750	790	760

Tabelle 45: NO₂-bedingte Gesundheitsschadenskosten in der Stadt Zürich. Ergebnisse gerundet.

Mindest-Variante: Erhöhte Mortalität berücksichtigt ab 20 µg/m³, Referenzwert 20 µg/m³.

Umfassende Variante: Erhöhte Mortalität berücksichtigt ab 5 µg/m³, Referenzwert 5 µg/m³.

NO₂-bedingte Gesundheitskosten in der Stadt Zürich



econcept

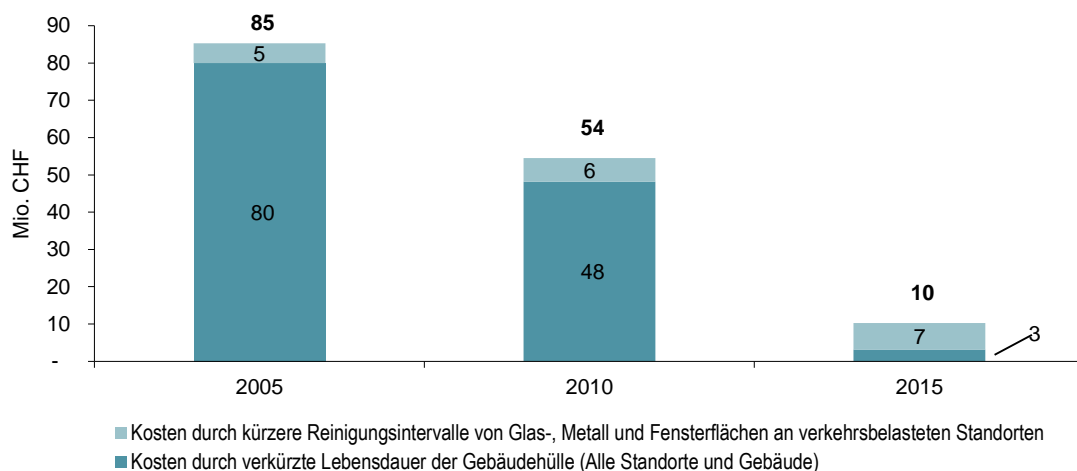
Figur 32: NO₂-bedingte Gesundheitsschadenskosten in der Stadt Zürich. Ergebnisse auf 10 Mio. CHF gerundet.

Mindest-Variante: Erhöhte Mortalität berücksichtigt ab 20 µg/m³, Referenzwert 20 µg/m³.

Umfassende Variante: Erhöhte Mortalität berücksichtigt ab 5 µg/m³, Referenzwert 5 µg/m³.

A-1.3 Gebäudeschadenskosten

Luftschadstoffbedingte Gebäudeschadenskosten in der Stadt Zürich



econcept

Figur 33: Luftschadstoffbedingte Gebäudeschadenskosten in der Stadt Zürich

A-1.4 Waldschadenskosten

Waldschadenskosten in der Stadt Zürich [Mio. CHF]			
	2005	2010	2015
Ernteaufälle durch Ozon	0.10	0.09	0.08
Ernteaufälle durch Bodenversauerung	0.24	0.23	0.21
Windwurfisiko durch Bodenversauerung	0.06	0.05	0.06
Total	0.39	0.37	0.35

Tabelle 46: Waldschadenskosten in der Stadt Zürich [Mio. CHF]

A-1.5 Biodiversitätsschadenskosten

Biodiversitätsschadenskosten in der Stadt Zürich [Mio. CHF]			
	2005	2010	2015
NO _x	0.7	0.6	0.5
NH ₃	0.6	0.6	0.6
Total	1.3	1.2	1.1

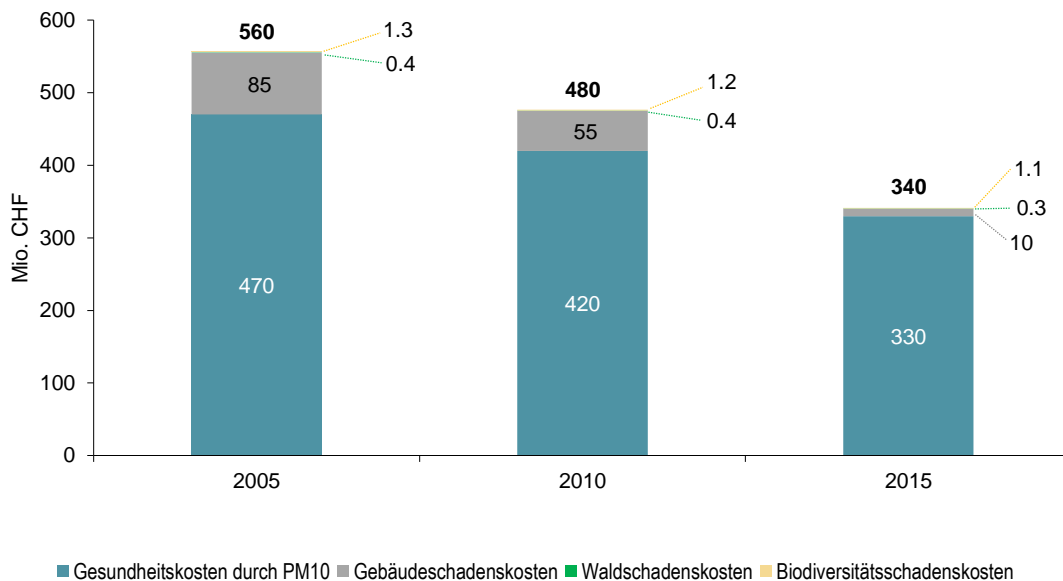
Tabelle 47: Biodiversitätsschadenskosten in der Stadt Zürich [Mio. CHF]

A-1.6 Ernteaufälle

Für die Städte Zürich und Winterthur wurden keine Ernteschadenskosten berechnet.

A-1.7 Gesamtkosten

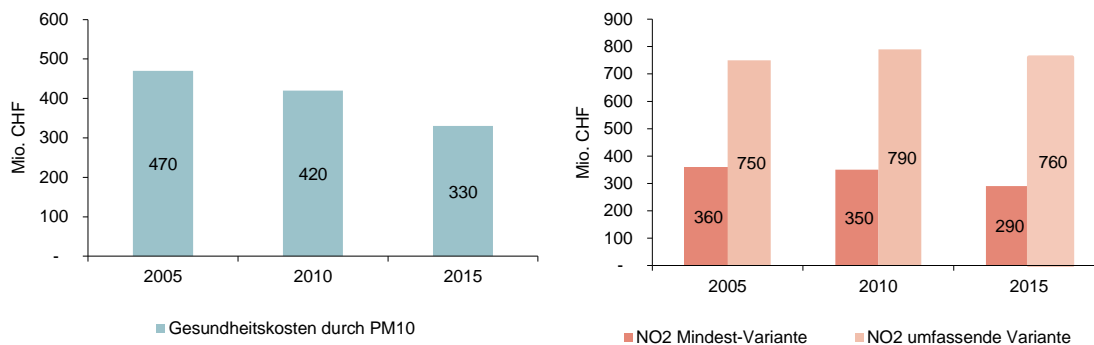
Kosten der Luftverschmutzung in der Stadt Zürich



econcept

Figur 34: Kosten der Luftverschmutzung in der Stadt Zürich unter Berücksichtigung der PM10-bedingten Gesundheitsschadenskosten. Ergebnisse gerundet.

Gesundheitsschadenskosten durch PM10 und NO₂ in der Stadt Zürich

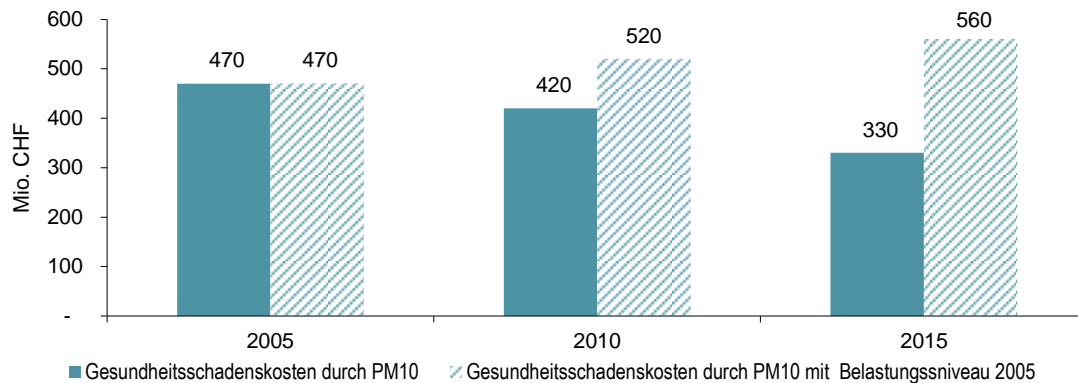


econcept

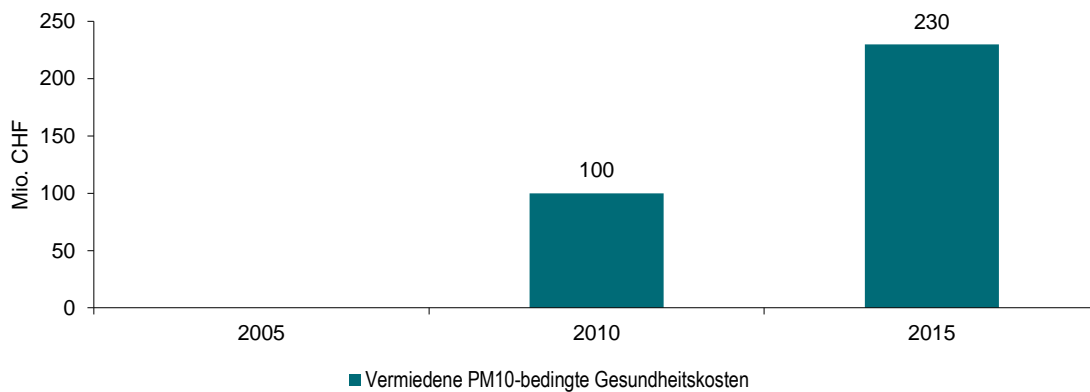
Figur 35: Gesundheitsschadenskosten durch PM10 und NO₂. Ergebnisse auf 10 Mio. CHF gerundet.
 NO₂-Mindest-Variante: Erhöhte Mortalität berücksichtigt ab 20 µg/m³, Referenzwert 20 µg/m³.
 NO₂ umfassende Variante: Erhöhte Mortalität berücksichtigt ab 5 µg/m³, Referenzwert 5 µg/m³

A-1.8 Volkswirtschaftlicher Nutzen der Verbesserung der Luftqualität

Gesundheitsschadenskosten mit und ohne Senkung der PM10-Belastung



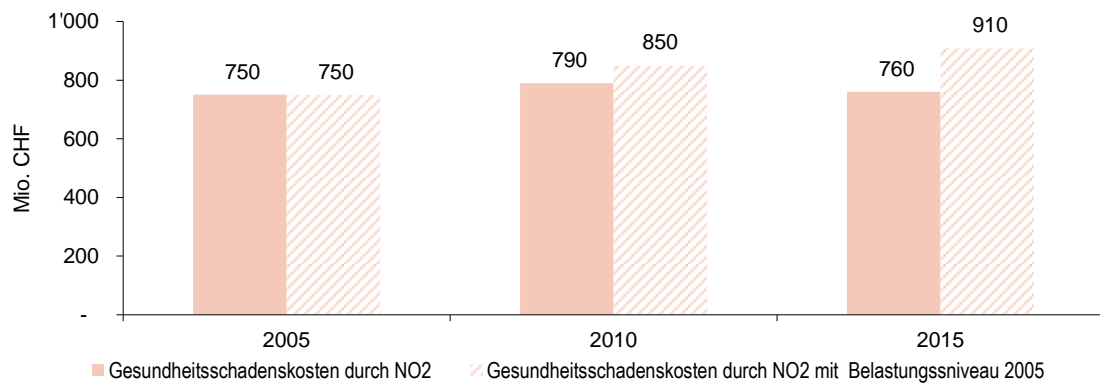
Vermiedene PM10-bedingte Gesundheitskosten



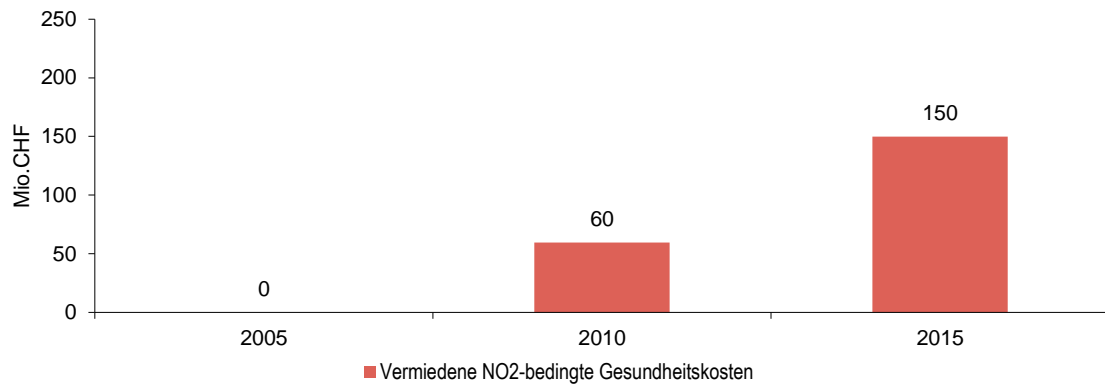
econcept

Figur 36: PM10-bedingte Gesundheitsschadenskosten mit und ohne Senkung der PM10-Belastung sowie der resultierende Nutzen in der Stadt Zürich (Referenzjahr 2005). Ergebnisse auf 10 Mio. CHF gerundet.

Gesundheitsschadenskosten mit und ohne Senkung der NO₂-Belastung



Vermiedene NO₂-bedingte Gesundheitskosten

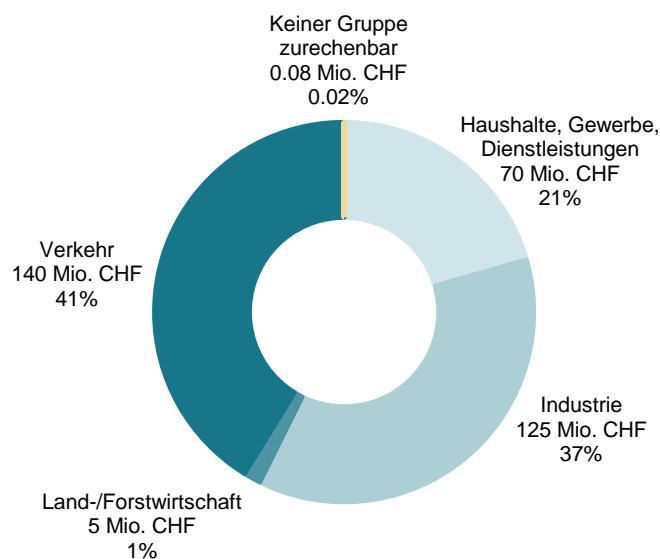


econcept

Figur 37: NO₂-bedingte Gesundheitsschadenskosten (umfassende Variante) mit und ohne Senkung der NO₂-Belastung sowie der resultierende Nutzen in der Stadt Zürich (Referenzjahr 2005). Ergebnisse auf 10 Mio. CHF gerundet.

A-1.9 Aufteilung auf die Verursachergruppen

Aufteilung auf die Verursachergruppen in der Stadt Zürich 2015



econcept

Figur 38: Aufteilung der Kosten der Luftverschmutzung auf die Verursachergruppen in der Stadt Zürich im Jahr 2015. Innerhalb der dargestellten Gruppen sind der Strassenverkehr, Baumaschinen und Feuerungen die relevantesten Emittenten. Ergebnisse gerundet. Die Frankenbeträge gelten unter Einbezug der PM10-bedingten Gesundheitsschadenskosten.

Anteile der Verursachergruppen an den Kosten der Luftverschmutzung in der Stadt Zürich			
	2005	2010	2015
Haushalte, Gewerbe, Dienstleistungen	17%	19%	20%
Industrie	35%	36%	37%
Land-/Forstwirtschaft	1%	1%	2%
Verkehr	47%	43%	42%
Keiner Gruppe zurechenbar	0.02%	0.02%	0.02%
Total	100%	100%	100%

Tabelle: Anteile der Verursachergruppen an den Kosten der Luftverschmutzung in der Stadt Zürich 2005 bis 2015

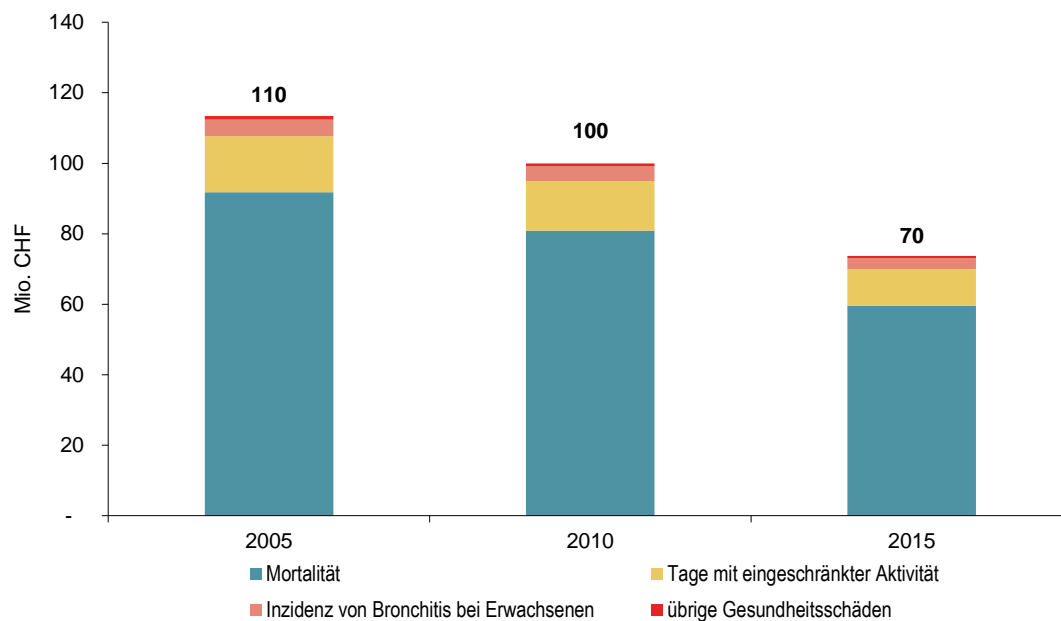
A-2 Ergebnisse Winterthur

A-2.1 PM10-bedingte Gesundheitsschadenskosten

Geschätzte Anzahl Krankheits- und Todesfälle aufgrund der PM10-Belastung in der Stadt Zürich im Jahr 2015	
Mortalität Erwachsene (Todesfälle)	25
Säuglingssterblichkeit (Todesfälle)	0
Spitaleintritte wegen Atemwegserkrankungen	10
Spitaleintritte wegen Herz/Kreislauserkrankungen	10
Inzidenz (Neuaufreten) chronische Bronchitis bei Erwachsenen	25
Prävalenz von Bronchitis bei Kindern (Fälle)	150
Tage mit Asthmasymptomen bei Erwachsenen	390
Tage mit Asthmasymptomen bei Kindern	6'900
Tage mit eingeschränkter Aktivität	41'200

Tabelle 48: Geschätzte jährliche Anzahl Krankheits- und Todesfälle aufgrund der PM10-Belastung (pro Jahr). Ergebnisse gerundet.

PM10-bedingte Gesundheitskosten in Winterthur



Figur 39: PM10-bedingte Gesundheitskosten in Winterthur. Ergebnisse auf 10 Mio. Ergebnisse gerundet.

Luftschadstoffbedingte Gesundheitsschadenskosten in Winterthur [Mio. CHF]			
	2005	2010	2015
Mortalität	90	80	60
Verlorenes Lebensjahr	90	80	60
Verlorenes Erwerbsjahr	0.6	0.6	0.4
Wiederbesetzungskosten	0.2	0.1	0.1
Spitaleintritte wegen Atemwegserkrankungen	0.03	0.03	0.02
Spitaleintritte wg. Herz/Kreislaufkrankungen bei Erwachsenen	0.04	0.03	0.02
Inzidenz von Bronchitis bei Erwachsenen	4.8	4.2	3.1
Prävalenz von Bronchitis bei Kindern	0.1	0.1	0.1
Tage mit Asthmasymptomen bei Erwachsenen	0.1	0.0	0.0
Tage mit Asthmasymptomen bei Kindern	0.8	0.7	0.5
Tage mit eingeschränkter Aktivität	15	15	10
Total	110	100	70

Tabelle 49: Luftschadstoffbedingte Gesundheitsschadenskosten in Winterthur. Ergebnisse gerundet.

A-2.2 NO₂-bedingte Gesundheitsschadenskosten

Geschätzte Anzahl Krankheits- und Todesfälle aufgrund der NO ₂ -Belastung in Winterthur				
		2005	2010	2015
Mindest-Variante	Mortalität Erwachsene (Todesfälle)	20	15	15
	Spitaleintritte wegen Atemwegserkrankungen	30	30	30
Umfassende Variante	Mortalität Erwachsene (Todesfälle)	70	75	70
	Spitaleintritte wegen Atemwegserkrankungen	30	30	30

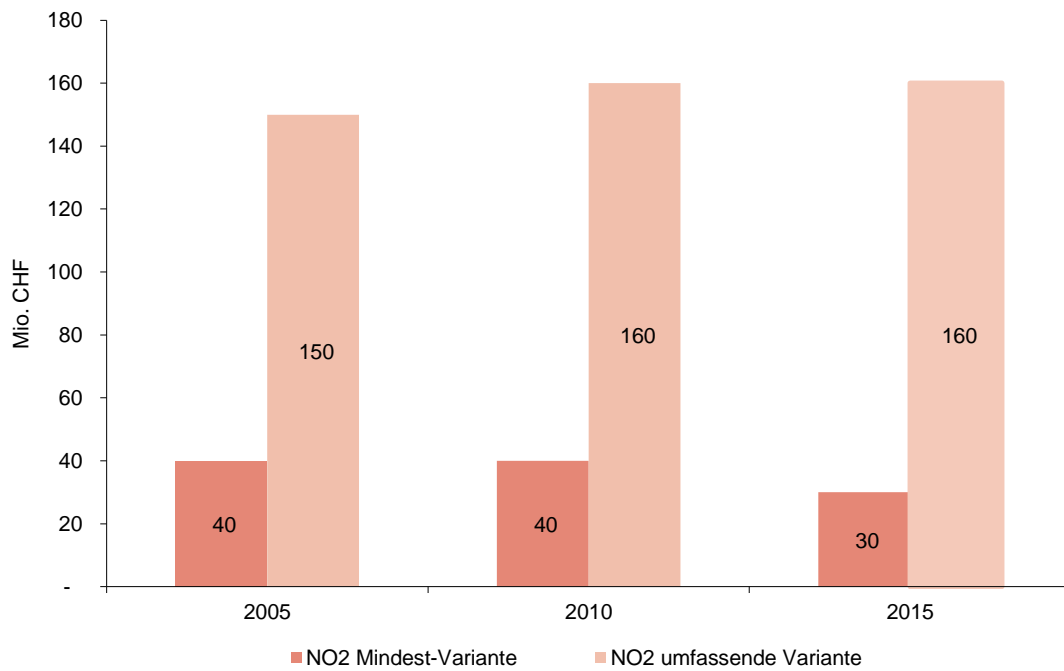
Tabelle 50: Geschätzte jährliche Anzahl Krankheits- und Todesfälle aufgrund der NO₂-Belastung. Ergebnisse gerundet.

NO ₂ -bedingte Gesundheitsschadenskosten in Winterthur [Mio. CHF]				
		2005	2010	2015
Mindest-werte	Spitaleintritte wegen Atemwegserkrankungen (alle Alter)	0.1	0.1	0.1
	Mortalität insgesamt	40	40	30
	Verlorenes Lebensjahr	40	40	30
	Verlorenes Erwerbsjahr	0.3	0.3	0.2
	Wiederbesetzungskosten	0.1	0.1	0.1
	NO₂-bedingte Gesundheitsschadenskosten		40	40
Umfassende Werte	Spitaleintritte wegen Atemwegserkrankungen (alle Alter)	0.1	0.1	0.1
	Mortalität insgesamt	150	160	160
	Verlorenes Lebensjahr	140	160	160
	Verlorenes Erwerbsjahr	1.0	1.2	1.2
	Wiederbesetzungskosten	0.3	0.3	0.3
	NO₂-bedingte Gesundheitsschadenskosten		150	160

Tabelle 51: NO₂-bedingte Gesundheitsschadenskosten in Winterthur. Ergebnisse gerundet.

Mindest-Variante: Erhöhte Mortalität berücksichtigt ab 20 µg/m³, Referenzwert 20 µg/m³.

Umfassende Variante: Erhöhte Mortalität berücksichtigt ab 5 µg/m³, Referenzwert 20 µg/m³.

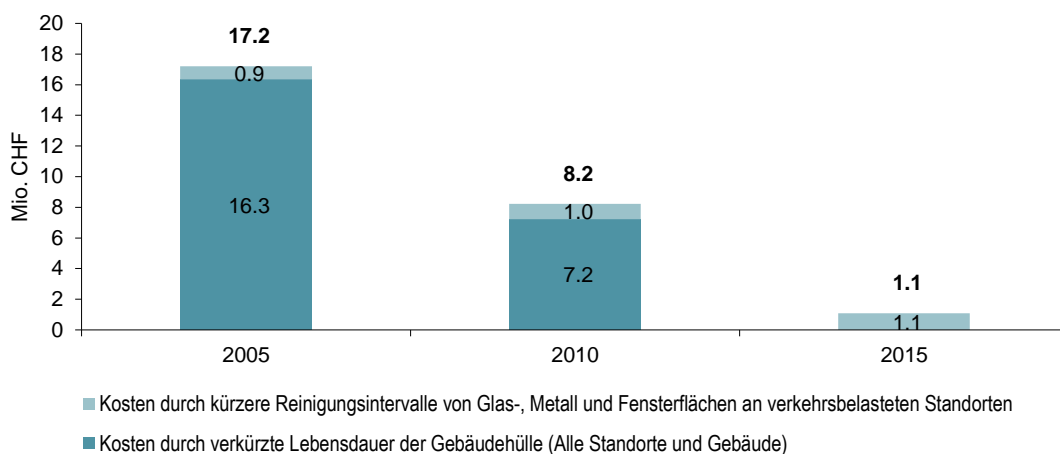
NO₂-bedingte Gesundheitskosten in Winterthur

econcept

Figur 40: NO₂-bedingte Gesundheitsschadenskosten in Winterthur. Ergebnisse auf 10 Mio. CHF gerundet.
Mindest-Variante: Erhöhte Mortalität berücksichtigt ab 20 µg/m³, Referenzwert 20 µg/m³.
Umfassende Variante: Erhöhte Mortalität berücksichtigt ab 5 µg/m³, Referenzwert 5 µg/m³.

A-2.3 Gebäudeschadenskosten

Luftschadstoffbedingte Gebäudeschadenskosten in der Stadt Winterthur



econcept

Figur 41: Luftschadstoffbedingte Gebäudeschadenskosten in der Stadt Winterthur

A-2.4 Waldschadenskosten

Waldschadenskosten in der Stadt Winterthur [Mio. CHF]			
	2005	2010	2015
Ernteaussfälle durch Ozon	0.11	0.11	0.10
Ernteaussfälle durch Bodenversauerung	0.29	0.27	0.25
Windwurfisiko durch Bodenversauerung	0.07	0.06	0.07
Total	0.47	0.44	0.41

Tabelle 52: Waldschadenskosten in der Stadt Winterthur [Mio. CHF]

A-2.5 Biodiversitätsschadenskosten

Biodiversitätsschadenskosten in der Stadt Winterthur [Mio. CHF]			
	2005	2010	2015
NO _x	0.8	0.7	0.6
NH ₃	0.7	0.7	0.7
Total	1.5	1.4	1.2

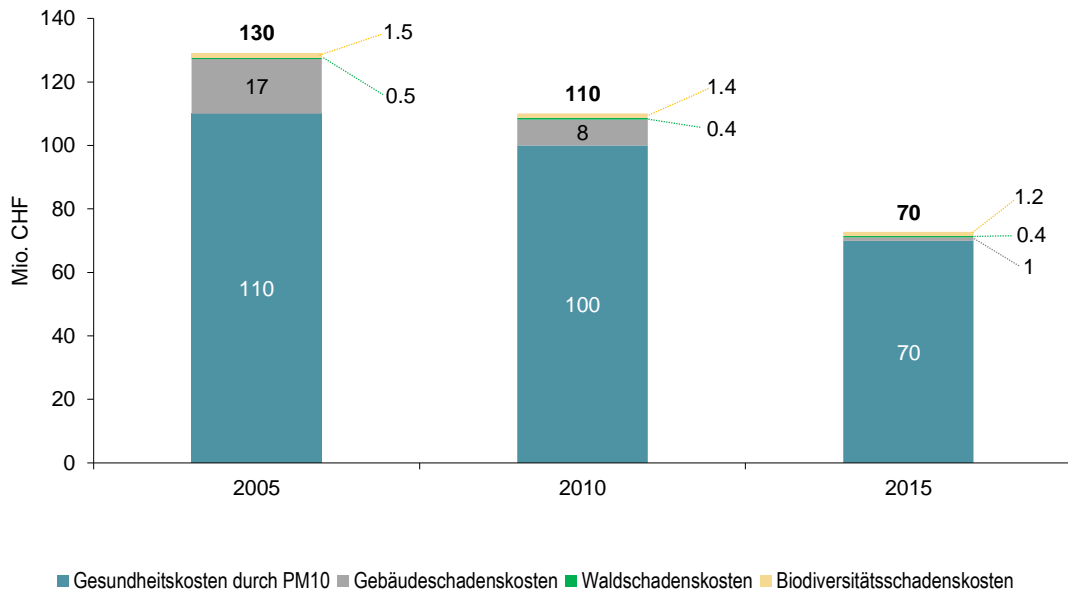
Tabelle 53: Biodiversitätsschadenskosten in der Stadt Winterthur [Mio. CHF]

A-2.6 Ernteaussfälle

Für die Städte Zürich und Winterthur wurden keine Ernteschadenskosten berechnet.

A-2.7 Gesamtkosten

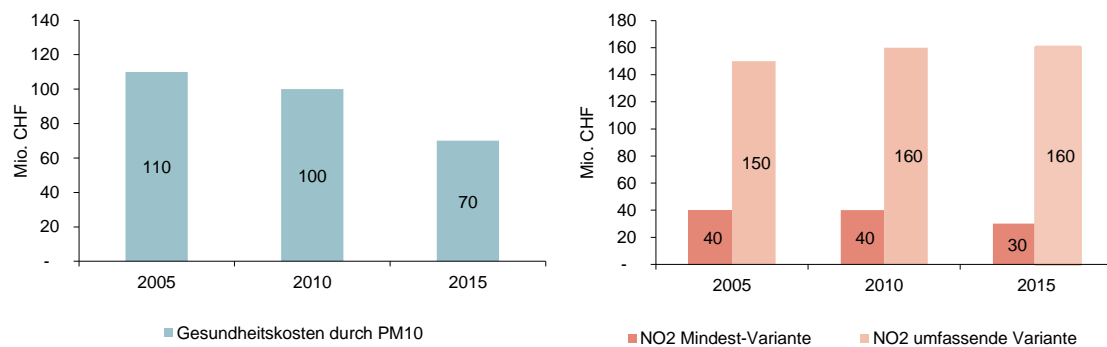
Kosten der Luftverschmutzung in Winterthur



econcept

Figur 42: Kosten der Luftverschmutzung in der Stadt Zürich unter Berücksichtigung der PM10-bedingten Gesundheitsschadenskosten. Ergebnisse gerundet.

Gesundheitsschadenskosten durch PM10 und NO₂ in Winterthur

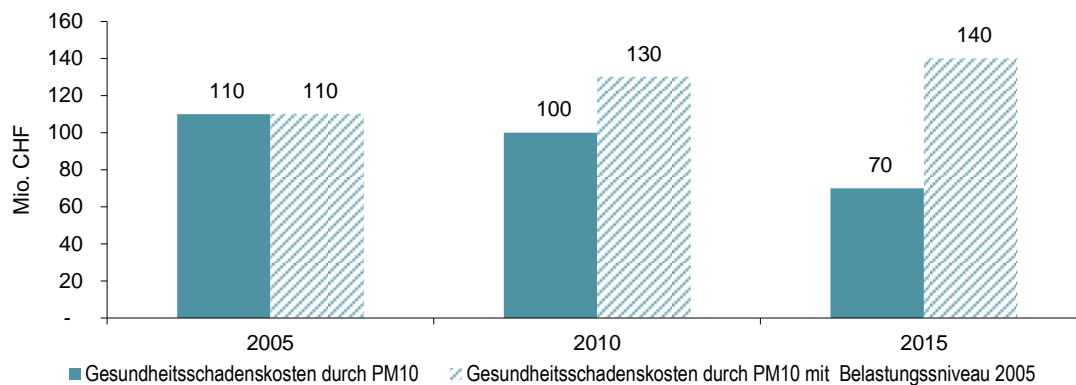


econcept

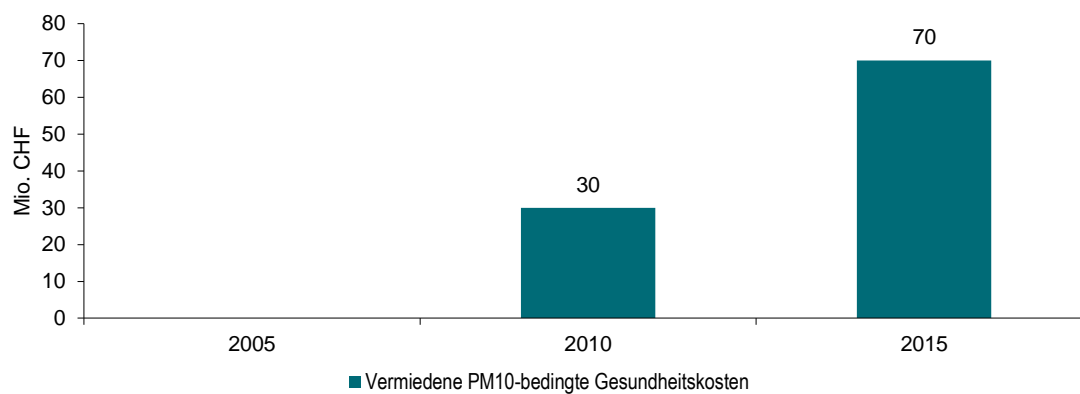
Figur 43: Gesundheitsschadenskosten durch PM10 und NO₂. Ergebnisse auf 10 Mio. CHF gerundet.
 NO₂-Mindest-Variante: Erhöhte Mortalität berücksichtigt ab 20 µg/m³, Referenzwert 20 µg/m³.
 NO₂ umfassende Variante: Erhöhte Mortalität berücksichtigt ab 5 µg/m³, Referenzwert 5 µg/m³

A-2.8 Volkswirtschaftlicher Nutzen der Verbesserung der Luftqualität

Gesundheitsschadenskosten mit und ohne Senkung der PM10-Belastung



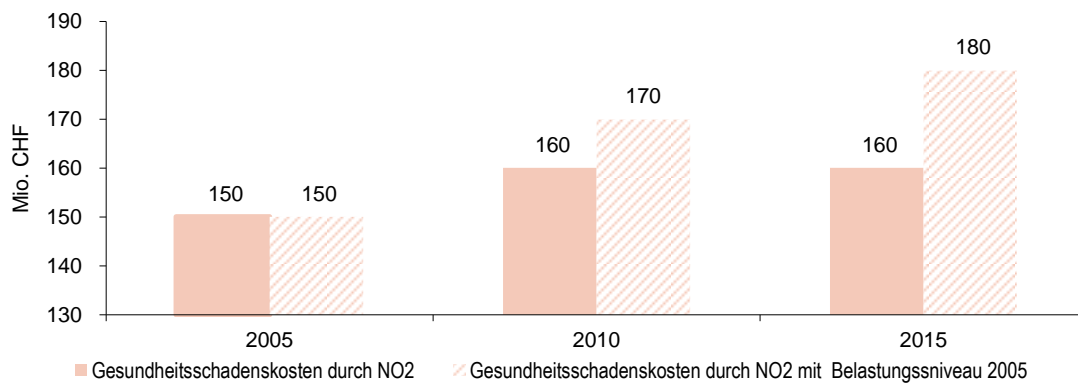
Vermiedene PM10-bedingte Gesundheitskosten



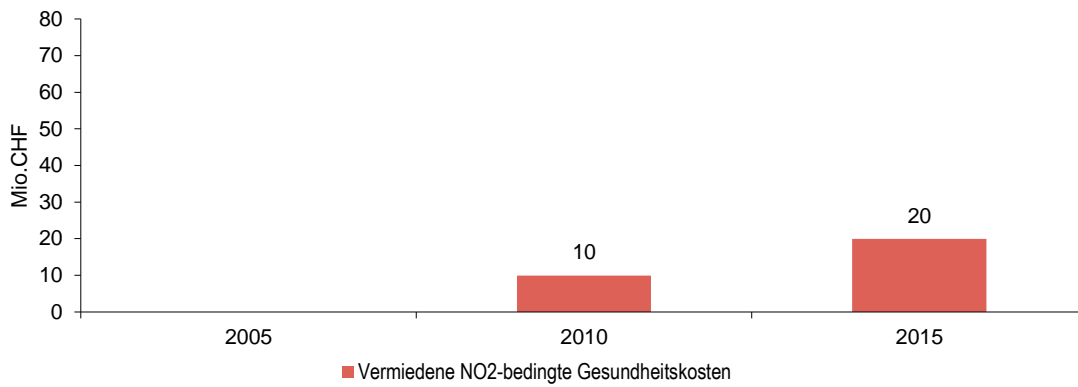
econcept

Figur 44: PM10-bedingte Gesundheitsschadenskosten mit und ohne Senkung der PM10-Belastung sowie der resultierende Nutzen in Winterthur (Referenzjahr 2005). Ergebnisse auf 10 Mio. CHF gerundet.

Gesundheitsschadenskosten mit und ohne Senkung der NO₂-Belastung



Vermiedene NO₂-bedingte Gesundheitskosten

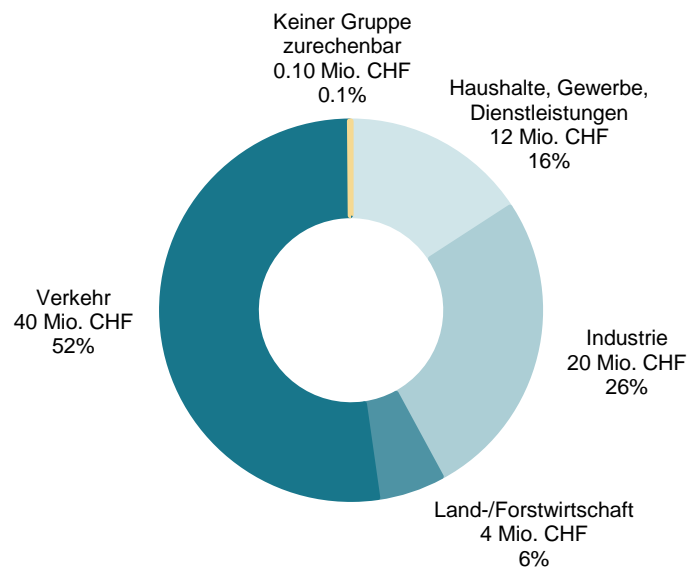


econcept

Figur 45: NO₂-bedingte Gesundheitsschadenskosten (umfassende Variante) mit und ohne Senkung der NO₂-Belastung sowie der resultierende Nutzen in Winterthur (Referenzjahr 2005). Ergebnisse auf 10 Mio. CHF gerundet.

A-2.9 Aufteilung auf die Verursachergruppen

Aufteilung auf die Verursachergruppen in Winterthur 2015



econcept

Figur 46: Aufteilung der Kosten der Luftverschmutzung auf die Verursachergruppen in Winterthur im Jahr 2015. Innerhalb der dargestellten Gruppen sind der Strassenverkehr, Baumaschinen, Feuerungen und industrielle Einzelquellen die relevantesten Emittenten. Ergebnisse gerundet. Die Frankenbeträge gelten unter Einbezug der PM10-bedingten Gesundheitsschadenskosten.

Anteile der Verursachergruppen an den Kosten der Luftverschmutzung in Winterthur

	2005	2010	2015
Haushalte, Gewerbe, Dienstleistungen	14%	16%	16%
Industrie	23%	25%	26%
Land-/Forstwirtschaft	4%	5%	6%
Verkehr	58%	54%	52%
Keiner Gruppe zurechenbar	0.1%	0.1%	0.1%
Total	100%	100%	100%

Tabelle: Anteile der Verursachergruppen an den Kosten der Luftverschmutzung in Winterthur 2005 bis 2015

A-3 Übersicht Dosis-Wirkungs-Relationen für Gesundheitsschäden

Dosis Wirkungs-Relationen (Effektschätzer)	Relatives Risiko pro 10 µg/m ³ PM10		Relatives Risiko pro 10 µg/m ³ NO ₂
	ARE (2004) & AWEL (2013)	ARE (2014) & Swiss TPH (2016)	Swiss TPH (2016): Studie zum Flughafen Genf-Cointrin
Mortalität Erwachsene (≥30 Jahre)	1.059 ^(B)	1.045 ^(A)	1.055
Kindersterblichkeit (≤ 1 Jahr)	1.056 ^(B)	1.04	-
Spitaleintritte wegen Herz/Kreislaufkrankungen (≥18 Jahre)		1.007 ^(A)	-
Spitaleintritte wegen Atemwegserkrankungen (alle Alter)	1.009 ^(B)	1.014 ^(A)	1.018
Inzidenz von Bronchitis bei Erwachsenen (≥18 Jahre)	1.05 ^(B)	1.117	-
Prävalenz von Bronchitis bei Kindern (6-18 Jahre)	1.35 ^(B)	1.08	
Prävalenz von Bronchitis bei Kindern mit Asthma (5-14 Jahre)			1.231
Tage mit Asthmasymptomen bei Erwachsenen (≥18 Jahre)		1.029	-
Tage mit Asthmasymptomen bei Kindern (5-17 Jahre)	-	1.028	-
Tag mit eingeschränkter Aktivität (alle)	1.094 ^(B)	1.034 ^(A)	-
Tage mit Erwerbsausfall bei Arbeitenden	-	1.033 ^(A)	-

Tabelle 54: Dosis Wirkungs-Relationen (Effektschätzer) für PM10 und NO₂.

^(A) Effektschätzer wurde ursprünglich für PM2.5 erhoben

^(B) nicht abgeklärt ob diese auf PM2.5 oder PM10 beruhen

A-4 Bevölkerungsexpositionen

PM10-Bevölkerungsexposition										
Belastungs- niveau [mg/m ³]	Kanton ZH						Stadt Zürich		Stadt Winterthur	
	2005		2010		2015		2015		2015	
< 7.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7.5 - 8.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8.5 - 9.5	-	-	-	-	111	<1%	-	-	-	-
9.5 - 10.5	-	-	-	-	1'221	<1%	-	-	-	-
10.5 - 11.5	-	-	-	-	7'688	1%	-	-	-	-
11.5 - 12.5	-	-	113	<1%	69'702	5%	-	-	-	-
12.5 - 13.5	-	-	970	<1%	342'199	23%	322	<1%	605	1%
13.5 - 14.5	7	<1%	7'016	<1%	379'811	26%	10'367	3%	27'324	25%
14.5 - 15.5	142	<1%	50'380	4%	221'517	15%	54'485	14%	54'460	50%
15.5 - 16.5	1'927	<1%	293'694	21%	199'520	14%	122'347	31%	23'032	21%
16.5 - 17.5	6'277	<1%	376'579	28%	113'715	8%	91'572	23%	2'623	2%
17.5 - 18.5	46'647	4%	203'557	15%	90'564	6%	82'762	21%	22	<1%
18.5 - 19.5	256'010	20%	187'855	14%	31'981	2%	29'493	7%	-	-
19.5 - 20.5	343'814	27%	119'431	9%	3'470	<1%	3'097	1%	-	-
20.5 - 21.5	189'802	15%	84'647	6%	-	-	-	-	-	-
21.5 - 22.5	162'677	13%	39'578	3%	-	-	-	-	-	-
22.5 - 23.5	116'033	9%	4'581	<1%	-	-	-	-	-	-
23.5 - 24.5	85'218	7%	766	<1%	-	-	-	-	-	-
24.5 - 25.5	42'155	3%	-	-	-	-	-	-	-	-
25.5 - 26.5	10'904	<1%	-	-	-	-	-	-	-	-
26.5 - 27.5	2'528	<1%	-	-	-	-	-	-	-	-
> 27.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Total	1'264'141	100%	1'369'167	100%	1'461'499	100%	394'445	100%	108'066	100%
Durchschnittliche Belastung [mg/m³]	20.89		17.79		14.68		16.71		15.00	

Tabelle 55: PM10 Exposition der Wohnbevölkerung (Anzahl Personen) des Kantons Zürich im Jahr (mittlere Jahresbelastung, Quelle OSTLUFT, STATPOP BFS)

NO ₂ -Bevölkerungsexposition										
Belastungs- niveau [mg/m ³]	Kanton ZH						Stadt Zürich		Stadt Winterthur	
	2005		2010		2015		2015		2015	
< 10	1'782	<1%	1'920	<1%	1'770	<1%	-	-	-	-
10 - 12	6'505	1%	7'945	1%	8'680	1%	-	-	-	-
12 - 14	25'139	2%	33'811	2%	43'016	3%	-	-	-	-
14 - 16	66'242	5%	90'439	7%	135'014	9%	-	-	1'792	2%
16 - 18	141'922	11%	200'770	15%	264'020	18%	338	<1%	4'356	4%
18 - 20	190'250	15%	220'177	16%	224'053	15%	5'100	1%	12'514	12%
20 - 22	146'241	12%	148'377	11%	150'213	10%	9'050	2%	31'505	29%
22 - 24	116'401	9%	118'939	9%	130'531	9%	26'409	7%	26'189	24%
24 - 26	96'037	8%	105'815	8%	135'718	9%	65'526	17%	18'947	18%
26 - 28	89'876	7%	111'876	8%	122'853	8%	90'818	23%	6'611	6%
28 - 30	94'978	8%	101'802	7%	96'927	7%	75'356	19%	3'438	3%
30 - 32	88'320	7%	78'633	6%	91'038	6%	76'084	19%	1'566	1%
32 - 34	68'634	5%	82'414	6%	34'524	2%	28'903	7%	512	<1%
34 - 36	70'372	6%	39'882	3%	12'080	1%	8'491	2%	198	<1%
36 - 38	31'964	3%	13'874	1%	4'795	<1%	3'235	1%	67	<1%
38 - 40	14'526	1%	5'135	<1%	2'975	<1%	2'478	1%	129	<1%
40 - 42	5'224	<1%	3'099	<1%	1'594	<1%	1'307	<1%	89	<1%
42 - 44	3'831	<1%	2'115	<1%	709	<1%	423	<1%	80	<1%
44 - 46	2'178	<1%	680	<1%	1'113	<1%	827	<1%	70	<1%
46 - 48	1'667	<1%	1'385	<1%	132	<1%	97	<1%	3	<1%
48 - 50	1'062	<1%	340	<1%	6	<1%	3	<1%	-	-
> 50	993	<1%	80	<1%	40	<1%	-	-	-	-
Total	1'264'141		1'369'508		1'461'801		394'445		108'066	
Durch- schnittliche Belastung [mg/m³]	24.24		23.05		21.86		28.18		22.62	

Tabelle 56: NO₂ Exposition der Wohnbevölkerung (Anzahl Personen) des Kantons Zürich im Jahr (mittlere Jahresbelastung, Quelle OSTLUFT, STATPOP BFS)

A-5 Aufteilung auf die Verursachergruppen im Detail

A-5.1 Kostensätze NEEDS-Projekt

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

Tabelle 57: 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.

A-5.2 Emissionen und detaillierte Ergebnisse Kanton Zürich

Emissionen im Kanton Zürich [t/a]															
	NO _x			NH ₃			NMVOC			PM ₁₀			EC		
	2005	2010	2015	2005	2010	2015	2005	2010	2015	2005	2010	2015	2005	2010	2015
Haushalte, Gewerbe, Dienstleistungen	1705.0	1593.7	1337.8	87.0	80.5	78.2	795.2	671.0	555.4	477.9	494.3	469.1	92.6	95.8	90.3
Industrie	1859.8	1577.8	1336.8	41.5	44.8	45.7	8652.4	8345.8	8150.8	577.3	557.7	530.0	47.5	32.6	27.1
Land-/Waldwirtschaft	597.1	535.9	453.2	3255.9	3339.2	3215.2	491.4	424.6	382.1	284.9	283.8	273.1	25.7	23.1	19.8
Verkehr	8325.3	6330.0	5415.3	536.1	374.3	263.7	3946.2	2827.8	2066.9	896.4	859.9	833.4	172.6	133.8	95.3
Total	12487.2	10037.4	8543.1	3920.5	3838.8	3602.9	13885.2	12269.2	11155.2	2236.4	2195.8	2105.5	338.4	285.4	232.5

Tabelle 58: Emissionen Kanton Zürich

Emissionen im Kanton Zürich, Anteile der Verursachergruppen																	
		NOx			NH3			NMVOC			PM10			EC			
		2005	2010	2015	2005	2010	2015	2005	2010	2015	2005	2010	2015	2005	2010	2015	
Haus- halte, Ge- werbe, Dienst- leistun- gen	Brand-/Feuerschäden	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.1%	0.1%	0.2%	1.2%	1.2%	1.3%	1.6%	1.9%	2.3%	
	Feuerungen Holz	1.9%	2.7%	3.1%	0.0%	0.0%	0.0%	1.1%	1.3%	1.4%	16.1%	17.0%	16.2%	21.9%	26.9%	30.2%	
	Feuerungen nicht Holz	11.7%	13.2%	12.5%	0.0%	0.0%	0.0%	1.6%	1.8%	1.7%	0.4%	0.4%	0.3%	0.2%	0.2%	0.2%	
	Garten/Hobby	0.0%	0.0%	0.0%	2.2%	2.1%	2.2%	2.9%	2.3%	1.8%	3.7%	4.0%	4.5%	3.7%	4.6%	6.1%	
	Total	13.7%	15.9%	15.7%	2.2%	2.1%	2.2%	5.7%	5.5%	5.0%	21.4%	22.5%	22.3%	27.4%	33.6%	38.9%	
Indust- rie	Baumaschinen	6.8%	6.2%	5.0%	0.0%	0.0%	0.0%	1.1%	0.8%	0.5%	15.2%	14.5%	14.9%	11.0%	9.0%	9.9%	
	Industrie - Einzelquellen	3.0%	3.8%	4.5%	0.4%	0.4%	0.4%	1.8%	2.0%	3.9%	1.0%	1.0%	0.6%	0.1%	0.1%	0.1%	
	Industrielle und gewerbliche Prozesse	2.9%	3.6%	4.7%	0.6%	0.7%	0.8%	7.3%	7.5%	7.9%	8.7%	9.3%	9.3%	0.6%	0.7%	0.8%	
	Industrielle Fahrzeuge	2.2%	2.1%	1.5%	0.0%	0.0%	0.0%	0.3%	0.3%	0.2%	0.9%	0.6%	0.3%	2.4%	1.6%	0.9%	
	Verteilung Brenn-/Treibstoffe	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	2.6%	2.3%	2.3%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	
	Verwendung von Lösemittel	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	49.3%	55.2%	58.2%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	
	Total	14.9%	15.7%	15.6%	1.1%	1.2%	1.3%	62.3%	68.0%	73.1%	25.8%	25.4%	25.2%	14.0%	11.4%	11.7%	
Land- /Waldwi- rtschaft	Waldwirtschaftl. Fahrzeuge	0.1%	0.1%	0.1%	0.0%	0.0%	0.0%	0.2%	0.2%	0.2%	0.1%	0.1%	0.1%	0.2%	0.1%	0.1%	
	Landwirtschaftliche Fahrzeu- ge	2.7%	2.8%	2.5%	0.0%	0.0%	0.0%	1.3%	1.0%	0.8%	8.6%	8.7%	8.7%	6.9%	7.5%	7.8%	
	Nutzflächen	1.6%	2.1%	2.3%	11.4%	11.6%	11.7%	2.0%	2.2%	2.4%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	
	Offene Verbrennung	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.4%	0.3%	0.3%	0.5%	0.5%	0.6%	
	Vieh	0.3%	0.3%	0.4%	71.7%	75.4%	77.5%	0.0%	0.0%	0.0%	3.6%	3.9%	3.8%	0.0%	0.0%	0.0%	
	Total	4.8%	5.3%	5.3%	83.0%	87.0%	89.2%	3.5%	3.5%	3.4%	12.7%	12.9%	13.0%	7.6%	8.1%	8.5%	
Verkehr	Luftfahrt	9.8%	10.1%	13.3%	0.0%	0.0%	0.0%	2.7%	3.2%	2.5%	0.9%	1.0%	0.9%	2.1%	2.9%	2.9%	
	Schiffe	1.2%	1.5%	1.5%	0.0%	0.0%	0.0%	0.5%	0.4%	0.4%	0.5%	0.4%	0.3%	1.7%	1.6%	1.2%	
	Strasse	Linkemissionen warm	47.4%	44.3%	42.4%	12.8%	9.2%	7.1%	7.4%	4.6%	3.0%	29.5%	27.9%	27.7%	41.9%	37.2%	32.3%
		Zonenemissionen Start/Stop, Tankatmung	3.9%	2.5%	1.4%	0.0%	0.0%	0.0%	16.9%	14.1%	12.2%	0.6%	0.5%	0.4%	2.1%	2.3%	1.9%
		Zonenemissionen warm	3.8%	3.9%	3.9%	0.9%	0.5%	0.3%	0.9%	0.6%	0.4%	2.4%	2.3%	2.3%	3.3%	2.9%	2.7%
	Schiene	0.6%	0.7%	0.8%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	6.2%	7.1%	7.9%	0.0%	0.0%	0.0%	
	Total	66.7%	63.1%	63.4%	13.7%	9.8%	7.3%	28.4%	23.0%	18.5%	40.1%	39.2%	39.6%	51.0%	46.9%	41.0%	
Total	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%		

Tabelle 59: Emissionen im Kanton Zürich, Anteile der Verursachergruppen

Aufteilung der Kosten der Luftverschmutzung auf die Verursacherguppen [Mio. CHF]																	
		NOx			NH3			NMVOC			PM10			O3			
		2005	2010	2015	2005	2010	2015	2005	2010	2015	2005	2010	2015	2005	2010	2015	
Haus- halte, Ge- werbe, Dienst- leistun- gen	Brand-/Feuerschäden	0.2	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1	6.0	4.6	3.1				
	Feuerungen Holz	18.5	21.4	17.5	0.0	0.0	0.0	0.6	0.7	0.5	81.6	65.0	39.9				
	Feuerungen nicht Holz	116.2	105.9	70.8	0.0	0.0	0.0	0.9	0.9	0.6	1.9	1.4	0.8				
	Garten/Hobby	0.3	0.3	0.2	4.4	4.1	3.3	1.7	1.2	0.7	18.8	15.2	11.2				
	Total	135.2	127.7	88.7	4.4	4.1	3.3	3.3	2.8	1.9	108.3	86.2	55.0				
Industrie	Baumaschinen	67.3	50.2	28.1	0.0	0.0	0.0	0.6	0.4	0.2	77.0	55.4	36.9				
	Industrie - Einzelquellen	30.2	30.2	25.6	0.8	0.8	0.7	1.0	1.0	1.5	5.1	3.9	1.5				
	Industrielle und gewerbliche Prozesse	28.5	29.1	26.5	1.3	1.4	1.3	4.2	3.8	3.1	44.0	35.8	22.9				
	Industrielle Fahrzeuge	21.4	17.0	8.4	0.0	0.0	0.0	0.2	0.1	0.1	4.8	2.2	0.8				
	Verteilung Brenn-/Treibstoffe	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.5	1.2	0.9	0.0	0.0	0.0				
	Verwendung von Lösemittel	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	28.4	28.3	22.4	0.0	0.0	0.0				
	Total	147.5	126.5	88.6	2.1	2.3	1.9	35.9	35.0	28.1	130.9	97.2	62.1				
Land- /Waldwi- rtschaft	Waldwirtschaftl. Fahrzeuge	1.4	1.0	0.6	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1	0.5	0.3	0.2				
	Landwirtschaftliche Fahrzeuge	27.0	22.2	14.4	0.0	0.0	0.0	0.7	0.5	0.3	43.8	33.2	21.6				
	Nutzflächen	15.9	16.8	12.7	22.3	22.6	17.9	1.2	1.1	0.9	0.0	0.0	0.0				
	Offene Verbrennung	0.2	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.9	1.2	0.7				
	Vieh	2.8	2.8	2.2	141.0	146.8	118.9	0.0	0.0	0.0	18.3	14.7	9.5				
	Total	47.3	43.0	30.1	163.3	169.4	136.9	2.0	1.8	1.3	64.6	49.5	32.0				
Verkehr	Luftfahrt	96.9	81.3	75.4	0.0	0.0	0.0	1.5	1.7	1.0	4.5	4.0	2.3				
	Schiffe	12.2	11.8	8.6	0.0	0.0	0.0	0.3	0.2	0.2	2.3	1.4	0.7				
	Strasse	Linkemissionen warm	469.4	356.8	240.2	25.2	18.0	10.8	4.3	2.4	1.2	149.7	106.8	68.3			
		Zonenemissionen Start/Stop, Tankatmung	38.4	20.1	7.9	0.0	0.0	0.0	9.8	7.3	4.7	2.9	2.0	1.1			
		Zonenemissionen warm	37.6	31.6	22.3	1.7	1.0	0.4	0.5	0.3	0.2	12.1	8.6	5.7			
		5.7	5.7	4.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	31.6	27.0	19.4				
	Total	660.1	507.3	359.1	26.9	19.0	11.2	16.4	11.8	7.1	203.2	149.9	97.6				
Keiner Gruppe zurechenbar													9.2	6.7	7.4		
Total		990.1	804.5	566.5	196.6	194.8	153.4	57.6	51.4	38.5	507.0	382.9	246.7	9.2	6.7	7.4	

Tabelle 60: Aufteilung der Kosten der Luftverschmutzung auf die Verursacherguppen

[Mio. CHF]	2005						2010						2015					
	Ge-sund-heit	Ge-bäude	Wald	Bio-diversi-tät	Ernte	Total	Ge-sund-heit	Ge-bäude	Wald	Bio-diversi-tät	Ernte	Total	Ge-sund-heit	Ge-bäude	Wald	Bio-diversi-tät	Ernte	Total
Haushalte, Gewerbe, Dienstleistungen	202.2	45.7	0.5	2.8	-	251.2	196.7	20.7	0.6	2.8	-	220.8	142.2	3.8	0.5	2.3	-	148.9
Industrie	257.7	55.2	0.5	2.9	-	316.3	234.4	23.4	0.5	2.6	-	260.9	173.8	4.3	0.5	2.2	-	180.8
Land-/Waldwirtschaft	233.2	27.2	3.0	13.8	-	277.2	234.1	11.9	2.9	14.7	-	263.6	181.4	2.2	2.8	13.8	-	200.3
Verkehr	803.9	85.6	2.7	14.3	-	906.5	638.5	36.1	2.3	11.2	-	688.1	457.0	6.8	2.1	9.2	-	475.1
Keiner Gruppe zurechenbar	-	-	2.2	-	7.0	9.2	-	-	2.0	-	4.7	6.7	-	-	1.9	-	5.5	7.4
Total	1'497.0	213.7	8.9	33.9	7.0	1'760.5	1'303.7	92.1	8.4	31.3	4.7	1'440.2	954.3	17.2	7.9	27.5	5.5	1'012.4

Tabelle 61: Aufteilung der Kosten der Luftverschmutzung auf die Verursacherguppen

A-5.3 Emissionen und detaillierte Ergebnisse Stadt Zürich

Emissionen in der Stadt Zürich [t/a]															
	NOx			NH3			NMVOC			PM10			EC		
	2005	2010	2015	2005	2010	2015	2005	2010	2015	2005	2010	2015	2005	2010	2015
Haushalte, Gewerbe, Dienstleistungen	553.1	496.9	408.6	20.7	19.0	19.3	150.0	128.6	106.0	34.0	35.9	37.0	5.7	6.0	6.1
Industrie	622.1	519.2	441.0	10.5	11.3	11.6	3202.4	3069.7	2944.4	179.2	169.8	165.1	16.9	11.5	9.8
Land-/Waldwirtschaft	13.0	10.3	8.1	33.2	32.2	30.6	13.9	9.9	8.3	5.9	5.4	5.1	0.7	0.6	0.5
Verkehr	1221.7	875.9	697.4	97.3	58.9	37.2	947.1	645.0	472.8	166.8	155.2	153.2	28.2	20.5	14.9
Total	2409.9	1902.3	1555.2	161.7	121.3	98.7	4313.5	3853.1	3531.5	385.9	366.3	360.4	51.4	38.6	31.3

Tabelle 62: Emissionen Stadt Zürich.

Emissionen in der Stadt Zürich, Anteile der Verursacherguppen																	
		NOx			NH3			NMVOC			PM10			EC			
		2005	2010	2015	2005	2010	2015	2005	2010	2015	2005	2010	2015	2005	2010	2015	
Haus- halte, Ge- werbe, Dienst- leistun- gen	Brand-/Feuerschäden	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.1%	0.1%	0.1%	1.2%	1.2%	1.2%	1.8%	2.4%	2.9%	
	Feuerungen Holz	0.3%	0.5%	0.6%	0.0%	0.0%	0.0%	0.1%	0.1%	0.1%	2.5%	2.8%	2.5%	3.9%	5.5%	6.0%	
	Feuerungen nicht Holz	22.6%	25.6%	25.7%	0.0%	0.0%	0.0%	1.8%	2.0%	1.9%	0.7%	0.8%	0.7%	0.4%	0.5%	0.5%	
	Garten/Hobby	0.0%	0.0%	0.0%	12.8%	15.6%	19.5%	1.5%	1.1%	0.9%	4.4%	5.0%	5.8%	4.9%	7.1%	10.0%	
	Total	23.0%	26.1%	26.3%	12.8%	15.6%	19.5%	3.5%	3.3%	3.0%	8.8%	9.8%	10.3%	11.0%	15.5%	19.5%	
Indust- rie	Baumaschinen	13.4%	12.5%	10.4%	0.0%	0.0%	0.0%	1.3%	0.9%	0.6%	33.5%	33.0%	33.2%	27.4%	25.3%	28.0%	
	Industrie - Einzelquellen	6.3%	7.7%	10.4%	2.4%	3.3%	4.1%	0.9%	1.0%	1.3%	0.7%	0.6%	0.6%	0.1%	0.1%	0.1%	
	Industrielle und gewerbliche Prozesse	3.1%	4.0%	5.3%	4.1%	6.0%	7.7%	5.1%	4.7%	4.8%	10.8%	11.8%	11.4%	0.9%	1.3%	1.4%	
	Industrielle Fahrzeuge	3.1%	3.1%	2.2%	0.0%	0.0%	0.0%	0.3%	0.2%	0.1%	1.5%	1.0%	0.5%	4.3%	3.2%	1.8%	
	Verteilung Brenn-/Treibstoffe	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	1.9%	1.7%	1.7%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	
	Verwendung von Lösemittel	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	64.8%	71.1%	74.8%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	
	Total	25.8%	27.3%	28.4%	6.5%	9.3%	11.8%	74.2%	79.7%	83.4%	46.4%	46.4%	45.8%	32.8%	29.9%	31.3%	
Land- /Waldwi- rtschaft	Waldwirtschaftl. Fahrzeuge	0.2%	0.1%	0.1%	0.0%	0.0%	0.0%	0.2%	0.1%	0.1%	0.1%	0.1%	0.2%	0.2%	0.2%		
	Landwirtschaftliche Fahrzeu- ge	0.3%	0.3%	0.2%	0.0%	0.0%	0.0%	0.1%	0.1%	0.0%	0.9%	0.9%	0.9%	0.8%	1.0%	1.0%	
	Nutzflächen	0.1%	0.1%	0.1%	3.4%	4.0%	4.6%	0.1%	0.1%	0.1%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	
	Offene Verbrennung	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.2%	0.2%	0.2%	0.4%	0.4%	0.4%	
	Vieh	0.0%	0.0%	0.0%	17.2%	22.5%	26.4%	0.0%	0.0%	0.0%	0.2%	0.3%	0.3%	0.0%	0.0%	0.0%	
	Total	0.5%	0.5%	0.5%	20.5%	26.5%	31.0%	0.3%	0.3%	0.2%	1.5%	1.5%	1.4%	1.4%	1.6%	1.6%	
Verkehr	Luftfahrt	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%		
	Schiffe	0.3%	0.4%	0.5%	0.0%	0.0%	0.0%	0.1%	0.1%	0.1%	0.1%	0.1%	0.1%	0.5%	0.5%	0.4%	
	Strasse	Linkemissionen warm	38.8%	35.8%	36.1%	54.7%	44.4%	35.3%	4.7%	2.8%	1.8%	29.7%	27.5%	27.0%	44.2%	41.4%	37.6%
		Zonenemissionen Start/Stop, Tankatmung	6.0%	3.9%	2.2%	0.0%	0.0%	0.0%	16.3%	13.4%	11.2%	1.1%	1.0%	0.8%	4.3%	5.4%	4.4%
		Zonenemissionen warm	5.3%	5.6%	5.7%	5.5%	4.2%	2.3%	0.8%	0.5%	0.3%	3.7%	3.6%	3.5%	5.8%	5.7%	5.2%
	Schiene	0.2%	0.3%	0.4%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	8.7%	10.2%	11.1%	0.0%	0.0%	0.0%	
	Total	50.7%	46.0%	44.8%	60.2%	48.5%	37.7%	22.0%	16.7%	13.4%	43.2%	42.4%	42.5%	54.8%	53.0%	47.6%	
Total	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%		

Tabelle 63: Emissionen in der Stadt Zürich, Anteile der Verursacherguppen.

Aufteilung der Kosten der Luftverschmutzung auf die Verursachergruppen [Mio. CHF]																	
		NOx			NH3			NMVOC			PM10			O3			
		2005	2010	2015	2005	2010	2015	2005	2010	2015	2005	2010	2015	2005	2010	2015	
Haushalte, Gewerbe, Dienstleistungen	Brand-/Feuerschäden	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.1	1.8	1.2				
	Feuerungen Holz	1.1	1.4	1.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	4.4	4.2	2.4				
	Feuerungen nicht Holz	76.2	73.8	54.9	0.0	0.0	0.0	0.6	0.6	0.5	1.3	1.2	0.7				
	Garten/Hobby	0.0	0.0	0.0	1.8	1.8	1.7	0.5	0.4	0.2	7.8	7.4	5.4				
	Total	77.4	75.3	56.2	1.8	1.8	1.7	1.1	1.0	0.8	15.6	14.5	9.6				
Industrie	Baumaschinen	45.2	36.1	22.2	0.0	0.0	0.0	0.4	0.3	0.2	59.0	48.9	31.1				
	Industrie - Einzelquellen	21.1	22.1	22.3	0.3	0.4	0.4	0.3	0.3	0.3	1.2	0.9	0.6				
	Industrielle und gewerbliche Prozesse	10.4	11.6	11.3	0.6	0.7	0.7	1.6	1.5	1.3	19.1	17.5	10.7				
	Industrielle Fahrzeuge	10.3	8.9	4.8	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0	2.6	1.4	0.5				
	Verteilung Brenn-/Treibstoffe	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6	0.5	0.4	0.0	0.0	0.0				
	Verwendung von Lösemittel	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	20.9	22.1	19.4	0.0	0.0	0.0				
	Total	87.1	78.7	60.6	0.9	1.1	1.0	23.9	24.8	21.6	81.9	68.7	42.9				
Land-/Waldwirtschaft	Waldwirtschaftl. Fahrzeuge	0.5	0.4	0.2	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.2	0.2	0.1				
	Landwirtschaftliche Fahrzeuge	0.9	0.7	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.6	1.3	0.8				
	Nutzflächen	0.3	0.3	0.3	0.5	0.5	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0				
	Offene Verbrennung	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	0.3	0.2				
	Vieh	0.1	0.1	0.1	2.4	2.6	2.3	0.0	0.0	0.0	0.4	0.4	0.2				
	Total	1.8	1.6	1.1	2.9	3.0	2.7	0.1	0.1	0.1	2.7	2.2	1.3				
Verkehr	Luftfahrt	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0				
	Schiffe	1.2	1.2	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.2	0.1				
	Strasse	Linkemissionen warm	130.8	103.3	77.2	7.6	5.1	3.0	1.5	0.9	0.5	52.3	40.7	25.4			
		Zonenemissionen Start/Stop, Tankatmung	20.2	11.3	4.7	0.0	0.0	0.0	5.3	4.2	2.9	1.9	1.5	0.8			
		Zonenemissionen warm	17.9	16.1	12.1	0.8	0.5	0.2	0.3	0.2	0.1	6.5	5.3	3.3			
	Schiene	0.8	0.9	0.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	15.4	15.1	10.4				
	Total	171.0	132.7	95.9	8.4	5.6	3.2	7.1	5.2	3.5	76.3	62.7	39.8				
Keiner Gruppe zurechenbar													0.1	0.1	0.1		
Total		337.3	288.3	213.8	13.9	11.5	8.6	32.2	31.2	25.9	176.4	148.1	93.8	0.1	0.1	0.1	

Tabelle 64: Aufteilung der Kosten der Luftverschmutzung auf die Verursachergruppen.

[Mio. CHF]	2005						2010						2015					
	Ge-sund-heit	Ge-bäude	Wald	Bio-diversi-tät	Ernte	Total	Ge-sund-heit	Ge-bäude	Wald	Bio-diversi-tät	Ernte	Total	Ge-sund-heit	Ge-bäude	Wald	Bio-diversi-tät	Ernte	Total
Haushalte, Gewerbe, Dienstleistungen	88.0	7.5	0.1	0.2	-	95.9	87.0	5.3	0.1	0.3	-	92.7	66.9	1.1	0.1	0.2	-	68.3
Industrie	153.9	39.6	0.0	0.2	-	193.8	147.7	25.3	0.1	0.2	-	173.2	121.2	4.7	0.1	0.2	-	126.2
Land-/Waldwirtschaft	6.0	1.3	0.0	0.1	-	7.5	5.9	0.8	0.0	0.2	-	6.9	4.8	0.1	0.0	0.2	-	5.2
Verkehr	224.9	36.9	0.2	0.7	-	262.7	182.5	23.1	0.1	0.6	-	206.3	137.5	4.3	0.1	0.4	-	142.4
Keiner Gruppe zurechenbar	-	-	0.1	-	-	0.1	-	-	0.1	-	-	0.1	-	-	0.1	-	-	0.1
Total	472.9	85.3	0.4	1.3	-	559.9	423.1	54.5	0.4	1.2	-	479.1	330.5	10.2	0.3	1.1	-	342.2

Tabelle 65: Aufteilung der Kosten der Luftverschmutzung auf die Verursacherguppen.

A-5.4 Emissionen und detaillierte Ergebnisse Winterthur

Emissionen in der Stadt Winterthur [t/a]																
	NOx			NH3			NMVOC			PM10			EC			
	2005	2010	2015	2005	2010	2015	2005	2010	2015	2005	2010	2015	2005	2010	2015	
Haushalte, Gewerbe, Dienstleistungen	120.5	112.0	93.0	5.8	5.4	5.4	51.0	43.1	35.4	32.8	34.2	32.3	6.4	6.7	6.2	
Industrie	192.4	172.8	149.7	3.1	3.4	3.5	580.2	563.2	537.0	45.5	45.0	43.9	3.2	2.1	1.8	
Land-/Waldwirtschaft	11.8	11.0	9.3	54.6	55.8	53.8	9.5	8.4	7.6	4.7	4.7	4.5	0.5	0.4	0.4	
Verkehr	643.6	469.8	376.6	43.4	29.6	20.5	329.6	221.3	162.0	72.3	66.4	63.7	14.7	10.6	7.3	
Total	968.3	765.5	628.6	106.9	94.2	83.3	970.3	835.9	742.0	155.3	150.3	144.4	24.7	19.8	15.6	

Tabelle 66: Emissionen Stadt Winterthur.

Emissionen in der Stadt Winterthur, Anteile der Verursacherguppen																	
		NOx			NH3		NMVOC			PM10			EC				
		2005	2010	2015	2005	2010	2015	2005	2010	2015	2005	2010	2015	2005	2010	2015	
Haus- halte, Ge- werbe, Dienst- leistungen	Brand-/Feuerschäden	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.1%	0.1%	0.2%	1.2%	1.2%	1.3%	1.5%	1.9%	2.4%	
	Feuerungen Holz	1.8%	2.7%	3.2%	0.0%	0.0%	0.0%	1.0%	1.2%	1.3%	16.1%	17.4%	16.3%	20.8%	27.2%	31.1%	
	Feuerungen nicht Holz	10.6%	11.9%	11.5%	0.0%	0.0%	0.0%	1.5%	1.7%	1.6%	0.4%	0.4%	0.3%	0.2%	0.2%	0.2%	
	Garten/Hobby	0.0%	0.0%	0.0%	5.4%	5.7%	6.5%	2.6%	2.1%	1.7%	3.4%	3.8%	4.4%	3.2%	4.3%	6.1%	
	Total	12.4%	14.6%	14.8%	5.4%	5.7%	6.5%	5.3%	5.2%	4.8%	21.1%	22.8%	22.3%	25.7%	33.6%	39.8%	
Industrie	Baumaschinen	5.5%	5.1%	4.2%	0.0%	0.0%	0.0%	1.0%	0.7%	0.5%	13.7%	13.2%	13.6%	9.4%	8.1%	9.2%	
	Industrie - Einzelquellen	9.1%	11.6%	13.1%	1.1%	1.3%	1.5%	8.9%	10.4%	11.8%	1.0%	1.0%	1.4%	0.1%	0.1%	0.2%	
	Industrielle und gewerbliche Prozesse	3.0%	3.9%	5.1%	1.8%	2.4%	2.8%	6.0%	6.3%	6.8%	13.5%	15.1%	15.1%	0.6%	0.8%	0.9%	
	Industrielle Fahrzeuge	2.3%	2.0%	1.4%	0.0%	0.0%	0.0%	0.4%	0.3%	0.2%	1.1%	0.6%	0.3%	2.7%	1.6%	0.9%	
	Verteilung Brenn-/Treibstoffe	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	2.8%	2.6%	2.5%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	
	Verwendung von Lösemittel	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	40.8%	47.2%	50.6%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	
	Total	19.9%	22.6%	23.8%	2.9%	3.6%	4.2%	59.8%	67.4%	72.4%	29.3%	30.0%	30.4%	12.8%	10.7%	11.3%	
Land- /Waldwi- rtschaft	Waldwirtschaftl. Fahrzeuge	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%		
	Landwirtschaftliche Fahrzeuge	0.7%	0.7%	0.7%	0.0%	0.0%	0.0%	0.3%	0.3%	0.2%	2.3%	2.5%	2.5%	1.8%	2.1%	2.3%	
	Nutzflächen	0.5%	0.6%	0.7%	9.2%	10.3%	11.0%	0.6%	0.7%	0.8%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	
	Offene Verbrennung	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.1%	0.1%	0.1%	0.1%	0.1%	0.1%	
	Vieh	0.1%	0.1%	0.1%	42.0%	48.9%	53.7%	0.0%	0.0%	0.0%	0.6%	0.6%	0.5%	0.0%	0.0%	0.0%	
	Total	1.2%	1.4%	1.5%	51.1%	59.3%	64.7%	1.0%	1.0%	1.0%	3.0%	3.1%	3.1%	1.9%	2.2%	2.4%	
Verkehr	Luftfahrt	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%		
	Schiffe	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%		
	Strasse	Linkemissionen warm	56.4%	52.7%	52.3%	37.6%	29.5%	23.7%	9.0%	5.6%	3.7%	36.1%	33.0%	32.1%	52.4%	46.3%	40.0%
		Zonenemissionen Start/Stop, Tankatmung	4.9%	3.2%	1.8%	0.0%	0.0%	0.0%	23.7%	20.0%	17.6%	0.8%	0.7%	0.6%	2.7%	3.1%	2.7%
		Zonenemissionen warm	4.8%	5.0%	5.1%	3.0%	1.9%	1.0%	1.3%	0.8%	0.6%	3.3%	3.1%	3.2%	4.4%	4.0%	3.8%
	Schiene	0.5%	0.6%	0.7%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	6.4%	7.3%	8.2%	0.0%	0.0%	0.0%	
Total	66.5%	61.4%	59.9%	40.6%	31.4%	24.7%	34.0%	26.5%	21.8%	46.6%	44.1%	44.1%	59.5%	53.4%	46.5%		
Total	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%		

Tabelle 67: Emissionen in der Stadt Winterthur, Anteile der Verursacherguppen.

Aufteilung der Kosten der Luftverschmutzung auf die Verursachergruppen [Mio. CHF]																	
		NOx			NH3			NMVOC			PM10			O3			
		2005	2010	2015	2005	2010	2015	2005	2010	2015	2005	2010	2015	2005	2010	2015	
Haus- halte, Ge- werbe, Dienst- leistun- gen	Brand-/Feuerschäden	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0.4	0.3				
	Feuerungen Holz	1.5	1.9	1.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	6.3	5.4	3.2				
	Feuerungen nicht Holz	8.8	8.2	5.6	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0	0.2	0.1	0.1				
	Garten/Hobby	0.0	0.0	0.0	0.3	0.3	0.3	0.1	0.1	0.1	1.4	1.2	0.9				
	Total	10.3	10.1	7.2	0.3	0.3	0.3	0.2	0.2	0.1	8.3	7.0	4.4				
Indust- rie	Baumaschinen	4.5	3.5	2.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	5.4	4.1	2.7				
	Industrie - Einzelquellen	7.5	8.0	6.4	0.1	0.1	0.1	0.4	0.4	0.4	0.4	0.3	0.3				
	Industrielle und gewerbliche Prozesse	2.5	2.7	2.5	0.1	0.1	0.1	0.3	0.2	0.2	5.3	4.7	3.0				
	Industrielle Fahrzeuge	1.9	1.4	0.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	0.2	0.1				
	Verteilung Brenn-/Treibstoffe	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0				
	Verwendung von Lösemittel	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.8	1.9	1.5	0.0	0.0	0.0				
	Total	16.4	15.6	11.7	0.2	0.2	0.2	2.6	2.7	2.2	11.5	9.3	6.0				
Land- /Waldwi- rtschaft	Waldwirtschaftl. Fahrzeuge	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0				
	Landwirtschaftliche Fahrzeuge	0.5	0.5	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.9	0.8	0.5				
	Nutzflächen	0.4	0.4	0.3	0.6	0.6	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0				
	Offene Verbrennung	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0				
	Vieh	0.0	0.1	0.0	2.6	2.8	2.4	0.0	0.0	0.0	0.2	0.2	0.1				
	Total	1.0	1.0	0.7	3.1	3.4	2.9	0.0	0.0	0.0	1.2	1.0	0.6				
Verkehr	Luftfahrt	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0				
	Schiffe	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0				
	Linkemissionen warm	46.6	36.5	25.6	2.3	1.7	1.1	0.4	0.2	0.1	14.2	10.2	6.4				
	Strasse Zonenemissionen	Start/Stop, Tankatmung	4.0	2.2	0.9	0.0	0.0	0.0	1.0	0.8	0.5	0.3	0.2	0.1			
		Zonenemissionen warm	3.9	3.4	2.5	0.2	0.1	0.0	0.1	0.0	0.0	1.3	1.0	0.6			
	Schiene	0.4	0.4	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.5	2.3	1.6				
	Total	54.9	42.5	29.3	2.5	1.8	1.1	1.5	1.1	0.7	18.3	13.7	8.7				
Keiner Gruppe zurechenbar													0.1	0.1	0.1		
Total		82.6	69.2	48.9	6.1	5.8	4.5	4.4	4.0	3.0	39.3	30.9	19.8	0.1	0.1	0.1	

Tabelle 68: Aufteilung der Kosten der Luftverschmutzung auf die Verursachergruppen.

[Mio. CHF]	2005						2010						2015					
	Ge-sund-heit	Ge-bäude	Wald	Bio-diversi-tät	Ernte	Total	Ge-sund-heit	Ge-bäude	Wald	Bio-diversi-tät	Ernte	Total	Ge-sund-heit	Ge-bäude	Wald	Bio-diversi-tät	Ernte	Total
Haushalte, Gewerbe, Dienstleistungen	15.3	3.6	0.0	0.1	-	19.2	15.7	1.9	0.0	0.1	-	17.7	11.7	0.2	0.0	0.1	-	12.1
Industrie	25.5	5.0	0.0	0.2	-	30.7	25.1	2.5	0.0	0.2	-	27.8	19.5	0.3	0.0	0.2	-	20.1
Land-/Waldwirtschaft	4.4	0.5	0.1	0.4	-	5.4	4.6	0.3	0.1	0.4	-	5.4	3.7	0.0	0.1	0.4	-	4.3
Verkehr	68.2	8.0	0.2	0.8	-	77.2	54.6	3.6	0.2	0.6	-	59.0	38.7	0.5	0.1	0.5	-	39.8
Keiner Gruppe zurechenbar	-	-	0.1	-	-	0.1	-	-	0.1	-	-	0.1	-	-	0.1	-	-	0.1
Total	113.4	17.2	0.5	1.5	-	132.6	100.0	8.2	0.4	1.4	-	110.1	73.7	1.1	0.4	1.2	-	76.4

Tabelle 69: Aufteilung der Kosten der Luftverschmutzung auf die Verursacherguppen.

Literatur

- ARE (2014): Externe Effekte des Verkehrs 2010. Monetarisierung von Umwelt-, Unfall- und Gesundheitseffekten. Bern, Zürich, Altdorf, ecoplan/Infras im Auftrag des ARE.
- ARE (2008): Externe Kosten des Verkehrs in der Schweiz, Aktualisierung für das Jahr 2005 mit Bandbreiten. Bern, Zürich, Altdorf, ecoplan/Infras im Auftrag des ARE.
- ARE (2004a): Externe Gesundheitskostendurch verkehrsbedingte Luftverschmutzung in der Schweiz. Bern, Zürich, Altdorf, ecoplan/Infras im Auftrag des ARE.
- ARE (2004b): Verkehrsbedingte Gebäudeschäden in der Schweiz. Aktualisierung der externen Kosten 2000.
- AWEL (2013): Die Kosten der Luftverschmutzung für den Kanton Zürich, die Stadt Zürich und die Stadt Winterthur, econcept im Auftrag des AWEL.
- BAFU (Hrsg.) 2016: Jahrbuch Wald und Holz 2016. Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt-Zustand Nr. 1640: 172 S.
- BLW (2016): Agrarbericht 2012, <https://www.agrarbericht.ch/de>.
- Book of abstracts: Long-term trends and effects of air pollution on forest ecosystems, their services and sustainability. 4th ICP Forests Scientific Conference, May 2015, Ljubljana, Slovenia
- Bundesamt für Raumentwicklung (2016), Externe Kosten und Nutzen des Verkehrs in der Schweiz. Strassen-, Schienen-, Luft- und Schiffsverkehr 2010 bis 2012. ARE (2016): Externe Kosten und Nutzen des Verkehrs in der Schweiz.
- CLRTAP (2017): Guidance on mapping concentrations levels and deposition levels, Chapter 3 (Mapping critical levels for vegetation) of Manual on methodologies and criteria for modelling and mapping critical loads and levels and air pollution effects, risks and trends. UNECE Convention on Long-range Transboundary Air Pollution; accessed on [date of consultation] at www.icpmapping.org.
- CLRTAP (2016): Trends in ecosystem and health responses to longrange transported atmospheric pollutants, RAPPORT L.NR. 6946-2015.
- CLRTAP (2015): Guidance on mapping concentrations levels and deposition levels, Chapter 4 (Mapping of effects on materials) of Manual on methodologies and criteria for modelling and mapping critical loads and levels and air pollution effects, risks and trends. UNECE Convention on

Long-range Transboundary Air Pollution; accessed on [date of consultation] at www.icpmapping.org.

- ecoplan (2016): Empfehlungen zur Festlegung der Zahlungsbereitschaft für die Verminderung des Unfall- und Gesundheitsrisikos (value of statistical life). Auftraggeber: Bundesamt für Raumentwicklung ARE und Beratungsstelle für Unfallverhütung bfu.
- HRAPIE (2013): Health risks of air pollution in Europe – HRAPIE project. Recommendations for concentration–response functions for cost–benefit analysis of particulate matter, ozone and nitrogen dioxide. World health organization WHO, 2013.
- Kägi W et al. (2015): Monetarisierung des statistischen Lebens im Strassenverkehr. Forschungsprojekt VSS 2011/104 auf Antrag des Schweizerischen Verbands der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS).
- NEEDS (2007): Final Report on the monetary valuation of mortality and morbidity risks from air pollution. NEEDS RS1b, Deliverable D6.7.
- NEEDS (2008): Report on the procedure and data to generate averaged/aggregated data. RS (Research Stream) 3a, Deliverable D1.1. Excel-Tool mit Kostensätzen zu Luftschadstoffemissionen (u.a. Biodiversitätsverlusten) je Land. Online: <http://www.needs-project.org/docs/RS3a%20D1.1.zip> (18.10.2013)
- OECD (2012): Mortality Risk Valuation in Environment, Health and Transport Policies. Online: <http://www.oecd.org/environment/mortalityriskvaluationinenvironmenthealthandtransportpolicies.htm> (10.8.2015).
- 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.
- Ott et al. (2006): Assessment of biodiversity losses. Deliverable D4.2 of the NEEDS project (NEEDS: New energy externalities development for sustainability). W. Ott, M. Baur, Y. Kaufmann (ecocept AG); R. Frischknecht, R. Steiner (ESU-services). Zürich/Uster.
- Ouimet et al. (2001) Critical Loads and Exceedances of Acid Deposition and Associated Forest Growth in the Northern Hardwood and Boreal Coniferous Forests in Québec, Canada. R. Ouimet, L. Duchesne, D. Houle, P. A. Arp. Water, Air and Soil Pollution (Focus), Vol. 1, pp. 119-134.
- Schweizerischer Bundesrat (2017): Optionen zur Kompensation der Versauerung von Waldböden und zur Verbesserung der Nährstoffsituation von Wäldern -

Darstellung und Bewertung. Bericht des Bundesrates in Erfüllung des Postulats von Siebenthal (13.4201) «Rückführung von Asche in den Wald als Sofortmassnahme gegen Bodenversauerung».

Sutton et al. (2011): The European Nitrogen Assessment (ENA) – Sources, Effects and Policy Perspectives. M. A. Sutton, C. M. Howard, J. W. Erisman, G. Billen, A. Bleeker, P. Grennfelt, H. van Grinsven, B. Grizzetti (editors). Cambridge University Press. Cambridge.

Université de Genève, equiterre, Swiss TPH, EMPA, ecoplan, M.I.S. Trend (2016): Plan sectoriel de l'infrastructure aéronautique (PSIA) de l'Aéroport de Genève-Cointrin (GA) - Evaluation d'impacts sur la santé, Rapport final.

Walton et. al (2015): Understanding the Health Impacts of Air Pollution in London, Transport for London and the Greater London Authority. King's College London.

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.

WGE (Working Group on Effects) (2016): Impacts of ozone pollution on biodiversity. Working Group on Effects (WGE), UNECE Convention on Long-range Transboundary Air Pollution.