

Umwelt- und Gesundheitsschutz Stadt Zürich (UGZ)

---

# Luftschadstoffbedingte Gesundheitskosten in der Stadt Zürich

---

Schlussbericht

12. April 2022

---

**Erarbeitet durch**

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

**Autoren/innen**

Valentin Delb, Dipl. Ing. ETH  
Stephanie Bade, lic. oec. publ., Ökonomin  
Anna Hotz, MA UZH in Wirtschaftswissenschaften, Ökonomin

# Inhalt

|          |                                                                                   |           |
|----------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------|
|          | <b>Zusammenfassung</b>                                                            | <b>i</b>  |
| <b>1</b> | <b>Einleitung</b>                                                                 | <b>1</b>  |
| 1.1      | Ausgangslage und Auftrag                                                          | 1         |
| 1.2      | Analyserahmen und Berichtsinhalte                                                 | 2         |
| <b>2</b> | <b>Vorgehen und Berechnungsinputs</b>                                             | <b>4</b>  |
| 2.1      | Übersicht                                                                         | 4         |
| 2.2      | Mittlere Belastungen in der Schweiz                                               | 6         |
| 2.3      | Schwellenwerte und Belastungen in der Stadt Zürich                                | 6         |
| 2.4      | Verwendete Dosis-Wirkungs-Relationen und Varianten                                | 8         |
| 2.5      | Inzidenz- und Prävalenzraten                                                      | 10        |
| 2.6      | Kostensätze                                                                       | 10        |
| <b>3</b> | <b>Detaillierte Ergebnisse für die einzelnen Schadstoffe</b>                      | <b>12</b> |
| 3.1      | PM10                                                                              | 12        |
| 3.2      | PM2.5                                                                             | 14        |
| 3.3      | NO <sub>2</sub>                                                                   | 16        |
| <b>4</b> | <b>Fazit zu den luftschadstoffbedingten Gesundheitskosten in der Stadt Zürich</b> | <b>18</b> |
| 4.1      | Kosten und Determinanten der Kostenentwicklung                                    | 18        |
| 4.2      | Nutzen der Verbesserung der Luftqualität                                          | 19        |
| <b>5</b> | <b>Aufteilung auf die Verursachergruppen</b>                                      | <b>22</b> |
| 5.1      | Vorgehen                                                                          | 22        |
| 5.2      | Ergebnisse                                                                        | 22        |
|          | <b>Anhang</b>                                                                     | <b>25</b> |
| A-1      | Vergleich mit Studie 2018                                                         | 25        |
| A-2      | Emissionen                                                                        | 26        |
| A-3      | Immissionen                                                                       | 28        |
| A-4      | Bevölkerungsexposition                                                            | 35        |
| A-5      | Dosis-Wirkungs-Relationen                                                         | 37        |
| A-6      | Kostensätze detailliert                                                           | 45        |
| A-7      | Attributable Fälle pro 1 µg/m <sup>3</sup> zusätzliche Belastung                  | 47        |
| A-8      | Sensitivität                                                                      | 48        |

## Literatur

49

## Zusammenfassung

Trotz einer erfolgreichen Luftreinhaltepolitik, die eine deutliche Verbesserung der Luftqualität während der letzten Jahrzehnte bewirkt hat, gehört die Stadt Zürich noch immer zu den am stärksten mit Luftschadstoffen belasteten Gebieten in der Schweiz. Entsprechend den Vorgaben des Umweltschutzgesetzes sind daher weitere Verbesserungen durch luft-hygienische Massnahmen notwendig. Als wichtiger Indikator für den weiteren Handlungsbedarf dient neben den Emissions-, Immissions-, und Expositionsdaten auch die Schätzung der Schadenskosten.

Die Weltgesundheitsorganisation (WHO) hat im September 2021 ihre neuen Luftqualitätsleitlinien (Air Quality Guidelines) vorgestellt. Die empfohlenen Luftqualitätsrichtwerte liegen deutlich tiefer als die Werte aus dem Jahr 2005 und als die Immissionsgrenzwerte der Luftreinhalteverordnung. Damit wird bestätigt, dass die Luftverschmutzung auch unterhalb der in der Schweiz gültigen Grenzwerte zu Gesundheitsschäden führt.

Die Schadenskosten in der Stadt Zürich wurden zuletzt 2018 für die Jahre 2010 und 2015 ermittelt (econcept 2018<sup>1</sup>). Der Umwelt- und Gesundheitsschutz Zürich (UGZ) beauftragte econcept AG, die neuen Forschungserkenntnisse für die Ermittlung der externen Kosten der Luftverschmutzung zu verwenden und die Studie aus dem Jahr 2018 zu aktualisieren<sup>2</sup>. Für die Berechnung der Kosten der Gesundheitsschäden der Wohnbevölkerung in der Stadt Zürich der Jahre 2015 und 2020 werden die Schadstoffe Feinstaub (PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>) und Stickstoffoxide (NO<sub>2</sub>) berücksichtigt.<sup>3</sup>

Für die Schätzung luftschadstoffbedingten Gesundheitskosten werden die Auswirkungen der Luftschadstoffe auf verschiedene Gesundheitsschäden betrachtet. An den insgesamt entstehenden Kosten hat jedoch die Mortalität bei allen betrachteten Schadstoffen mit Abstand den grössten Anteil. Gleichzeitig steht die Mortalität in der Forschung stärker im Fokus als andere Gesundheitswirkungen, weswegen sich hier vergleichsweise viele Studien mit unterschiedlichen Ergebnissen finden. Daher weisen wir die luftschadstoffbedingten Gesundheitskosten in zwei Variante aus, welche sich in der Schätzung der mortalitätsbedingten Kosten unterscheiden. Für andere Gesundheitsfolgen (Asthma, Bronchitis, Herz-Kreislauferkrankungen etc.) unterscheiden sich die Varianten nicht.

Die *Best-guess-Variante* stützt sich auf neu erschienene Studien und entspricht damit der Schätzung gemäss aktuellem Kenntnisstand. Sie weist jedoch Unsicherheitsbereiche sowohl nach oben als auch nach unten auf, wobei wir von maximal +/- 25% Abweichung

---

<sup>1</sup> econcept (2018): Bade S., Montanari D., von Grünigen S.: Die Kosten der Luftverschmutzung 2005 bis 2015. econcept im Auftrag des AWEL Kanton Zürich, des UGZ Stadt Zürich und der Fachstelle Umwelt Winterthur, April 2018, Zürich.

<sup>2</sup> Die wichtigsten Änderungen bei den Berechnungsgrundlagen sind im Anhang A-1 beschrieben.

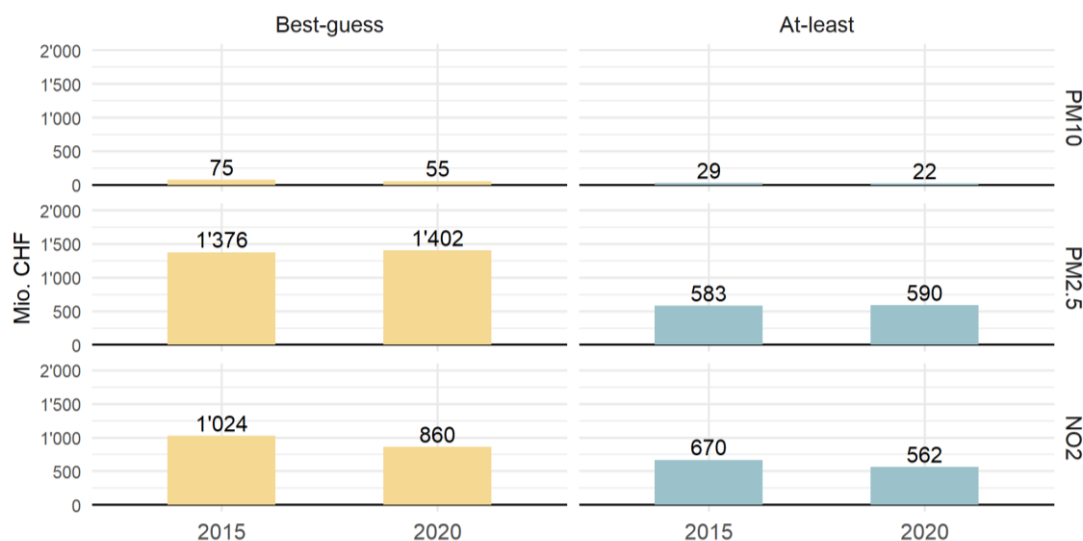
<sup>3</sup> Ein weiterer Luftschadstoff, der zu erheblichen Gesundheitsschäden führt, ist Ozon. Da der Aufwand für die Aufarbeitung von Grundlagendaten gross ist, wurde vorerst auf die Abschätzung von Gesundheitsschäden durch Ozon verzichtet.

ausgehen.<sup>4</sup> Für die *At-least-Variante* werden hingegen Schätzer verwendet, welche angesichts der neuen Erkenntnisse mit hoher Wahrscheinlichkeit zu einer Unterschätzung der luftschadstoffbedingten Gesundheitskosten führen. Die *At-least*-Schätzungen können somit als Minimalwerte interpretiert werden.

#### *Kosten der Luftverschmutzung in der Stadt Zürich*

Abbildung 1 zeigt die Gesundheitskosten in der Stadt Zürich bedingt durch PM10, PM2.5 und NO<sub>2</sub> für die beiden betrachteten Varianten Best-guess und At-least. Berücksichtigt werden je nach Schadstoff verschiedenen Gesundheitswirkungen wie z.B. Asthma, Bronchitis, Herz-Kreislauferkrankungen, etc. Den grössten Anteil an den Kosten hat jedoch die Mortalität (ca. 50 -100%). Weitere kostenrelevante Gesundheitswirkungen sind chronische Bronchitis bei Erwachsenen sowie Tage mit eingeschränkter Aktivität.

Die ausgewiesenen Kosten setzen sich aus Behandlungskosten, Produktionsausfällen und immateriellen Kosten zusammen, mit welchen das aus frühzeitigen Todesfällen und Krankheiten entstehende Leid bewertet wird. Insbesondere bei der Best-Guess-Variante und beim NO<sub>2</sub> fallen die immateriellen Kosten mit Anteilen von rund 80% bis 95% sehr stark ins Gewicht. Ein grosser Teil der luftschadstoffbedingten Gesundheitskosten erscheint demnach nicht in Wertschöpfungs- oder Haushaltsstatistiken, was ihre volkswirtschaftliche Bedeutung jedoch nicht schmälert.



econcept

Abbildung 1: Luftschadstoffbedingte Gesundheitskosten in der Stadt Zürich 2015 und 2020. Die auf Basis der verschiedenen Schadstoffe (PM10, PM2.5, NO<sub>2</sub>) geschätzten Kosten dürfen nicht addiert werden. Die PM10-bedingten Kosten werden mit hoher Wahrscheinlichkeit in beiden Varianten unterschätzt. Als Indikator für die durch feinstaubbedingten Gesundheitskosten werden daher die PM2.5-bedingten Gesundheitskosten empfohlen. Die ermittelten Werte lassen sich nicht mit den im Bericht 2018 erhobenen Kosten zu einer Zeitreihe zusammenfügen, da die Berechnungsgrundlagen unterschiedlich sind. Die Unterschiede in den Berechnungsgrundlagen werden im Anhang A-1 erklärt.

<sup>4</sup> Die statistische Unsicherheit der Best-guess-Schätzung beträgt ca. +/- 17%. Nebst der statistischen Unsicherheit bestehen in geringem Masse Unsicherheiten bei der Immissionsmodellierung und den Annahmen, die sich jedoch nicht exakt beziffern. Insgesamt gehen wir daher von einem Unsicherheitsbereich von maximal 25% aus.

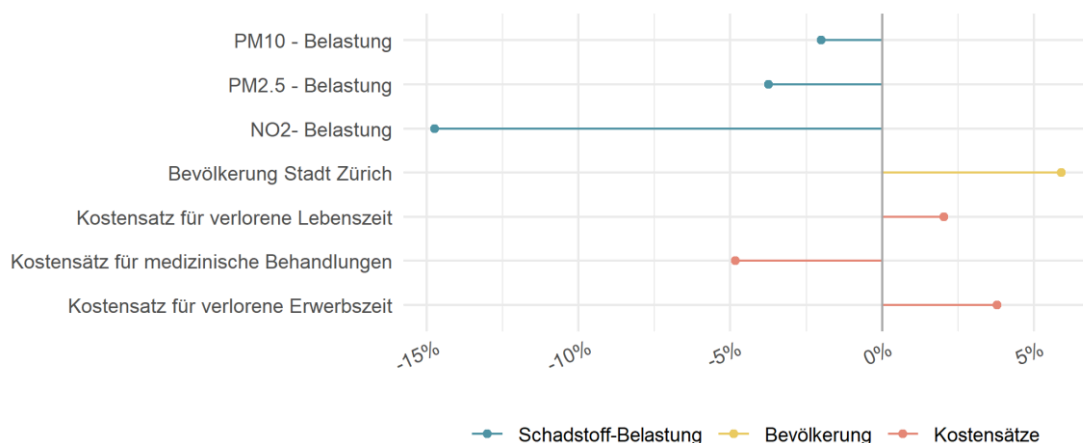
Da sich die Gesundheitswirkungen der drei betrachteten Stoffe nicht abgrenzen lassen, dürfen die Ergebnisse, welche anhand unterschiedlicher Schadstoffe ermittelt wurden, nicht addiert werden. Weiter ist davon auszugehen, dass die PM10-bedingten Gesundheitskosten anhand beider Varianten unterschätzt werden, wozu der zurzeit empfohlene Schwellenwert<sup>5</sup> von 15.0 µg/m<sup>3</sup> signifikant beiträgt. Aktuell werden mit diesem Wert nur 33% der exponierten Bevölkerung in der Stadt Zürich bei der Schätzung der PM10-bedingten Gesundheitskosten berücksichtigt.

Das Ausmass der mit den Schadstoffen PM10 und PM2.5 assoziierten Gesundheitsfolgen unterscheidet sich stark, vor allem bedingt durch die zurzeit von der WHO empfohlenen Schwellenwerte für PM10 und PM2.5. Sie führen dazu, dass der Feinstaubbelastung je nach verwendetem Schadstoff (PM10 oder PM2.5) unterschiedliche Gesundheitsfolgen zugeschrieben werden, worauf auch die WHO selbst hinweist. Die WHO empfiehlt daher explizit, die Massnahmen zur Luftreinhaltung am Schwellenwert für PM2.5 auszurichten. Daraus leiten wir ab, dass die anhand der PM10-Belastung ermittelten luftschadstoffbedingten Gesundheitskosten in urbanen Räumen wie der Stadt Zürich keine valide Schätzung darstellen. Dies zeigt sich deutlich an den Veränderungen von PM10 zwischen 2015 und 2020: In dieser Zeit ist die Belastung für wesentliche Anteile der Bevölkerung unter den Schwellenwert gefallen, so dass bei der spezifischen Expositionsverteilung ein geringer Belastungsrückgang zu einer sehr hohen Kostensenkung führt. Unabhängig von der verwendeten Variante, sind folglich als Indikator für die Schadenswirkungen der Feinstaubbelastung die PM2.5-bedingten Gesundheitskosten heranzuziehen.

Während die PM10- und NO<sub>2</sub>-bedingten Gesundheitskosten zwischen 2015 und 2020 zurückgegangen sind, zeigt sich bei PM2.5 ein Anstieg. Dies liegt an der unterschiedlichen Entwicklung der Bevölkerungsbelastung: Die PM10- und NO<sub>2</sub>-Belastungen sind genügend gesunken, um die kostentreibende Wirkung des Bevölkerungswachstums und des Anstiegs der Kostensätze für verlorene Lebens- und Erwerbszeit mehr als auszugleichen. Bei PM2.5 überwiegen jedoch die kostensteigernden Effekte, so dass trotz Rückgang der Belastung ein Anstieg der Kosten zu verzeichnen ist.

---

<sup>5</sup> Der Schwellenwert bestimmt, ab welcher Konzentration dem betrachteten Luftschadstoff gesundheitsschädliche Wirkungen beigemessen werden.

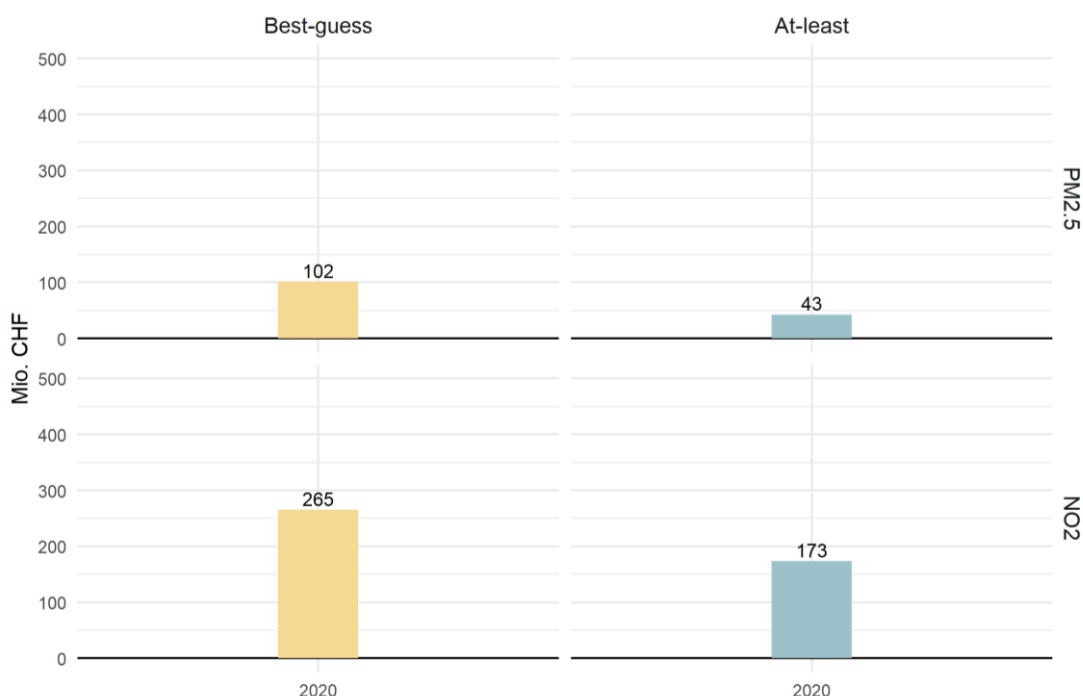


econcept

Abbildung 2: Determinanten der Kostenentwicklung. Veränderung zwischen 2020 und 2015.

### Nutzen der Verbesserung der Luftqualität (Gesundheitskosten)

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 dem tatsächlichen, sinkenden Belastungsniveau ergibt den Nutzen der Verbesserung der Luftqualität. Die Verbesserung der Luftqualität vermeidet nicht nur die hier dargestellten Kosten im Gesundheitsbereich, sondern auch Wald-, Biodiversitäts- und Gebäudeschadenskosten.



econcept

Abbildung 3: Nutzen der Verbesserung der Luftqualität. Der auf Basis der verschiedenen Schadstoffe (PM10, PM2.5, NO2) ermittelte Nutzen darf nicht addiert werden.

### *Aufteilung auf die Verursachergruppen im Jahr 2020*

Die ermittelten luftschadstoffbedingten Gesundheitskosten können auf Basis des Emissionskatasters ihren Verursachergruppen zugeordnet werden. Sowohl die anhand der Best-guess Variante ermittelten PM<sub>2.5</sub>-bedingten Gesundheitsschadenskosten, als auch die anhand der Best-guess Variante ermittelten NO<sub>2</sub>-bedingten Gesundheitskosten werden auf die Verursachergruppen aufgeteilt. Die Zuteilung der Gesundheitsschadenskosten auf die Verursachergruppen erfolgt anhand der Anteile der Verursachergruppen an den Gesamtemissionen des betrachteten Schadstoffes im Jahr 2020.

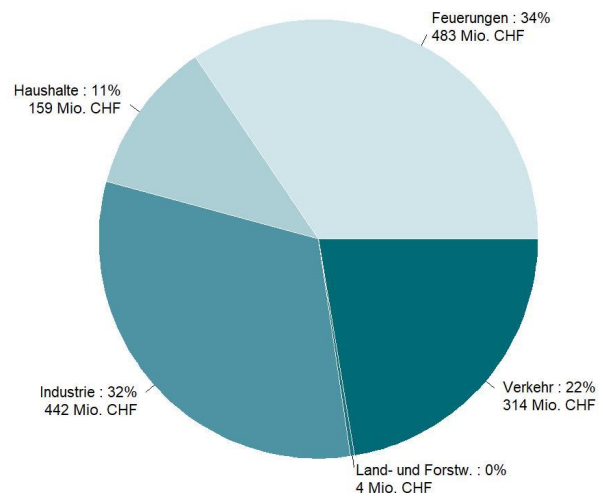
An den PM<sub>2.5</sub>-bedingten Gesundheitskosten haben die grössten Anteile die Verursachergruppen *Feuerungen* mit 34% (fast ausschliesslich Holzfeuerungen) und *Industrie* mit 32% (hauptsächlich industrielle/gewerbliche Prozesse). Auch die Verursachergruppe *Verkehr* trägt mit 22% einen erheblichen Beitrag zu den PM<sub>2.5</sub>-bedingten Gesundheitsschadenskosten bei (fast ausschliesslich motorisierter Strassenverkehr).

Fast die Hälfte der NO<sub>2</sub>-bedingten Gesundheitsschadenskosten werden der Verursachergruppe *Verkehr* zugeordnet (fast ausschliesslich motorisierter Strassenverkehr). Wie auch bei den PM<sub>2.5</sub>-bedingten Gesundheitskosten ist ein relativ grosser Anteil von 27% und 24% auf die Verursachergruppen *Industrie* (rund die Hälfte von Kehrlichtverbrennungsanlagen) und *Feuerungen* (rund zwei Drittel von Öl- und Gasfeuerungen) zurückzuführen,

Unabhängig vom berücksichtigten Schadstoff tragen die Verursachergruppen *Haushalte* und *Land- und Forstwirtschaft* einen kleinen Anteil an den Gesundheitsschadenskosten bei.

## Aufteilung auf die Verursachergruppen im Jahr 2020

### PM2.5



### NO2

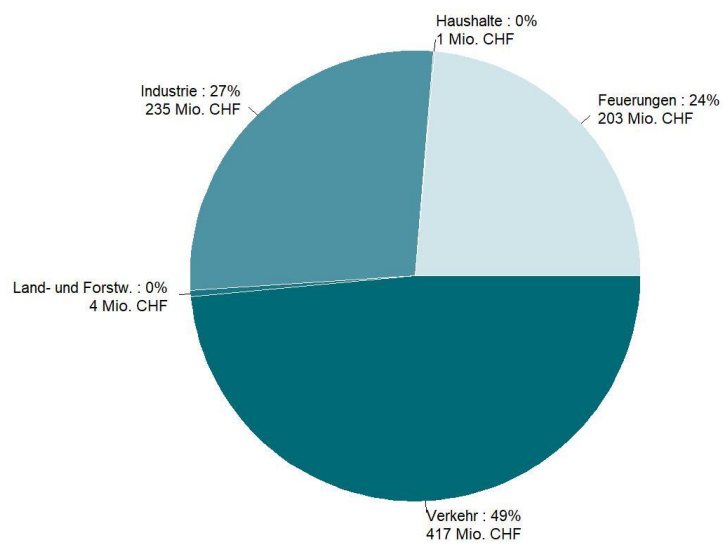


Abbildung 4: Aufteilung der Gesundheitskosten der Luftverschmutzung auf die Verursachergruppen im Jahr 2020. Ergebnisse gerundet. Die Frankenbeträge gelten unter Verwendung der anhand der Best-guess Variante geschätzten Gesundheitsschadenskosten.

# 1 Einleitung

## 1.1 Ausgangslage und Auftrag

Trotz einer erfolgreichen Luftreinhaltepolitik, die eine deutliche Verbesserung der Luftqualität während der letzten Jahrzehnte bewirkt hat, gehört die Stadt Zürich noch immer zu den am stärksten mit Luftschadstoffen belasteten Gebieten in der Schweiz. Entsprechend den Vorgaben des Umweltschutzgesetzes (USG) sind daher weitere Verbesserungen durch lufthygienische Massnahmen notwendig. Als wichtiger Indikator für den weiteren Handlungsbedarf dient neben den Emissions-, Immissions-, und Expositionsdaten auch die Schätzung der Schadenskosten.

Die Weltgesundheitsorganisation (WHO) hat im September 2021 ihre neuen Luftqualitätsleitlinien (Air Quality Guidelines) vorgestellt. Die empfohlenen Luftqualitätsrichtwerte liegen deutlich tiefer als die Werte aus dem Jahr 2005 und als die Immissionsgrenzwerte der Luftreinhalteverordnung, wie die untenstehende Tabelle zeigt. Damit wird bestätigt, dass die Luftverschmutzung auch unterhalb der in der Schweiz gültigen Grenzwerte zu Gesundheitsschäden führt.

| Schadstoff                            | Mittelungszeit                 | AQG-Richtwert 2005 | AQG-Richtwert 2021 | Grenzwert Schweiz LRV (2013) |
|---------------------------------------|--------------------------------|--------------------|--------------------|------------------------------|
| PM <sub>2,5</sub> , µg/m <sup>3</sup> | Jahr                           | 10                 | 5                  | 10                           |
|                                       | 24 Stunden <sup>a</sup>        | 25                 | 15                 | -                            |
| PM <sub>10</sub> , µg/m <sup>3</sup>  | Jahr                           | 25                 | 15                 | 20                           |
|                                       | 24 Stunden <sup>a</sup>        | 50                 | 45                 | 50                           |
| O <sub>3</sub> , µg/m <sup>3</sup>    | Sommersaison <sup>b</sup>      | -                  | 60                 | -                            |
|                                       | 8 Stunden Maximum <sup>a</sup> | 100                | 100                | 120 (1h)                     |
| NO <sub>2</sub> , µg/m <sup>3</sup>   | Jahr                           | 40                 | 10                 | 30                           |
|                                       | 24 Stunden <sup>a</sup>        | 0                  | 25                 | 80                           |
| SO <sub>2</sub> , µg/m <sup>3</sup>   | 24 Stunden <sup>a</sup>        | 20                 | 40                 | 100 (30 1y)                  |
| CO, mg/m <sup>3</sup>                 | 24 Stunden <sup>a</sup>        | 7                  | 4                  | 8                            |

<sup>a</sup> 99-Perzentil (d. h. 3–4 Überschreitungstage pro Jahr).

<sup>b</sup> Durchschnitt des maximalen 8-Stunden-Mittelwerts der O<sub>3</sub>-Konzentration in den sechs aufeinanderfolgenden Monaten mit der höchsten O<sub>3</sub>-Konzentration im Sechsmonatsdurchschnitt.

Tabelle 1: Alte und neue WHO-Luftqualitätsleitlinien (AQG-Richtwert) und aktuelle Werte der Schweizer Luftreinhalteverordnung (Grenzwert Schweiz LRV). Quelle: Newsletter 4/2021 der Dokumentationsstelle Luft und Gesundheit LUDOK

Die Schadenskosten in der Stadt Zürich wurden zuletzt 2018 für die Jahre 2010 und 2015 ermittelt (econcept 2018<sup>6</sup>). Der Umwelt- und Gesundheitsschutz Zürich (UGZ) beauftragte

<sup>6</sup> econcept (2018): Bade S., Montanari D., von Grünigen S.: Die Kosten der Luftverschmutzung 2005 bis 2015. econcept im Auftrag des AWEL Kanton Zürich, des UGZ Stadt Zürich und der Fachstelle Umwelt Winterthur, April 2018, Zürich.

econcept AG, die neuen Forschungserkenntnisse für die Ermittlung der externen Kosten der Luftverschmutzung zu verwenden und die Studie aus dem Jahr 2018 zu aktualisieren.

## 1.2 Analyserahmen und Berichtsinhalte

### *Perimeter und Untersuchungszeitraum*

Betrachtet wird die Stadt Zürich. Dabei werden Emissions- und Immissionsdaten für die Jahren 2015 und 2020 verwendet. Im Jahr 2020 wurden die Effekte der Corona-Massnahmen (z.B. deutlich weniger Verkehr während dem ersten Lockdown) herausgerechnet.

### *Schadstoffe, Schadensbereiche und Expositionen*

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 für Gesundheit, d.h. Feinstaub PM10/PM2.5 und NO<sub>2</sub>. Betrachtet werden die Schadenswirkungen für den Schadensbereich «Gesundheit für die Wohnbevölkerung». Ein weiterer Luftschadstoff, der zu erheblichen Gesundheitsschäden führt, ist Ozon. Da der Aufwand für die Aufarbeitung von Grundlagendaten (u.a. 8h-Mittel-Tageskarten) gross ist, wurde vorerst auf die Abschätzung von Gesundheitsschäden durch Ozon verzichtet. Auch der Einbezug der «exponierten Erwerbstätigen» soll erst zu einem späteren Zeitpunkt ermittelt werden. Tabelle 2 zeigt, welche Luftschadstoffe in den einzelnen Schadensbereichen berücksichtigt werden. Ammoniak (NH<sub>3</sub>) und flüchtige organische Verbindungen (NMVOC) werden nicht direkt in den Kostenberechnungen, jedoch bei der Aufteilung der Kosten auf die einzelnen Verursachergruppen berücksichtigt.

| Schadstoffe und Schadensbereiche |      |       |                 |                 |       |
|----------------------------------|------|-------|-----------------|-----------------|-------|
| Schadstoffe                      |      |       |                 |                 |       |
| Schadensbereiche                 | PM10 | PM2.5 | NO <sub>x</sub> | NH <sub>3</sub> | NMVOC |
| Gesundheit                       | x    | x     | x               | (x)             | (x)   |

Tabelle 2: 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, wird bei der Zuordnung der Kosten der Luftverschmutzung zu den verschiedenen Verursachergruppen das Territorialprinzip verwendet. Demnach werden alle Immissionen innerhalb der 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 die Validität der für die Ermittlung der Kosten der Luftverschmutzung verfügbaren Grundlagen sind unterschiedlich. Für die luftschadstoffbedingte Mortalität werden zwei Varianten betrachtet, welche sich in den verwendeten Dosis-Wirkungs-

Relationen unterscheiden: Die *Best-guess-Variante* stützt sich auf neu erschienene Studien und entspricht damit der Schätzung gemäss aktuellem Kenntnisstand. Sie weist jedoch Unsicherheitsbereiche sowohl nach oben als auch nach unten auf, wobei wir von maximal +/- 25% Abweichung ausgehen.<sup>7</sup> Für die *At-least-Variante* werden hingegen Schätzer verwendet, welche angesichts der neuen Erkenntnisse mit hoher Wahrscheinlichkeit zu einer Unterschätzung der luftschadstoffbedingten Gesundheitskosten führen. Die At-least-Schätzungen können somit als Minimalwerte interpretiert werden.

#### *Sensitivitätsbetrachtungen*

Für die Sensitivitätsanalyse werden anstelle der Effektschätzer deren 95%-Konfidenzintervalle für die Ermittlung der luftschadstoffbedingten Gesundheitskosten verwendet.

#### *Fachlicher Austausch mit LUDOK*

Für das vorliegende Projekt hat ein fachlicher Austausch mit Vertretern der LUDOK<sup>8</sup> (Meltem Kutlar und Ron Kappeler) stattgefunden, in welchem die verwendbaren Grundlagen und das Vorgehen zur Berechnung der luftschadstoffbedingten Gesundheitskosten diskutiert wurden. Thematisiert wurden dabei vor allem die Eignung der verschiedenen publizierten Effektschätzer für die Schweiz sowie die korrekte Höhe der Schwellenwerte. Insbesondere mit dem Einbezug der im ELAPSE-Projekt ermittelten Effektschätzer (ELAPSE 2021) und der Verwendung der neu durch die WHO empfohlenen Schwellenwerte (WHO 2021) wurden die Empfehlungen der LUDOK umgesetzt. Wir danken Meltem Kutlar und Ron Kappeler für die fachliche Unterstützung und Beratung.

---

<sup>7</sup> Die statistische Unsicherheit der Best-guess-Schätzung beträgt +/- 17%. Nebst der statistischen Unsicherheit bestehen in geringem Masse Unsicherheiten bei der Immissionsmodellierung und den Annahmen, die sich jedoch nicht exakt beziffern. Insgesamt gehen wir daher von einem Unsicherheitsbereich von maximal 25% aus.

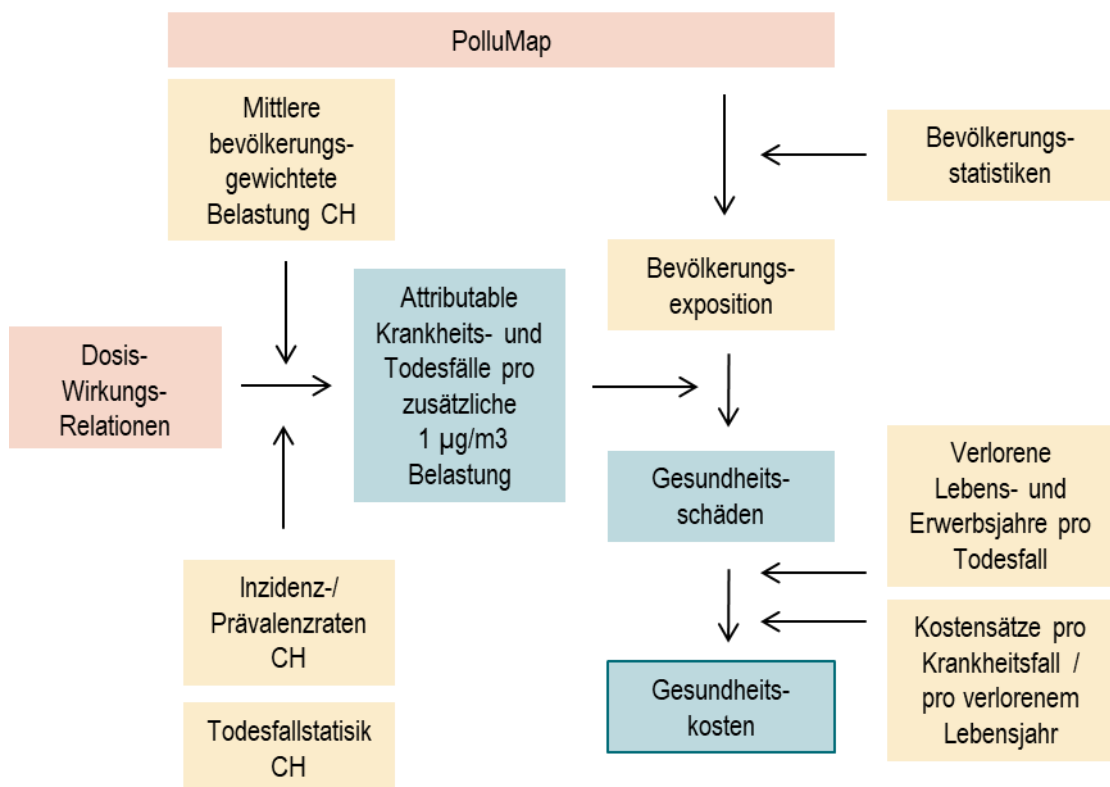
<sup>8</sup> Die Dokumentationsstelle Luftverschmutzung und Gesundheit (LUDOK) des Swiss Tropical and Public Health Institute (TPH) sammelt und sichtet nationale und internationale Publikationen zum Thema Luft und Gesundheit.

## 2 Vorgehen und Berechnungsinputs

### 2.1 Übersicht

In der Vergangenheit wurden die luftschadstoffbedingten Gesundheitskosten in der Stadt Zürich bereits mehrmals erhoben, zuletzt in den Jahren 2018 und 2013. Die Methodik (Abbildung 5) ist dabei nach wie vor dieselbe. Allerdings wurden die Berechnungsinputs dem aktuellen Kenntnissstand angepasst (Tabelle 3).

#### Übersicht Vorgehen Kostenschätzung



econcept

Abbildung 5: Vorgehen zur Ermittlung der Gesundheitsschadenskosten

gelb: Daten

rot: Modelle und Relationen

blau: Zwischenergebnisse und Ergebnisse

Die Schätzung der luftschadstoffbedingten Gesundheitskosten erfolgt nach den folgenden Schritten:

- *Bevölkerungsexposition*: Auf Basis von Schadstoffemissionen, Immissionsmodellen/-karten und Bevölkerungsstatistiken wird die Bevölkerungsexposition ermittelt.
- *Attributable Fälle pro 1 µg/m³ zusätzliche Belastung*: Die attributablen Fälle pro Belastungszunahmen werden auf Basis der aktuellen mittleren Belastungen sowie der aktuellen Inzidenz- und Prävalenzraten in der Schweiz berechnet. Weiter gehen schad-

stoffspezifische Schwellenwerte in die Berechnung ein, ab welchen von einer gesundheitsschädlichen Wirkung auszugehen ist. Da die schweizweiten Inzidenz- und Prävalenzraten als Berechnungsinput dienen, beziehen sich die attributablen Fälle pro Belastungszunahmen auf die gesamte Schweiz.

- *Gesundheitsschäden:* Anhand der attributablen Fälle pro 1 µg/m<sup>3</sup> zusätzlicher Belastung und der Bevölkerungsexposition in der Stadt Zürich können die schadstoffbedingten Gesundheitsschäden für die Stadt Zürich geschätzt werden.
- *Kosten der Gesundheitsschäden:* 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.

Tabelle 3 gibt einen Überblick über die verwendeten Berechnungsinputs für den hier vorliegenden Bericht und frühere Studien für die Stadt Zürich:

| Inputs für die Berechnung                                                                                | econcept (2013)                                                                                                                     | econcept (2018)                                                        | Vorliegender Bericht                                                               |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Betrachtungsjahre</b>                                                                                 | <b>2000 und 2010</b>                                                                                                                | <b>2005, 2010 und 2015</b>                                             | <b>2015 und 2020</b>                                                               |
| <b>Immissionsbelastung und exponierte Bevölkerung pro Immissionskategorie</b>                            | Modellierung OSTLUFT                                                                                                                | Modellierung OSTLUFT                                                   | Modellierung PolluMap (Infras/Meteotest 2020)                                      |
| <b>Dosis-Wirkungs-Relationen bzw. Effektschätzer und Schwellenwerte</b>                                  | ARE/BAFU 2004                                                                                                                       | ARE 2014<br>HRAPIE 2013                                                | ELAPSE 2021<br>WHO 2021<br>HRAPIE 2013                                             |
| <b>Inzidenz und Prävalenzraten</b>                                                                       | ARE/BAFU 2004                                                                                                                       | ARE 2014                                                               | ARE 2021                                                                           |
| <b>Durchschnittliche Anzahl verlorener Lebensjahre pro Todesfall</b>                                     | ARE/BAFU 2004                                                                                                                       | ARE 2014                                                               | ARE 2021                                                                           |
| <b>Behandlungskosten</b>                                                                                 | ARE/BAFU 2008<br>Statistik der obligatorischen Krankenversicherung (Gesundheitskostenentwicklung)                                   | ARE 2014<br>LIK (BFS), Position «Gesundheitspflege» BFS                | ARE 2021<br>LIK (BFS), Position «Gesundheitspflege» BFS                            |
| <b>Produktionsausfallkosten</b>                                                                          | ARE/BAFU 2008<br>Volkswirtschaftliche Gesamtrechnung 2010<br>Nominallohnindex BFS                                                   | ARE 2014<br>Nominallohnindex                                           | ARE 2021<br>Nominallohnindex                                                       |
| <b>Zahlungsbereitschaft zur Vermeidung eines durch Luftschadstoffe bedingten frühzeitigen Todesfalls</b> | ARE/BAFU 2008<br>NEEDS 2007: New approaches for valuation of mortality and morbidity risks due to pollution<br>Nominallohnindex BFS | OECD 2012<br>ecoplan 2016<br>Landesindex der Konsumentenpreise des BFS | ARE 2021 (basierend auf ecoplan 2016)<br>Landesindex der Konsumentenpreise des BFS |

Tabelle 3: Quellenübersicht Ermittlung Gesundheitsschadenskosten

## 2.2 Mittlere Belastungen in der Schweiz

Wie oben beschrieben, gehen in die Schätzung der attributablen Fälle *pro Belastungszunahme* die mittleren Belastungen in der Schweiz (und nicht jene in der Stadt Zürich) ein, da auch die Inzidenz- und Prävalenzraten auf Ebene Schweiz vorliegen.<sup>9</sup> Bei den mittleren Belastungen werden für beide in diesem Bericht dargestellten Erhebungsjahre dieselben Werte verwendet, da sich andernfalls die attributablen Fälle pro Belastungszunahme für die beiden betrachteten Erhebungsjahre marginal unterscheiden würden, was die Komplexität erhöht, ohne die Schätzgenauigkeit in relevantem Masse zu verbessern.<sup>10</sup>

| Schadstoff      | Aktuelle mittlere bevölkerungsgewichtete Belastung CH (2020) <sup>(A)</sup> |
|-----------------|-----------------------------------------------------------------------------|
| PM10            | 13.5                                                                        |
| PM2.5           | 9.3                                                                         |
| NO <sub>2</sub> | 17.2                                                                        |

Tabelle 4: Aktuelle mittlere bevölkerungsgewichtete Belastung in der Schweiz.

<sup>(A)</sup> Infrac/Meteotest 2020.

## 2.3 Schwellenwerte und Belastungen in der Stadt Zürich

Für die Schätzung der Gesundheitsfolgen von Luftschadstoffen muss festgelegt werden, ab welchem Schwellenwert von einer gesundheitsschädigenden Wirkung der Luftbelastung ausgegangen wird.

|                 | Bevölkerungsgewichtete Schadstoffbelastung in der Stadt Zürich |      |        |      | Schwellenwerte<br>gemäss WHO (2020) |
|-----------------|----------------------------------------------------------------|------|--------|------|-------------------------------------|
|                 | Arithmetisches Mittel                                          |      | Median |      |                                     |
| Schadstoff      | 2015                                                           | 2020 | 2015   | 2020 |                                     |
| PM10            | 15.0                                                           | 14.7 | 14.5   | 14.5 | 15.0                                |
| PM2.5           | 10.7                                                           | 10.3 | 10.5   | 10.5 | 5.0                                 |
| NO <sub>2</sub> | 25.8                                                           | 22.0 | 25.5   | 21.5 | 10.0                                |

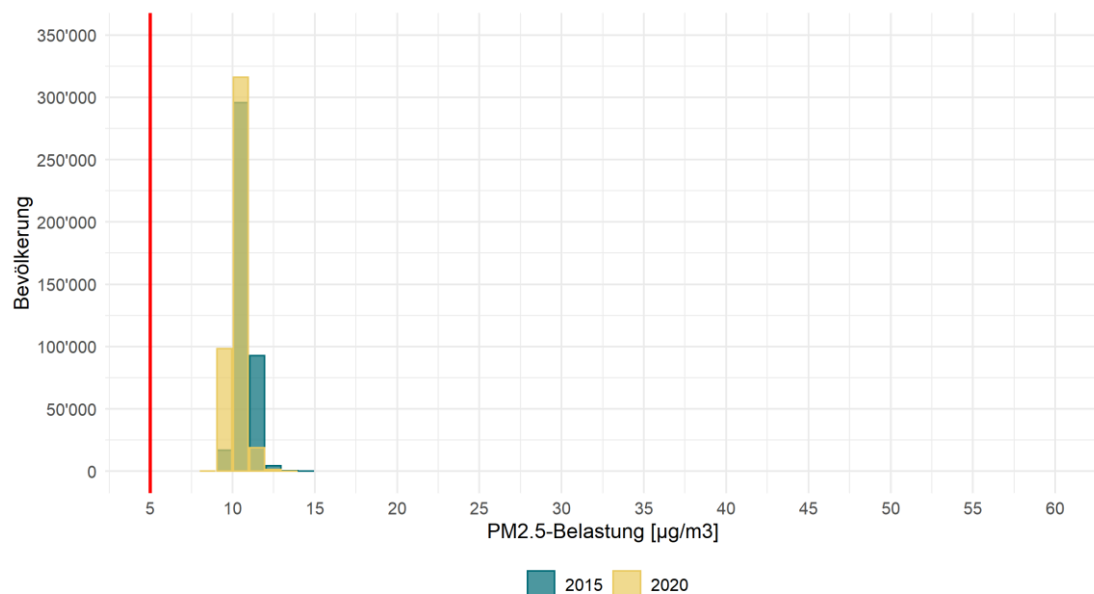
Tabelle 5: Bevölkerungsgewichtete Mittelwerte der Schadstoffbelastung in der Stadt Zürich und verwendete Schwellenwerte.

Das Ausmass der mit den Schadstoffen PM10 und PM2.5 assoziierten Gesundheitsfolgen unterscheidet sich stark. Ausschlaggebend hierfür sind insbesondere die durch die WHO empfohlenen Schwellenwerte (Tabelle 5), welche für die verschiedenen Schadstoffe unterschiedlich wirken: Für PM2.5 und NO<sub>2</sub> liegen sie deutlich unter den mittleren Belastungen in der Stadt Zürich (vgl. Tabelle 5 sowie Abbildung 6 und Abbildung 7). Dadurch werden allen in der Stadt Zürich vorkommenden Expositionen gesundheitsschädliche Wirkungen zugeschrieben. Beim PM10 führt der Schwellenwert von 15.0 µg/m<sup>3</sup> dazu, dass nur bei 33% der exponierten Bevölkerung von Gesundheitsbeeinträchtigungen ausgegangen wird

<sup>9</sup> Weitere Berechnungsinputs sind die Dosis-Wirkungsrelationen sowie die schweizweit erhobenen Inzidenz- und Prävalenzraten.

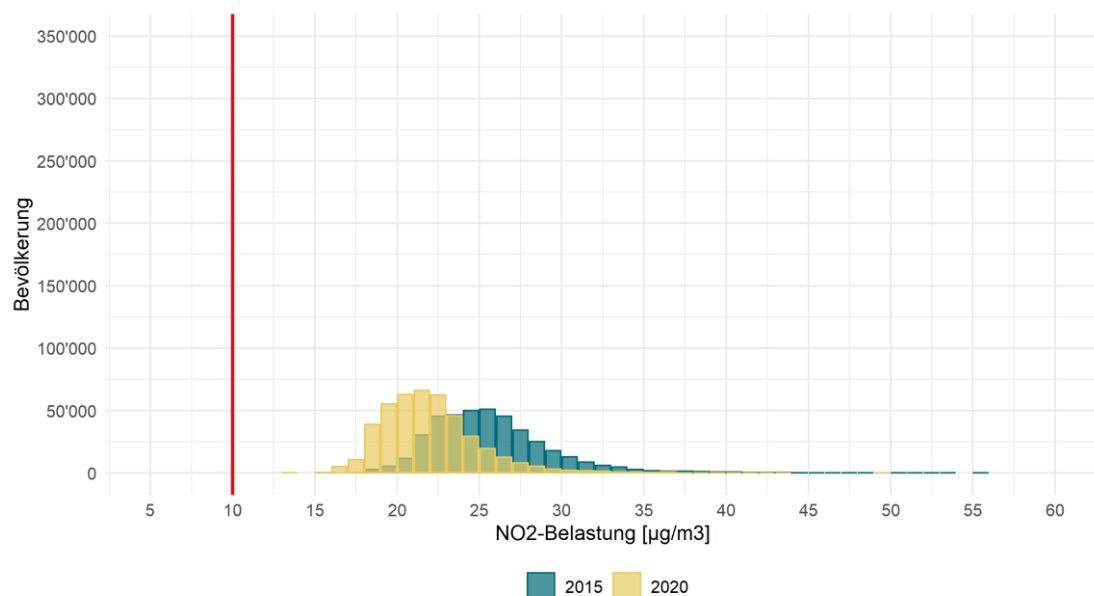
<sup>10</sup> Unterschiede in der Grössenordnung von +/- 1%, je nach Dosis-Wirkungsrelation etwas mehr oder weniger.

(vgl. Abbildung 8). Somit führen die von der WHO empfohlenen Schwellenwerte dazu, dass der Feinstaubbelastung je nach verwendetem Schadstoff (PM10 oder PM2.5) unterschiedliche Gesundheitsfolgen zugeschrieben werden, worauf auch die WHO selbst ebenfalls hinweist. Die WHO empfiehlt daher, die Massnahmen zur Luftreinhaltung am Schwellenwert für PM2.5 auszurichten.



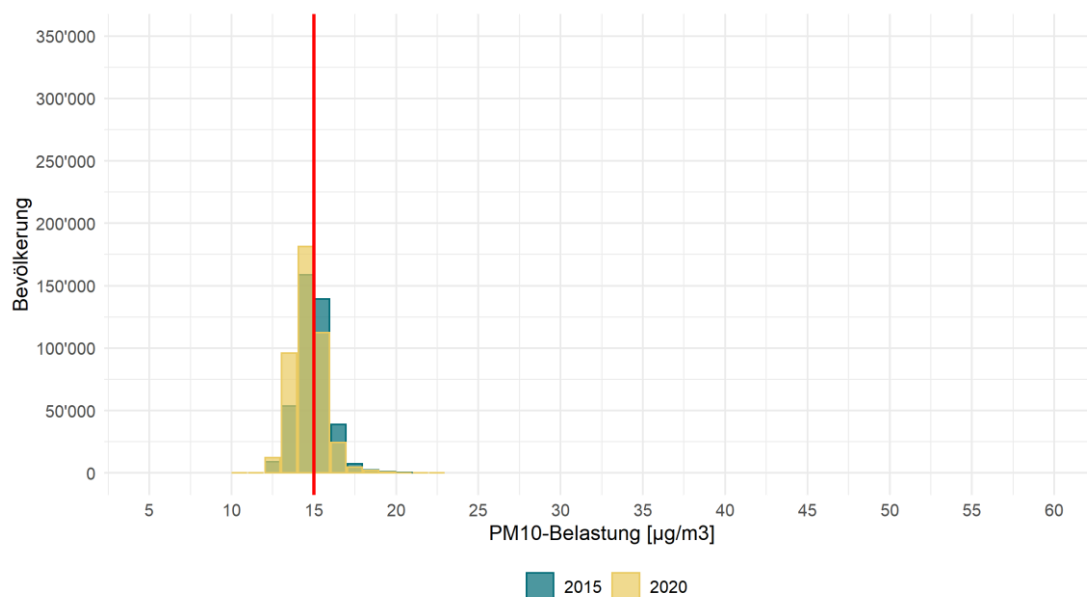
econcept

Abbildung 6: Bevölkerungsexposition in der Stadt Zürich mit PM2.5 (rote Linie = Schwellenwert WHO 2021)



econcept

Abbildung 7: Bevölkerungsexposition in der Stadt Zürich mit NO<sub>2</sub> (rote Linie = Schwellenwert WHO 2021)



econcept

Abbildung 8: Bevölkerungsexposition in der Stadt Zürich mit PM10 (rote Linie = Schwellenwert WHO 2021)

Die vollständigen Expositionsdaten finden sich im Anhang A-4.

## 2.4 Verwendete Dosis-Wirkungs-Relationen und Varianten

Das Wissen über die Gesundheitswirkungen der Luftverschmutzungen nimmt stetig zu, regelmässig werden neue Analysen und Meta-Analysen publiziert. Viele Forschungsarbeiten wurden allerdings in Regionen durchgeführt, wo deutlich höhere Belastungen zu finden sind als in der Schweiz und in der Stadt Zürich. Daher sind auch nicht alle publizierten Studien gleichermassen auf die Schweiz und die Stadt Zürich anwendbar. Die für das Projekt verwendeten Dosis-Wirkungs-Relationen wurden daher auf Basis der Kriterien «Vergleichbare Belastungssituation» und «Grösse der Datenbasis» ausgewählt. Durch das erste Kriterium wird sichergestellt, dass die verwendeten Studien für ein Gebiet mit einer nicht zu stark von der Stadt Zürich abweichenden Medianbelastung geschätzt wurden (vgl. Tabelle 5: Mittelwerte bevölkerungsgewichtete Schadstoffbelastung Stadt Zürich).<sup>11</sup> Da anhand von Meta-Studien geschätzte Dosis-Wirkungs-Relationen verwendet werden, bezieht sich das zweite Kriterium nicht nur auf eine hohe Anzahl an Individuen für eine Schätzung, sondern auch auf die Anzahl berücksichtigter Studien. Weiter wird die luftschadstoffbedingte Mortalität in zwei Varianten geschätzt, welche sich in den verwendeten Dosis-Wirkungs-Relationen unterscheiden:

<sup>11</sup> In der für die Mortalität verwendeten Metastudie weichen die mittleren Belastungen in den zugrundeliegenden Studien um um höchstens 1 µg/m³ von der Durchschnitts-Belastung in der Stadt Zürich ab. In den Metastudien für die übrigen Gesundheitswirkungen wurden Gebiete mit sehr hohen Belastungen tief gewichtet.

- *Best-guess*: Die Best-guess-Variante entspricht der Schätzung gemäss heutigem Kenntnisstand, weist jedoch Unsicherheitsbereiche sowohl nach oben als auch nach unten auf, wobei wir von maximal +/- 25% Abweichung ausgehen.<sup>12</sup>
- *At-least*: Für die At-least-Variante werden Schätzer verwendet, welche nach heutigem Kenntnisstand mit hoher Wahrscheinlichkeit zu einer Unterschätzung der luftschadstoffbedingten Gesundheitskosten führen.

Tabelle 6 und Tabelle 7 zeigen die ausgewählten Dosis-Wirkungs-Relationen bzw. Effektschätzer. Die Effektschätzer für PM2.5 und PM10 können für den jeweils anderen Schadstoff umgerechnet werden. Die Umrechnung vom Effektschätzer für PM2.5 auf den Effektschätzer für PM10 erfolgt mit dem Faktor 0.7.<sup>13</sup>

|                                                             |                                                | Einheit         | Effektschätzer<br>(Relatives Risiko <sup>(A)</sup><br>pro 10 µg/m <sup>3</sup><br>PM10) | Gemessener<br>Schadstoff | Quelle / Bemerkungen                                                                                                          |
|-------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|-----------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Best-guess                                                  | Mortalität Erwachsene                          | Fälle           | 1.182                                                                                   | PM2.5                    | ELAPSE 2021, Kohorten Studie für Europa (6 Länder) mit einer durchschnittlichen PM2.5 Belastung von 15.02 µg/m <sup>3</sup> . |
| Schätzer verwendet für Best-guess- und At-least-Schätzungen | At-least Mortalität Erwachsene                 | Fälle           | 1.043                                                                                   | PM2.5                    | HARPIE 2013                                                                                                                   |
|                                                             | Säuglingssterblichkeit                         | Fälle           | 1.040                                                                                   | PM10                     | HARPIE 2013                                                                                                                   |
|                                                             | Spitaleintritte wegen Atemwegserkrankungen     | Spitaleintritte | 1.013                                                                                   | PM2.5                    | HARPIE 2013                                                                                                                   |
|                                                             | Spitaleintritte wegen Herz/Kreislaufkrankungen | Spitaleintritte | 1.006                                                                                   | PM2.5                    | HARPIE 2013                                                                                                                   |
|                                                             | Inzidenz chronische Bronchitis bei Erwachsenen | Fälle           | 1.117                                                                                   | PM10                     | HARPIE 2013                                                                                                                   |
|                                                             | Prävalenz von Bronchitis bei Kindern           | Fälle           | 1.080                                                                                   | PM10                     | HARPIE 2013                                                                                                                   |
|                                                             | Tage mit Asthmasymptomen bei Erwachsenen       | Tage            | 1.029                                                                                   | PM10                     | HARPIE 2013                                                                                                                   |
|                                                             | Tage mit Asthmasymptomen bei Kindern           | Tage            | 1.028                                                                                   | PM10                     | HARPIE 2013                                                                                                                   |
|                                                             | Tag mit eingeschränkter Aktivität              | Tage            | 1.033                                                                                   | PM2.5                    | HARPIE 2013                                                                                                                   |

Tabelle 6: Effektschätzer für PM10. Die Umrechnung vom Effektschätzer für PM2.5 auf den Effektschätzer für PM10 erfolgt mit dem Faktor 0.7. <sup>(A)</sup> Relatives Risiko =  $P(\text{Auftreten} \mid \text{mit Risikofaktor}) / P(\text{Auftreten} \mid \text{ohne Risikofaktor})$

<sup>12</sup> Die statistische Unsicherheit der Best-guess-Schätzung beträgt +/- 17%. Nebst der statistischen Unsicherheit bestehen in geringem Masse Unsicherheiten bei der Immissionsmodellierung und den Annahmen, die sich jedoch nicht exakt beziffern. Insgesamt gehen wir daher von einem Unsicherheitsbereich von maximal 25% aus.

<sup>13</sup> Der Anteil der PM2.5-Belastung an der PM10-Belastung liegt in der Stadt Zürich im Mittel bei 0.7 (Messstation Kaserne).

|                                                    | Einheit              | Effektschätzer<br>(Relatives<br>Risiko <sup>(A)</sup><br>pro 10 µg/m <sup>3</sup> ) | Gemessener<br>Schadstoff | Quelle / Bemerkung                                                                                                                      |
|----------------------------------------------------|----------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Mortalität Erwachsene<br>(Best-guess)              | Fälle                | 1.086                                                                               | NO <sub>2</sub>          | ELAPSE 2021, Kohorten Studie für Europa (6 Länder) mit einer durchschnittlichen NO <sub>2</sub> Belastung von 25.00 µg/m <sup>3</sup> . |
| Mortalität Erwachsene<br>(At-least)                | Fälle                | 1.055                                                                               | NO <sub>2</sub>          | HARPIE 2013                                                                                                                             |
| Spitaleintritte wegen<br>Atemwegserkrankun-<br>gen | Spitalein-<br>tritte | 1.018                                                                               | NO <sub>2</sub>          | HARPIE 2013                                                                                                                             |

Tabelle 7: Effektschätzer für NO<sub>2</sub>.<sup>(A)</sup> Relatives Risiko = P(Auftreten | mit Risikofaktor) / P(Auftreten | ohne Risikofaktor)

## 2.5 Inzidenz- und Prävalenzraten

Die für die Schätzung der attributablen Fälle verwendeten Inzidenz- und Prävalenzraten werden aus ARE (2021) übernommen. Es werden für beide Erhebungsjahre dieselben Werte (Tabelle 8) verwendet, da jahresspezifische Werte die Komplexität erhöhen, ohne die Schätzgenauigkeit relevant zu verbessern.

|                                                   | Einheit         | Rate in der Bevölkerung pro<br>100'000 effektiv |
|---------------------------------------------------|-----------------|-------------------------------------------------|
| Mortalität Erwachsene                             | Fälle           | 775                                             |
| Säuglingssterblichkeit                            | Fälle           | 3                                               |
| Spitaleintritte wegen Atemwegserkrankungen        | Spitaleintritte | 980                                             |
| Spitaleintritte wegen Herz/Kreislaufkrankungen    | Spitaleintritte | 852                                             |
| Inzidenz chronische Bronchitis bei Erwachsenen    | Fälle           | 2'387                                           |
| Prävalenz von Bronchitis bei Kindern              | Fälle           | 12'441                                          |
| Tage mit Asthmasymptomen bei Erwachsenen          | Tage            | 34'337                                          |
| Tage mit Asthmasymptomen bei Kindern              | Tage            | 76'640                                          |
| Tag mit eingeschränkter Aktivität bei Erwachsenen | Tage            | 3'629'235                                       |

Tabelle 8: Inzidenz- und Prävalenzraten für Mortalität und Gesundheitsbeeinträchtigungen 2018. Quelle: ARE (2021).

## 2.6 Kostensätze

Ebenso wie die Inzidenz- und Prävalenzraten, werden auch die Kostensätze aus ARE (2021) übernommen (Tabelle 9). Die Werte des Jahres 2020 entsprechen den teuerungsangepassten Werten des Jahres 2018.<sup>14</sup> Folglich werden die luftschadstoffbedingten Gesundheitskosten zu laufenden Preisen bewertet.

<sup>14</sup> Die medizinischen Behandlungskosten wurden mit dem LIK-Gesundheitspflege, die Produktionsausfallkosten mit dem Nominallohnindex und die immateriellen Kosten mit dem LIK-Total angepasst.

| Kostensätze für Krankheits- und Todesfälle [CHF]      |           |           |           |
|-------------------------------------------------------|-----------|-----------|-----------|
|                                                       | pro       | 2015      | 2020      |
| Mortalität                                            | Todesfall | 2'516'521 | 2'609'648 |
| Verlorene Lebenszeit (immaterielle Kosten)            | Todesfall | 2'394'509 | 2'485'219 |
| Verlorene Erwerbszeit                                 | Todesfall | 117'584   | 119'969   |
| Wiederbesetzungskosten (Durchschnitt m/f)             | Todesfall | 4'429     | 4'460     |
| Spitaleintritt wegen Atemwegserkrankungen             | Fall      | 27'615    | 27'225    |
| Spitaleintritt wegen Herz-Kreislauf-erkrankungen      | Fall      | 16'453    | 16'263    |
| Chronische Bronchitis bei Erwachsenen (ab 18 Jahre)   | Fall      | 122'713   | 123'974   |
| Akute Bronchitis bei Kindern (5-17 Jahre)             | Fall      | 386       | 388       |
| Tag mit Asthmasymptomen bei Erwachsenen (ab 18 Jahre) | Tag       | 184       | 188       |
| Tag mit Asthmasymptomen bei Kindern (5-17 Jahre)      | Tag       | 94        | 94        |
| Tag mit eingeschränkter Aktivität (ab 18 Jahre)       | Tag       | 495       | 504       |

Tabelle 9: Kostensätze für Krankheits- und Todesfälle in CHF. Quelle: ARE (2021).

### 3 Detaillierte Ergebnisse für die einzelnen Schadstoffe

Die folgenden Kapitel zeigen die mit den oben beschriebenen Berechnungsinputs ermittelten attributablen Fälle und Kosten für PM10, PM2.5 und NO<sub>2</sub>. Für die Interpretation sind die folgenden Punkte zu berücksichtigen:

- *Die Ergebnisse für die verschiedenen Schadstoffe sind nicht addierbar.* Da die Dosis-Wirkungs-Relationen nicht für den Einfluss anderer Schadstoffe bereinigt sind, dürfen die für die verschiedenen Schadstoffe ermittelten Kosten nicht addiert werden. Bei der Addition von durch Feinstaub und NO<sub>2</sub>-bedingten Gesundheitskosten wäre nach aktuellem Kenntnissstand von Doppelzählungen von rund einem Drittel auszugehen.<sup>15</sup>
- *Die Kosten werden anhand von zwei Varianten geschätzt.* Die At-least-Schätzung kann als Mindestwert interpretiert werden, die Best-guess-Variante weist Unsicherheiten nach oben und unten auf.
- *Bei PM10 führt der aktuell geltende Schwellenwert bei beiden Varianten zu einer Unterschätzung der Kosten.* Wie in Abbildung 8 ersichtlich, sind bei PM10 zwei Drittel der exponierten Bevölkerung in der Stadt Zürich einer Belastung unter dem Schwellenwert von 15 µg/m<sup>3</sup> ausgesetzt, unter welchem die Gesundheitswirkungen nicht quantifiziert werden können (WHO 2021, vgl. auch Kapitel 2.4). Somit bleiben in den gezeigten Resultaten bei zwei Dritteln der exponierten Bevölkerung PM10-bedingte Gesundheitswirkungen aufgrund fehlender Quantifizierbarkeit unberücksichtigt, was zu einer Unterschätzung der PM10-bedingten Gesundheitskosten führt.
- *Für feinstaubbedingte Gesundheitskosten sind die Schätzungen für PM2.5 zu verwenden.* Die WHO (2021) weist darauf hin, dass der Schwellenwert für PM2.5 schützender wirkt als jener für PM10, da mit dem zum Schadstoffverhältnis überproportional tieferem Schwellenwert für PM2.5 (5 µg/m<sup>3</sup>) Gesundheitsschäden für tiefere Feinstaubbelastungen berücksichtigt werden als mit dem Schwellenwert für PM10 (15 µg/m<sup>3</sup>). Auch wird explizit empfohlen, bei Verfügbarkeit beider Messwerte den Schwellenwert für PM2.5 als Immissionszielwert zu verwenden. Im Einklang damit wird empfohlen, für die Abschätzung der Kosten der Feinstaubbelastung insgesamt die mit PM2.5 ermittelten Werte heranzuziehen.

#### 3.1 PM10

Tabelle 10 zeigt die für PM10 geschätzten Gesundheitswirkungen für die beiden Erhebungsjahre in der Stadt Zürich<sup>16</sup>. Dabei sind bei der Mortalität die beiden Varianten Best-guess und At-least zu unterscheiden, welche zu stark unterschiedlichen Fallzahlen führen.

<sup>15</sup> Einschätzung Meltem Kutlar und Ron Kappeler (Swiss Tropical and Public Health Institute, Dokumentationsstelle Luft und Gesundheit LUDOK) basierend auf der aktuell zur Verfügung stehenden Literatur.

<sup>16</sup> Das Zwischenresultat der geschätzten Gesundheitswirkungen pro 1 µg/m<sup>3</sup> zusätzlicher Belastung ist in Tabelle 30 in Anhang A-7 ersichtlich.

Für alle Gesundheitswirkungen und in beiden Varianten treten 2020 weniger Gesundheitsfolgen auf als 2015, bedingt durch geringere Immissionen.

|                         |                                                   | Einheit         | Geschätzte Fälle / Spitaleintritte / Tage in der Stadt Zürich |        |
|-------------------------|---------------------------------------------------|-----------------|---------------------------------------------------------------|--------|
|                         |                                                   |                 | 2015                                                          | 2020   |
| Best-guess              | Mortalität Erwachsene                             | Fälle           | 23                                                            | 17     |
| At-least                | Mortalität Erwachsene                             | Fälle           | 5                                                             | 4      |
| Best-guess              | Säuglingssterblichkeit                            | Fälle           | 0                                                             | 0      |
| Best-guess und At-least | Spitaleintritte wegen Atemwegserkrankungen        | Spitaleintritte | 2                                                             | 1      |
|                         | Spitaleintritte wegen Herz/Kreislaferkrankungen   | Spitaleintritte | 1                                                             | 1      |
|                         | Inzidenz chronische Bronchitis bei Erwachsenen    | Fälle           | 46                                                            | 33     |
|                         | Prävalenz von Bronchitis bei Kindern              | Fälle           | 163                                                           | 117    |
|                         | Tage mit Asthmasymptomen bei Erwachsenen          | Tage            | 162                                                           | 117    |
|                         | Tage mit Asthmasymptomen bei Kindern              | Tage            | 349                                                           | 251    |
|                         | Tag mit eingeschränkter Aktivität bei Erwachsenen | Tage            | 19'490                                                        | 14'033 |

Tabelle 10: Attributable Fälle durch die PM10-Belastung, berechnet mit einem Schwellenwert von 15  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , einer langfristigen mittleren Belastung von 13.5  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  in der Schweiz sowie anhand der Bevölkerungsexposition in der Stadt Zürich.

|                                                   | 2015         |              | 2020         |              |
|---------------------------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
|                                                   | Best-guess   | At-least     | Best-guess   | At-least     |
| Mortalität gesamt                                 | 59.19        | 13.86        | 44.19        | 10.35        |
| <i>Verlorene Lebensjahre</i>                      | 56.32        | 13.19        | 42.08        | 9.86         |
| <i>Verlorene Erwerbsjahre</i>                     | 2.77         | 0.65         | 2.03         | 0.48         |
| <i>Wiederbesetzungskosten</i>                     | 0.10         | 0.02         | 0.08         | 0.02         |
| Spitaleintritte wegen Atemwegserkrankungen        | 0.03         | 0.03         | 0.02         | 0.02         |
| Spitaleintritte wegen Herz/Kreislaferkrankungen   | 0.02         | 0.02         | 0.02         | 0.02         |
| Inzidenz chronische Bronchitis bei Erwachsenen    | 5.65         | 5.65         | 4.11         | 4.11         |
| Prävalenz von Bronchitis bei Kindern              | 0.06         | 0.06         | 0.05         | 0.05         |
| Tage mit Asthmasymptomen bei Erwachsenen          | 0.03         | 0.03         | 0.02         | 0.02         |
| Tage mit Asthmasymptomen bei Kindern              | 0.03         | 0.03         | 0.02         | 0.02         |
| Tag mit eingeschränkter Aktivität bei Erwachsenen | 9.66         | 9.66         | 7.07         | 7.07         |
| <b>Total</b>                                      | <b>74.67</b> | <b>29.35</b> | <b>55.50</b> | <b>21.66</b> |

Tabelle 11: Schätzung der PM10-bedingten Gesundheitskosten in der Stadt Zürich in Mio. CHF

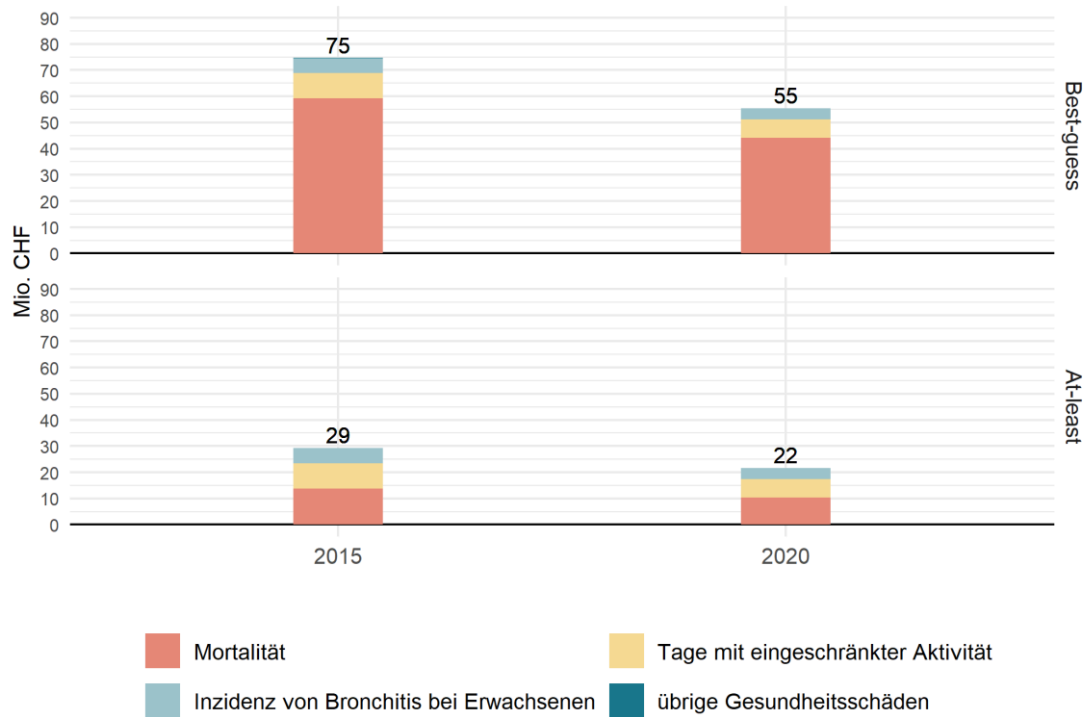
Die Bewertung der Gesundheitswirkungen mit den in Kapitel 2.6 aufgeführten Kostensätzen führt zu den in Tabelle 11 und Abbildung 9 dargestellten Kosten. Die Best-guess-Schätzung führt zu rund zweieinhalbmals höheren Kosten als die At-least-Schätzung.

Am meisten Kosten verursachen in beiden Varianten frühzeitige Todesfälle. Ihr Anteil ist allerdings bei der Best-guess-Schätzung deutlich höher. An zweiter und dritter Stelle folgen Tage mit eingeschränkter Aktivität und chronische Bronchitis bei Erwachsenen. Die Kosten der übrigen Gesundheitsfolgen fallen gering aus, so dass sie in Abbildung 9 nicht zu erkennen sind.

Bei Todesfällen und chronischer Bronchitis fallen die immateriellen Kosten sehr stark ins Gewicht (über 90% der Kosten pro Fall). Das heisst, das entstandene Leid spielt eine grosse Rolle bei der Bewertung. Bei den Tagen mit eingeschränkter Aktivität verursacht

hingegen auch die tiefere wirtschaftliche Produktivität hohe Kostenanteile (über die Hälfte der Gesamtkosten).

### PM10-bedingte Gesundheitskosten



econconcept

Abbildung 9: Schätzung der PM10-bedingten Gesundheitskosten in der Stadt Zürich in Mio. CHF. Die Kosten der übrigen Gesundheitsschäden sind vergleichsweise gering, so dass sie in der Abbildung nicht zu erkennen sind.

## 3.2 PM2.5

Obwohl PM2.5 eine stärker eingegrenzte Teilmenge des Feinstaubs ist als PM10, liegen die geschätzten Fälle, Spitaleintritte und Tage mit gesundheitlichen Einschränkungen bei PM2.5 (Tabelle 12) deutlich höher als bei PM10. Der Grund liegt zum einen in der chemischen Zusammensetzung von PM2.5, welche besonders im urbanen Raum durch einen signifikanten Russanteil gekennzeichnet ist. Zum anderen ist die Lage der jeweiligen Schwellenwerte im Verhältnis zur Expositionsverteilung in der Stadt Zürich sehr relevant (vgl. Kapitel 2.32.2).

Die Multiplikation der Fälle, Spitaleintritte und Tage mit den entsprechenden Kostensätzen (vgl. Kapitel 2.6) führt zu den in Tabelle 13 und Abbildung 10 dargestellten Kosten. Die Best-guess-Schätzung führt zu knapp zweieinhalbmals höheren Kosten als die At-least-Schätzung.

Der Hauptteil der geschätzten Kosten ist wiederum auf frühzeitige Todesfälle zurückzuführen. An zweiter und dritter Stelle folgen Tage mit eingeschränkter Aktivität und chronische

Bronchitis bei Erwachsenen. Die Kosten der übrigen Gesundheitsfolgen fallen vergleichsweise gering aus, so dass sie in Abbildung 10 nicht zu erkennen sind. Wie bei PM10 gilt auch bei den mit PM2.5 durchgeführten Kostenschätzungen, dass die immateriellen Kosten, welche das entstandene Leid abbilden, den weitaus grössten Anteil an den Gesamtkosten haben.

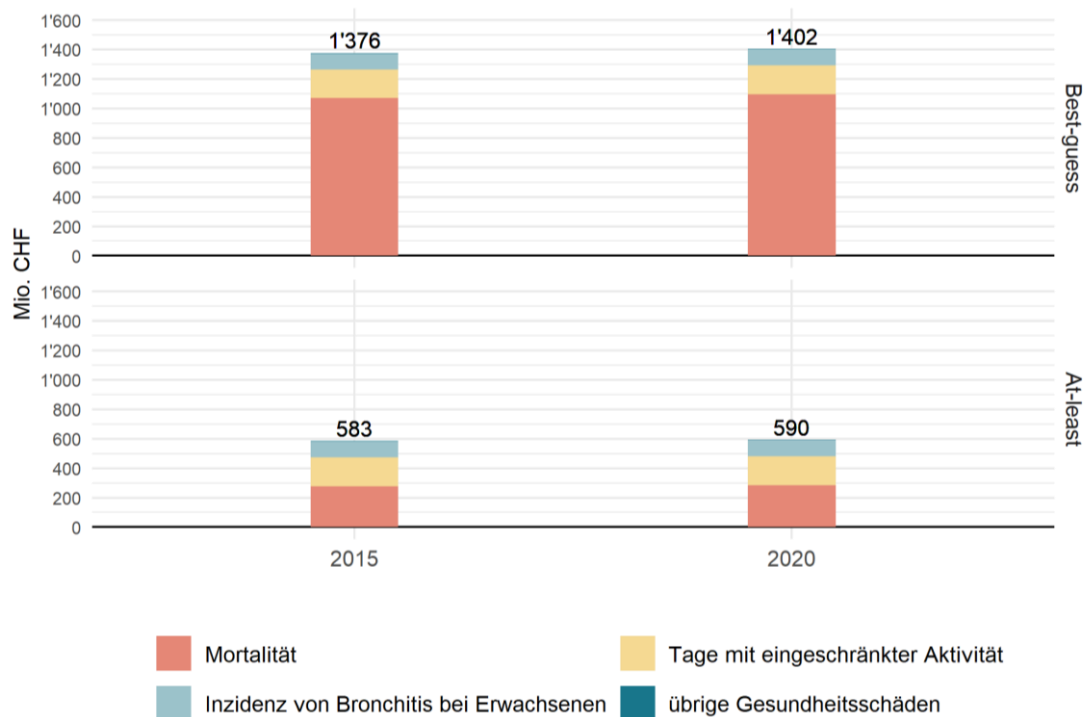
|                         |                                                   | Einheit         | Geschätzte Fälle / Spitaleintritte / Tage in der Stadt Zürich |         |
|-------------------------|---------------------------------------------------|-----------------|---------------------------------------------------------------|---------|
|                         |                                                   |                 | 2015                                                          | 2020    |
| Best-guess              | Mortalität Erwachsene                             | Fälle           | 425                                                           | 420     |
| At-least                | Mortalität Erwachsene                             | Fälle           | 110                                                           | 108     |
| Best-guess und At-least | Säuglingssterblichkeit                            | Fälle           | 0                                                             | 0       |
|                         | Spitaleintritte wegen Atemwegserkrankungen        | Spitaleintritte | 42                                                            | 42      |
|                         | Spitaleintritte wegen Herz/Kreislaferkrankungen   | Spitaleintritte | 17                                                            | 17      |
|                         | Inzidenz chronische Bronchitis bei Erwachsenen    | Fälle           | 872                                                           | 861     |
|                         | Prävalenz von Bronchitis bei Kindern              | Fälle           | 3'176                                                         | 3'137   |
|                         | Tage mit Asthmasymptomen bei Erwachsenen          | Tage            | 3'276                                                         | 3'235   |
|                         | Tage mit Asthmasymptomen bei Kindern              | Tage            | 7'064                                                         | 6'975   |
|                         | Tag mit eingeschränkter Aktivität bei Erwachsenen | Tage            | 393'037                                                       | 388'123 |

Tabelle 12: Attributable Fälle durch die PM2.5-Belastung, berechnet mit einem Schwellenwert von 5 µg/m<sup>3</sup>, einer langfristigen mittleren Belastung von 9.3 µg/m<sup>3</sup> sowie der Bevölkerungsexposition in der Stadt Zürich.

|                                                 | 2015          |              | 2020          |              |
|-------------------------------------------------|---------------|--------------|---------------|--------------|
|                                                 | Best-guess    | At-least     | Best-guess    | At-least     |
| Mortalität gesamt                               | 1'070.8       | 277.4        | 1'096.5       | 284.0        |
| <i>Verlorene Lebensjahre</i>                    | 1'018.9       | 263.9        | 1'044.2       | 270.5        |
| <i>Verlorene Erwerbsjahre</i>                   | 50.0          | 13.0         | 50.4          | 13.1         |
| <i>Wiederbesetzungskosten</i>                   | 1.9           | 0.5          | 1.9           | 0.5          |
| Spitaleintritte wegen Atemwegserkrankungen      | 0.7           | 0.7          | 0.7           | 0.7          |
| Spitaleintritte wegen Herz/Kreislaferkrankungen | 0.5           | 0.5          | 0.5           | 0.5          |
| Inzidenz chronische Bronchitis bei Erwachsenen  | 107.1         | 107.1        | 106.8         | 106.8        |
| Prävalenz von Bronchitis bei Kindern            | 1.2           | 1.2          | 1.2           | 1.2          |
| Tage mit Asthmasymptomen bei Erwachsenen        | 0.6           | 0.6          | 0.6           | 0.6          |
| Tage mit Asthmasymptomen bei Kindern            | 0.7           | 0.7          | 0.7           | 0.7          |
| Tag mit eingeschränkter Aktivität               | 194.7         | 194.7        | 195.5         | 195.5        |
| <b>Total</b>                                    | <b>1376.2</b> | <b>582.8</b> | <b>1402.4</b> | <b>589.9</b> |

Tabelle 13: Schätzung PM2.5-bedingten Gesundheitskosten in der Stadt Zürich in Mio. CHF

### PM2.5-bedingte Gesundheitskosten



econconcept

Abbildung 10: Schätzung PM2.5-bedingten Gesundheitskosten in der Stadt Zürich in Mio. CHF. Die Kosten der übrigen Gesundheitsschäden sind vergleichsweise gering, so dass sie in der Abbildung nicht zu erkennen sind.

### 3.3 NO<sub>2</sub>

Im Gegensatz zu den Schätzungen der luftschadstoffbedingten Gesundheitskosten mit PM10 und PM2.5 stehen bei NO<sub>2</sub> nur Schätzer für zwei Gesundheitsfolgen zur Verfügung: frühzeitige Todesfälle bei Erwachsenen und Spitaleintritte wegen Atemwegserkrankungen.

Tabelle 14 zeigt die für die Stadt Zürich geschätzten luftschadstoffbedingten frühzeitigen Todesfälle und Spitaltritte für die beiden angewendeten Varianten Best-guess und At-least (vgl. Kapitel 2.4).<sup>17</sup> Die Unterschiede zwischen den beiden Varianten sind bei NO<sub>2</sub> geringer als beim Feinstaub. Gleichzeitig ist der Rückgang der Fälle und Spitaleintritte über die Jahre bei NO<sub>2</sub> in beiden Varianten grösser als beim Feinstaub, da die NO<sub>2</sub>-Immissionen stärker zurückgegangen sind als die Feinstaubimmissionen.

Die Multiplikation der Fälle und Spitaleintritte mit den entsprechenden Kostensätzen (vgl. Kapitel 2.6) ergibt die in Tabelle 15 und Abbildung 11 dargestellten Kosten. Die Best-guess-Schätzung führt zu knapp eineinhalbmals höheren Kosten als die At-least-Schätzung.

<sup>17</sup> Das Zwischenresultat der geschätzten Gesundheitswirkungen pro 1 µg/m<sup>3</sup> zusätzlicher Belastung ist in Tabelle 31 in Anhang A-7 ersichtlich.

Während beim Feinstaub mehrere Gesundheitsfolgen in relevantem Mass zur Kosten-schätzung beitragen, fallen beim NO<sub>2</sub> ausschliesslich die frühzeitigen Todesfälle ins Ge-wicht. Deren Kosten bestehen hauptsächlich (zu über 90%) aus immateriellen Kosten, mit welchen das entstandene Leid bewertet wird.

|                         |                                            | Einheit         | Geschätzte Fälle / Spitalein-tritte / Tage in der Stadt Zürich |      |
|-------------------------|--------------------------------------------|-----------------|----------------------------------------------------------------|------|
|                         |                                            |                 | 2015                                                           | 2020 |
| Best-guess              | Mortalität Erwachsene                      | Fälle           | 406                                                            | 329  |
| At-least                | Mortalität Erwachsene                      | Fälle           | 265                                                            | 215  |
| Best-guess und At-least | Spitaleintritte wegen Atemwegserkrankungen | Spitaleintritte | 113                                                            | 91   |

Tabelle 14: Attributable Fälle durch die NO<sub>2</sub>-Belastung, berechnet mit einem Schwellenwert von 10 µg/m<sup>3</sup>, ei-ner langfristigen mittleren Belastung von 17.2 µg/m<sup>3</sup> in der Schweiz sowie der Bevölkerungsexpo-sition in der Stadt Zürich.

|                                            | 2015          |              | 2020         |              |
|--------------------------------------------|---------------|--------------|--------------|--------------|
|                                            | Best-guess    | At-least     | Best-guess   | At-least     |
| Mortalität gesamt                          | 1'022.5       | 668.0        | 858.1        | 560.6        |
| <i>Verlorene Lebensjahre</i>               | 973.0         | 635.6        | 817.2        | 533.9        |
| <i>Verlorene Erwerbsjahre</i>              | 47.8          | 31.2         | 39.4         | 25.8         |
| <i>Wiederbesetzungskosten</i>              | 1.8           | 1.2          | 1.5          | 1.0          |
| Spitaleintritte wegen Atemwegserkrankungen | 1.9           | 1.9          | 1.5          | 1.0          |
| <b>Total</b>                               | <b>1024.4</b> | <b>669.8</b> | <b>859.6</b> | <b>562.1</b> |

Tabelle 15: Schätzung der Kosten in Mio. CHF

### NO<sub>2</sub>-bedingte Gesundheitskosten

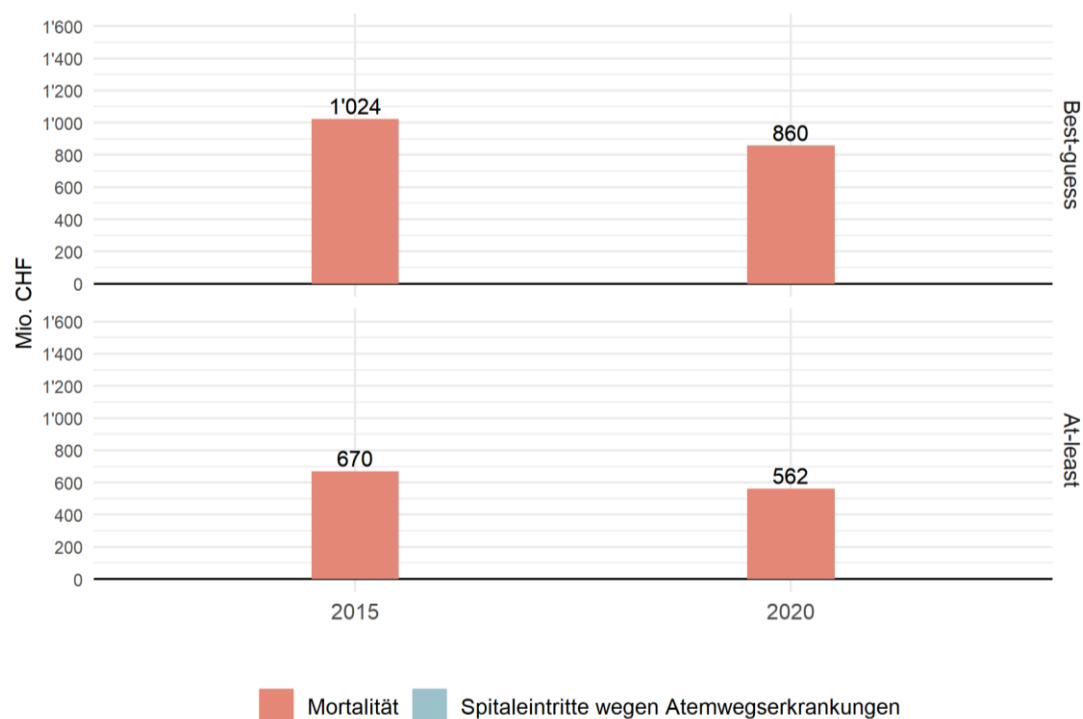


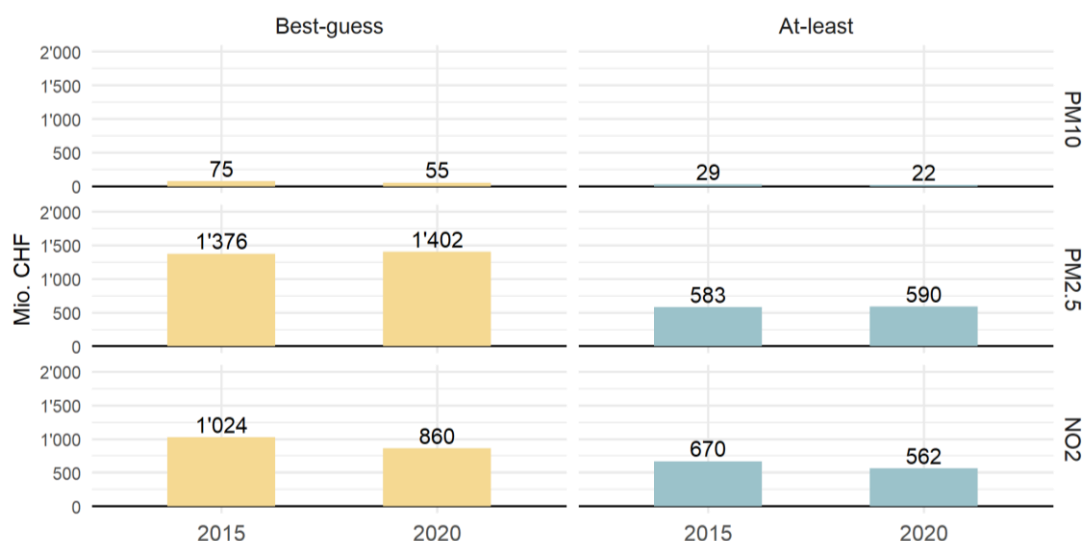
Abbildung 11: NO<sub>2</sub>-bedingte Gesundheitskosten in der Stadt Zürich in Mio. CHF. Die Kosten der Spitaleintritte sind relativ zu den mortalitätsbedingten Kosten so gering, dass sie in der Grafik nicht sichtbar sind.

## 4 Fazit zu den luftschadstoffbedingten Gesundheitskosten in der Stadt Zürich

### 4.1 Kosten und Determinanten der Kostenentwicklung

Die luftschadstoffbedingte Gesundheitskosten in den Jahren 2015 und 2020 in der Stadt Zürich wurden anhand von den drei Schadstoffen PM10, PM2.5 und NO<sub>2</sub> ermittelt. Die Best-guess-Variante zeigt jeweils die nach aktuellem Kenntnisstand geschätzten Werte, welche jedoch Unsicherheiten nach oben und nach unten aufweisen, wobei wir von maximal +/- 25% Abweichung ausgehen.<sup>18</sup> Die At-least-Variante kann jeweils als Mindestwert interpretiert werden.

#### Kosten und Kostenentwicklung



econcept

Abbildung 12: Luftschadstoffbedingte Gesundheitskosten in der Stadt Zürich 2015 und 2020.

Da sich die Gesundheitswirkungen der drei betrachteten Stoffe nicht abgrenzen lassen, dürfen die Ergebnisse nicht addiert werden. Weiter ist davon auszugehen, dass die PM10-bedingten Gesundheitskosten anhand beider Varianten unterschätzt werden. Als Indikator für die Schadenswirkungen der Feinstaubbelastung sind daher die PM2.5-bedingten Gesundheitskosten heranzuziehen.

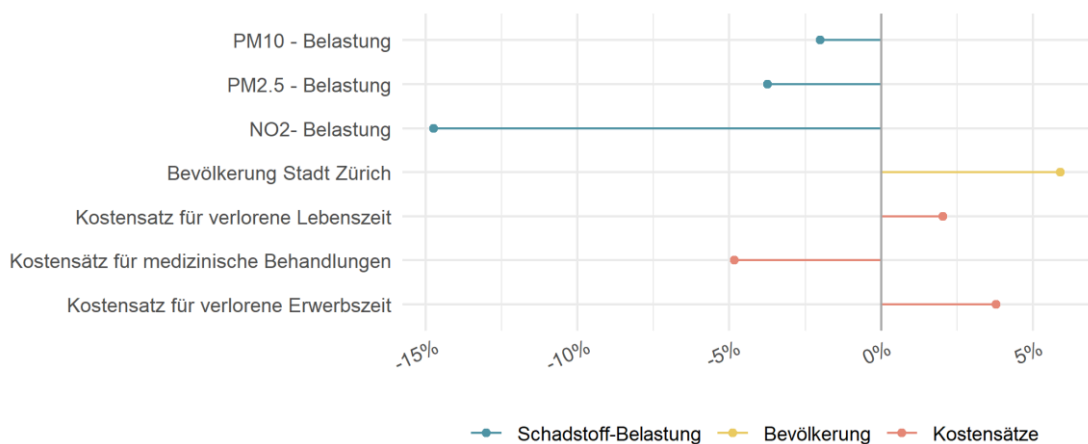
An den ausgewiesenen Kosten haben jeweils luftschadstoffbedingte frühzeitige Todesfälle hohe Anteile. Besonders gilt dies für die Best-guess-Schätzungen sowie für die NO<sub>2</sub>-bedingten Kosten. Weitere kostenrelevante Gesundheitswirkungen sind chronische Bronchitis bei Erwachsenen sowie Tage mit eingeschränkter Aktivität.

<sup>18</sup> Die statistische Unsicherheit der Best-guess-Schätzung beträgt ca. +/- 17% (vgl. Abbildung 17). Nebst der statistischen Unsicherheit bestehen in geringem Masse Unsicherheiten bei der Immissionsmodellierung und den Annahmen, die sich jedoch nicht exakt beziffern. Insgesamt gehen wir daher von einem Unsicherheitsbereich von maximal 25% aus.

Die ausgewiesenen Kosten setzen sich aus Behandlungskosten, Produktionsausfällen und immateriellen Kosten zusammen, mit welchen das aus frühzeitigen Todesfällen und Krankheiten entstehende Leid bewertet wird. Insbesondere bei der Best-Variante und beim NO<sub>2</sub> fallen die immateriellen Kosten mit Anteilen von rund 80% bis 95% sehr stark ins Gewicht. Es handelt sich folglich nicht um Kosten, die nicht in Wertschöpfungs- oder Haushaltsstatistiken auftauchen, was sie jedoch nicht minder relevant macht.

Während die PM10- und NO<sub>2</sub>-bedingten Gesundheitskosten zwischen 2015 und 2020 zurückgegangen sind, zeigt sich bei PM2.5 ein Anstieg. Dies liegt an der unterschiedlichen Entwicklung der Bevölkerungsbelastung: Die PM10- und NO<sub>2</sub>-Belastungen sind genügend gesunken, um die kostentreibende Wirkung des Bevölkerungswachstums und des Anstiegs der Kostensätze für verlorene Lebens- und Erwerbszeit mehr als auszugleichen (Abbildung 13). Bei PM10 spielt hierbei auch der Schwellenwert von aktuell 15 µg/m<sup>3</sup> eine wesentliche Rolle: Zwischen 2015 und 2020 ist die Belastung für wesentliche Anteile der Bevölkerung unter den Schwellenwert gefallen, so dass auch ein geringer Rückgang zu einer Kostensenkung führt (vgl. Kapitel 2.3). Bei PM2.5 überwiegen jedoch die kostensteigernden Effekte, so dass trotz Rückgang der Belastung ein Anstieg der Kosten zu verzeichnen ist.

### Determinanten der Kostenentwicklung



econcept

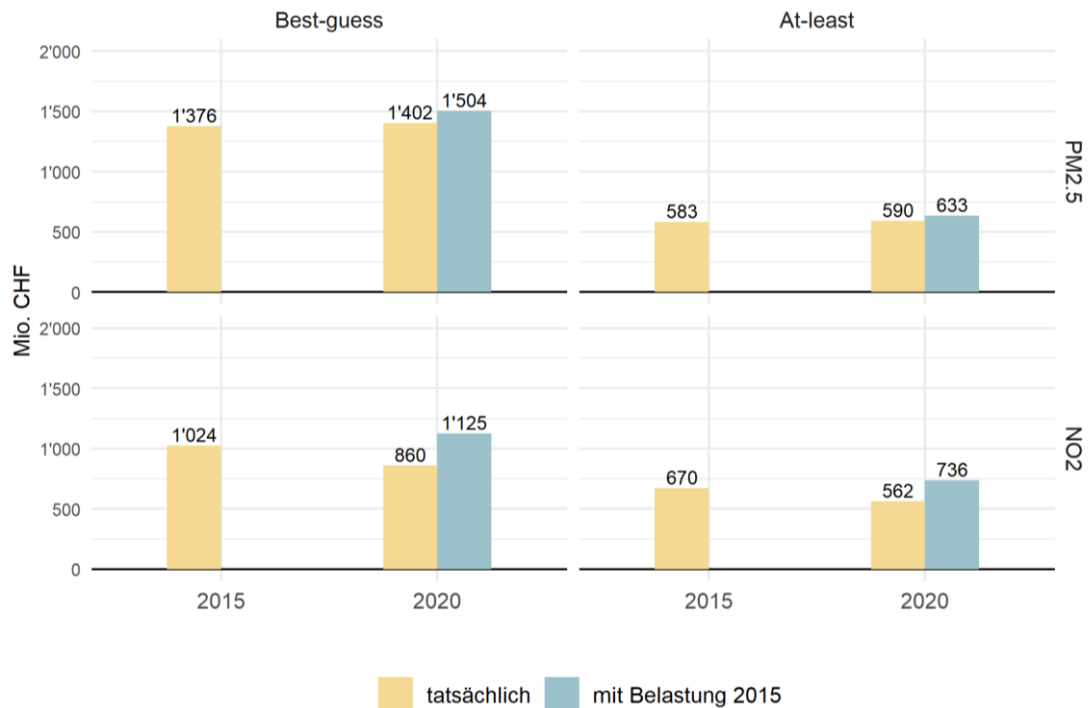
Abbildung 13: Determinanten der Kostenentwicklung. Veränderung zwischen 2020 und 2015.

## 4.2 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 dem tatsächlichen, sinkenden Belastungsniveau ergibt den Nutzen der Verbesserung der Luftqualität.

## Nutzen der Verbesserung der Luftqualität

### Kostenschätzungen mit tatsächlichen und gleichbleibenden Belastungen



### Dank der Senkung der Schadstoffbelastung vermiedene Kosten im Jahr 2020

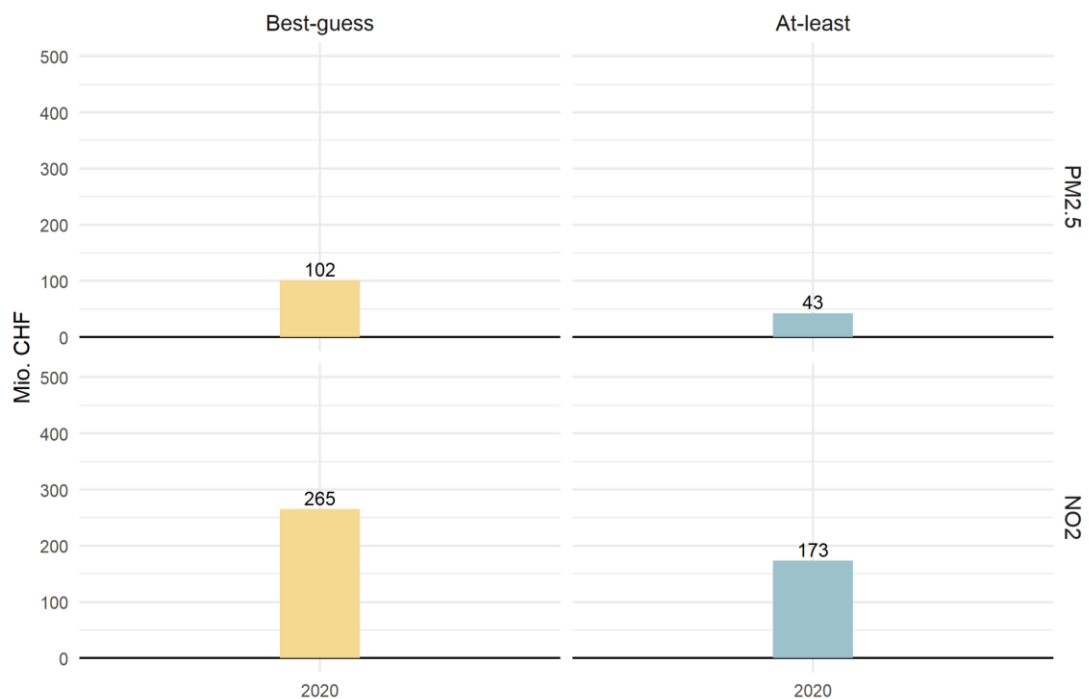


Abbildung 14: Nutzen der Verbesserung der Luftqualität

Abbildung 14 (obere Grafik) zeigt die Kostenschätzungen berechnet mit der tatsächlichen Belastungsentwicklung und mit gleichbleibend hohen Belastungen (Belastungsniveau 2015). Aus der Differenz ergeben sich jeweils die dank der Verbesserung der Luftqualität

vermiedenen Gesundheitskosten (Abbildung 14 untere Grafik), womit sich ein Teil des Nutzens der Verbesserung der Luftqualität beziffern lässt.<sup>19</sup> Wie auch die Kosten dürfen die für die verschiedenen Schadstoffe ausgewiesenen Nutzen nicht addiert werden, da ihre Gesundheitswirkungen nicht abgegrenzt werden können.

---

<sup>19</sup> Die Verbesserung der Luftqualität vermeidet nicht nur Kosten im Gesundheitsbereich, sondern auch Wald-, Biodiversitäts- und Gebäudeschadenskosten sowie Ernteaufälle.

## 5 Aufteilung auf die Verursachergruppen

### 5.1 Vorgehen

Die ermittelten luftschadstoffbedingten Gesundheitskosten können auf Basis der Emissionskataster ihren Verursachergruppen zugeordnet werden. Sowohl die anhand der Best-guess Variante ermittelten PM<sub>2.5</sub>-bedingten Gesundheitsschadenskosten, als auch die anhand der Best-guess Variante ermittelten NO<sub>2</sub>-bedingten Gesundheitskosten werden auf die Verursachergruppen aufgeteilt. Hierfür verwenden wir für die Aufteilung der Gesundheitsschadenskosten auf die Verursachergruppen die Anteile der Verursachergruppen an den Gesamtemissionen des betrachteten Schadstoffes im Jahr 2020.

### 5.2 Ergebnisse

Abbildung 15 zeigt die anhand der oben beschriebenen Berechnung ermittelte Aufteilung der PM<sub>2.5</sub>-bedingten und NO<sub>2</sub>-bedingten Gesundheitsschadenskosten auf die Verursachergruppen im Jahr 2020.

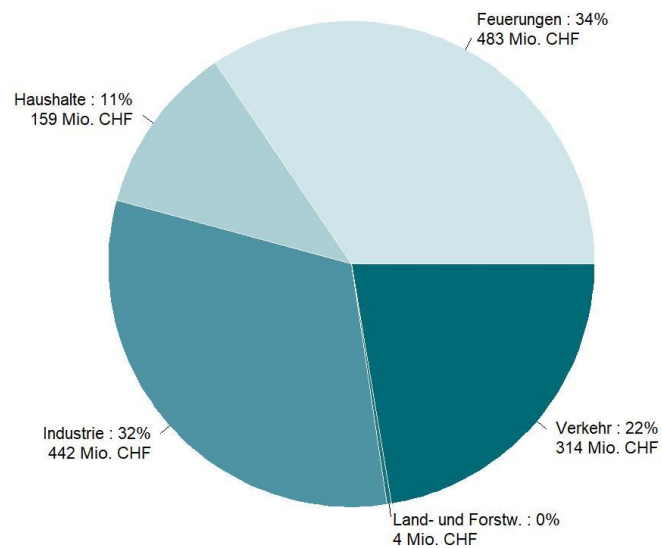
An den PM<sub>2.5</sub>-bedingten Gesundheitskosten haben die grössten Anteile die Verursachergruppen *Feuerungen* mit 34% (fast ausschliesslich Holzfeuerungen) und *Industrie* mit 32% (hauptsächlich industrielle/gewerbliche Prozesse). Auch die Verursachergruppe *Verkehr* trägt mit 22% einen erheblichen Beitrag zu den PM<sub>2.5</sub>-bedingten Gesundheitsschadenskosten bei (fast ausschliesslich motorisierter Strassenverkehr). Den *Haushalten* und der *Land- und Forstwirtschaft* werden mit 11% und 0% einen vergleichsweise geringen Anteil an den PM<sub>2.5</sub>-bedingten Gesundheitsschadenskosten zugeordnet.

Fast die Hälfte der NO<sub>2</sub>-bedingten Gesundheitsschadenskosten werden der Verursachergruppe *Verkehr* zugeordnet (fast ausschliesslich motorisierter Strassenverkehr). Wie auch bei den PM<sub>2.5</sub>-bedingten Gesundheitskosten ist ein relativ grosser Anteil von 27% und 24% auf die Verursachergruppen *Industrie* (rund die Hälfte von Kehrlichtverbrennungsanlagen) und *Feuerungen* (rund zwei Drittel von Öl- und Gasfeuerungen) zurückzuführen, während die Verursachergruppen *Haushalte* und *Land- und Forstwirtschaft* mit jeweils annähernd 0% einen vernachlässigbar kleinen Anteil ausmachen.

Tabelle 16 und Tabelle 17 zeigen die Anteile der Verursachergruppen an den PM<sub>2.5</sub>- und NO<sub>2</sub>-Emissionen für die Jahre 2015 und 2020, sowie die anhand dieser Anteile zugeordneten Gesundheitsschadenskosten pro Verursachergruppe.

## Aufteilung auf die Verursachergruppen im Jahr 2020

PM2.5



NO2

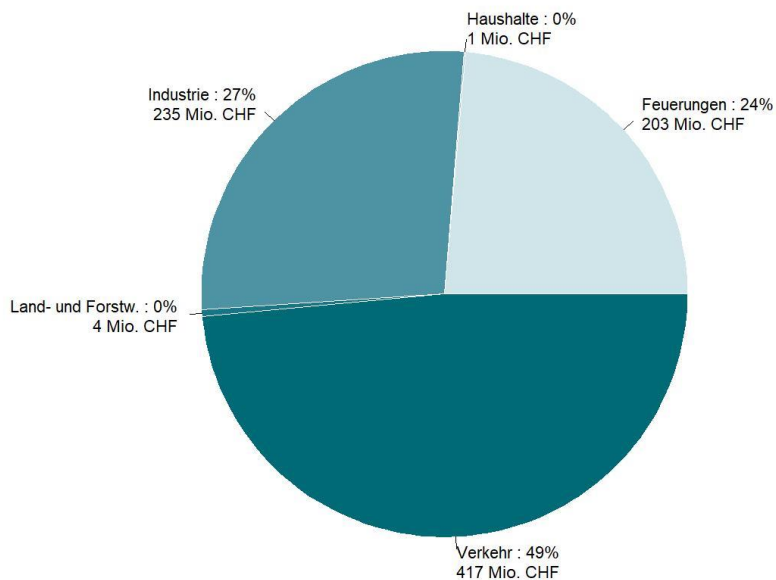


Abbildung 15: Aufteilung der Gesundheitskosten der Luftverschmutzung auf die Verursachergruppen im Jahr 2020. Ergebnisse gerundet. Die Frankenbeträge gelten unter Verwendung der anhand der Best-guess Variante geschätzten Gesundheitsschadenskosten.

|                       | 2015<br>Anteil | Mio. CHF      | 2020<br>Anteil | Mio. CHF      |
|-----------------------|----------------|---------------|----------------|---------------|
| Verkehr               | 24%            | 328.5         | 22%            | 313.5         |
| Industrie             | 27%            | 375.3         | 32%            | 442.3         |
| Feuerungen            | 39%            | 530.1         | 34%            | 483.2         |
| Haushalte             | 10%            | 137.0         | 11%            | 159.0         |
| Land-/Forstwirtschaft | 0%             | 5.3           | 0%             | 4.3           |
| <b>Total</b>          | <b>100%</b>    | <b>1376.2</b> | <b>100%</b>    | <b>1402.4</b> |

Tabelle 16: Anteile der Verursachergruppen an den anhand der Best-guess Variante geschätzten PM2.5-bedingten Gesundheitsschadenskosten für das jeweilige Jahr.

|                       | 2015<br>Anteil | Mio. CHF      | 2020<br>Anteil | Mio. CHF     |
|-----------------------|----------------|---------------|----------------|--------------|
| Verkehr               | 55%            | 564.5         | 49%            | 417.1        |
| Industrie             | 22%            | 229.4         | 27%            | 235.0        |
| Feuerungen            | 22%            | 224.9         | 24%            | 202.8        |
| Haushalte             | 0%             | 0.9           | 0%             | 0.9          |
| Land-/Forstwirtschaft | 0%             | 4.6           | 0%             | 3.8          |
| <b>Total</b>          | <b>100%</b>    | <b>1024.4</b> | <b>100%</b>    | <b>859.6</b> |

Tabelle 17: Anteile der Verursachergruppen an den anhand der Best-guess Variante geschätzten NO<sub>2</sub>-bedingten Gesundheitsschadenskosten für das jeweilige Jahr.

## Anhang

### A-1 Vergleich mit Studie 2018

Bereits 2018 wurden die luftschadstoffbedingten Gesundheitskosten in der Stadt Zürich für die Jahre 2005, 2010 und 2015 erhoben. Die damals ermittelten Werten lassen sich jedoch nicht mit den in diesem Projekt erhobenen Kosten zu einer Zeitreihe zusammenfügen, da die Berechnungsgrundlagen unterschiedlich sind. Dies zeigt sich auch daran, dass sich die Ergebnisse des damaligen und jetzigen Projektes für das Jahr 2015 unterscheiden. Die wichtigsten Änderungen bei den Berechnungsgrundlagen sind die folgenden:

- *Neues Immissionsmodell:* Die Bevölkerungsexpositionen wurden 2018 auf Basis des Immissionsmodells OSTLUFT ermittelt. Neu kommt das Modell PolluMap zur Anwendung. Die beiden Modelle führen zu etwas anderen Werten bei den Bevölkerungsexpositionen.
- *Neue Erkenntnisse zu Feinstaub:* Beim Feinstaub wurde in der Studie 2018 noch ausschliesslich PM<sub>10</sub> betrachtet. Dabei wurde basierend auf den damaligen Empfehlungen mit einem Schwellenwert von 7.5 µg/m<sup>3</sup> gerechnet. In der aktuellen Studie wurde basierend auf den aktuellen Empfehlungen der WHO (2021) bei PM<sub>10</sub> einen Schwellenwert von 15 µg/m<sup>3</sup> verwendet, wodurch massiv tiefere PM<sub>10</sub>-bedingten Gesundheitskosten resultieren. Gleichzeitig werden erstmals auch PM<sub>2.5</sub>-bedingte Gesundheitskosten ausgewiesen.
- *Neue Erkenntnisse zu Effektschätzern:* Für die Studie 2018 wurden alle Effektschätzer den damals gültigen Empfehlungen der WHO entnommen (HRAPIE 2013). Im aktuellen Bericht stützt sich die Best-guess-Varianten auf inzwischen neu erschienene Studien zu den Effektschätzern (ELAPSE 2021), welche gegenüber HRAPIE (2013) von stärkeren Gesundheitswirkungen ausgehen.
- *Aktualisierte Kostensätze:* Die Kostensätze werden nach wie vor vom ARE übernommen. Seit der Studie 2018 hat das ARE jedoch gestützt auf neue Forschungserkenntnisse Anpassungen vorgenommen. Im Vergleich zur Studie 2018 sind daher die verwendeten Kostensätze für verlorene Lebensjahre etwas und für verlorene Erwerbsjahre deutlich höher.
- *Anpassung Vorgehen Aufteilung Verursachergruppen:* Die Aufteilung der Kosten auf die Verursachergruppen erfolgte in der Studie 2018 nach einer anderen Methodik. Die mit der vorliegenden Studie ermittelten Kosten pro Verursachergruppe sind daher nicht mit den damaligen Werten konsistent und daher auch nicht vergleichbar.

## A-2 Emissionen

Quelle: Kantonaler Emissionskataster, AWEL 2021

Zuordnung zu Hauptkategorien (fett: Verursacher) gemäss Angaben UGZ

| Emissionen in Tonnen pro Jahr               | NO <sub>x</sub> |              | PM2.5      |            |
|---------------------------------------------|-----------------|--------------|------------|------------|
|                                             | 2015            | 2020         | 2015       | 2020       |
| <b>Feuerungen</b>                           | <b>381</b>      | <b>346</b>   | <b>62</b>  | <b>51</b>  |
| Feuerungen Dienstleistungen Holz und Kohle  | 93              | 94           | 54         | 45         |
| Feuerungen Dienstleistungen Öl und Gas      | 210             | 186          | 2          | 2          |
| Feuerungen Haushalte Holz und Kohle         | 6               | 7            | 5          | 4          |
| Feuerungen Haushalte Öl und Gas             | 72              | 59           | 0          | 0          |
| Feuerungen Landwirtschaft Holz              | 0               | 0            | 0          | 0          |
| <b>Haushalte</b>                            | <b>2</b>        | <b>1</b>     | <b>16</b>  | <b>17</b>  |
| Haushalte andere Brände etc                 | 0               | 0            | 0          | 0          |
| Haushalte andere Feuerwerk etc              | 1               | 1            | 12         | 13         |
| Haushalte andere Private etc                | 0               | 0            | 4          | 3          |
| Lösungsmittel Konsumprodukte                | 0               | 0            | 0          | 0          |
| Maschinen Garten und Hobby                  | 0               | 0            | 0          | 0          |
| <b>Industrie</b>                            | <b>389</b>      | <b>401</b>   | <b>44</b>  | <b>47</b>  |
| Baumaschinen                                | 23              | 14           | 4          | 4          |
| Deponien                                    | 0               | 0            | 0          | 0          |
| Flächenquellen Industrie                    | 125             | 150          | 34         | 38         |
| Industriefahrzeuge                          | 22              | 14           | 1          | 0          |
| Kläranlagen                                 | 3               | 8            | 0          | 0          |
| Kompostierung                               | 0               | 0            | 0          | 0          |
| Lösungsmittel Industrie                     | 0               | 0            | 0          | 0          |
| Pistenfahrzeuge                             | 0               | 0            | 0          | 0          |
| Punktquellen KVA                            | 176             | 176          | 0          | 0          |
| Punktquellen Zementwerke                    | 0               | 0            | 0          | 0          |
| Verluste Gasnetz                            | 0               | 0            | 0          | 0          |
| Weitere Punktquellen OL                     | 39              | 39           | 4          | 4          |
| <b>Land- und Forstwirtschaft</b>            | <b>8</b>        | <b>6</b>     | <b>1</b>   | <b>0</b>   |
| Abfallverbrennung Land- und Forstwirtschaft | 0               | 0            | 0          | 0          |
| Forstwirtschaftliche Maschinen              | 0               | 0            | 0          | 0          |
| Landwirtschaftliche Maschinen               | 4               | 3            | 0          | 0          |
| Landwirtschaftliche Nutzflächen             | 1               | 1            | 0          | 0          |
| Ställe                                      | 0               | 0            | 0          | 0          |
| Vergärung                                   | 0               | 0            | 0          | 0          |
| Weiden                                      | 1               | 1            | 0          | 0          |
| Dienstleistungen Landschaftspflege          | 1               | 1            | 0          | 0          |
| <b>Verkehr</b>                              | <b>956</b>      | <b>711</b>   | <b>38</b>  | <b>33</b>  |
| Flugverkehr Zürich                          | 0               | 0            | 0          | 0          |
| Schienenverkehr Bau-/Dienstzüge             | 3               | 2            | 1          | 1          |
| Schienenverkehr Rangieren                   | 0               | 0            | 0          | 0          |
| Schifffahrt Fährlinien                      | 0               | 0            | 0          | 0          |
| Schifffahrt Seen                            | 7               | 7            | 0          | 0          |
| Strassenverkehr                             | 911             | 674          | 36         | 31         |
| Zonenverkehr                                | 35              | 29           | 1          | 1          |
| <b>Gesamtergebnis</b>                       | <b>1'735</b>    | <b>1'466</b> | <b>160</b> | <b>149</b> |

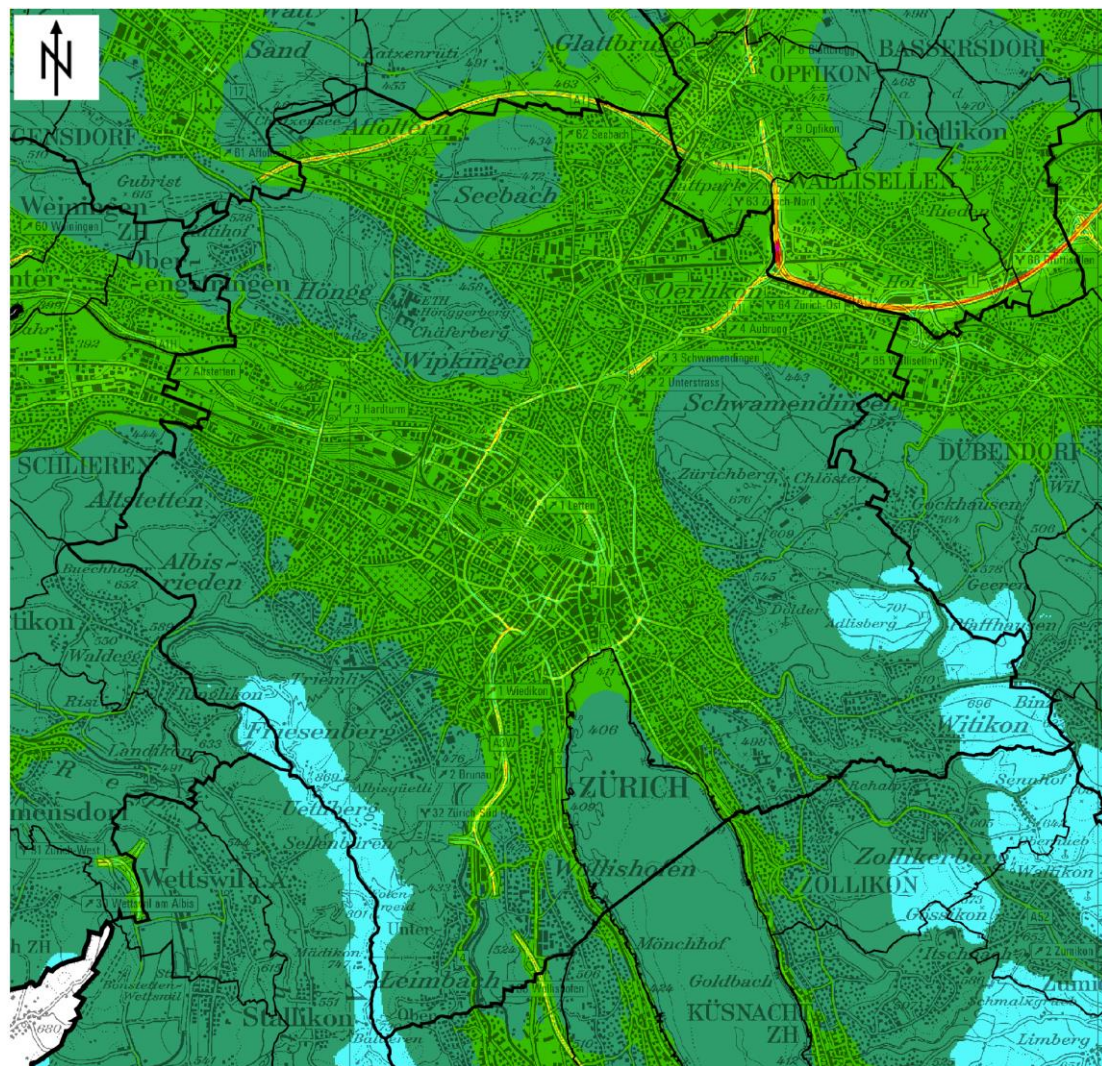
Tabelle 18: Quelle: Kantonaler Emissionskataster, AWEL 2021. Zuordnung zu Hauptkategorien (fett: Verursacher) gemäss Angaben UGZ

## A-3 Immissionen

Quelle: GIS-Browser Kanton Zürich 2021, basierend auf Infrac/Meteotest (2020)

### A-3.1 PM10-Immissionen

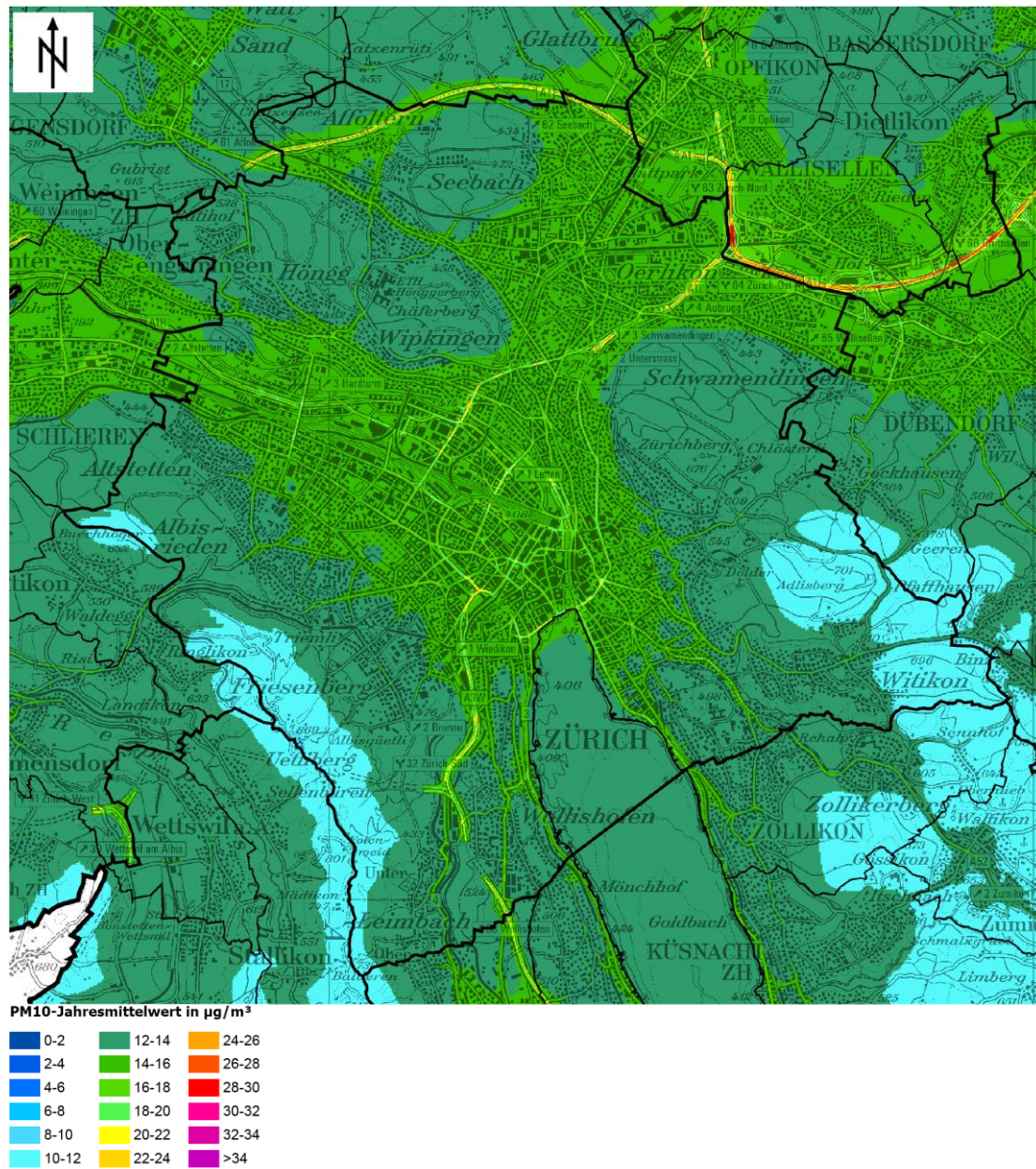
2015



PM10-Jahresmittelwert in  $\mu\text{g}/\text{m}^3$

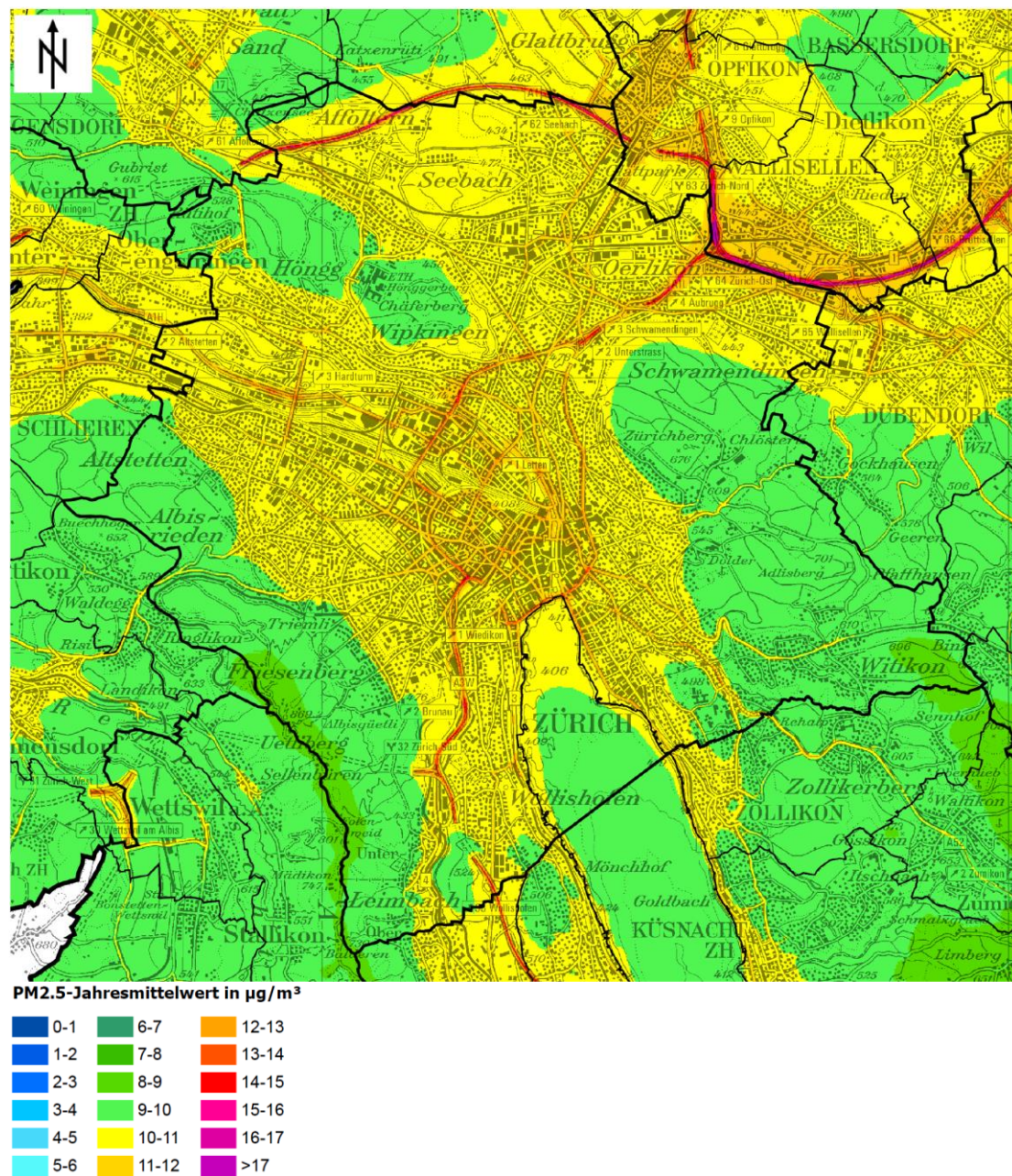
|       |       |       |
|-------|-------|-------|
| 0-2   | 12-14 | 24-26 |
| 2-4   | 14-16 | 26-28 |
| 4-6   | 16-18 | 28-30 |
| 6-8   | 18-20 | 30-32 |
| 8-10  | 20-22 | 32-34 |
| 10-12 | 22-24 | >34   |

2020

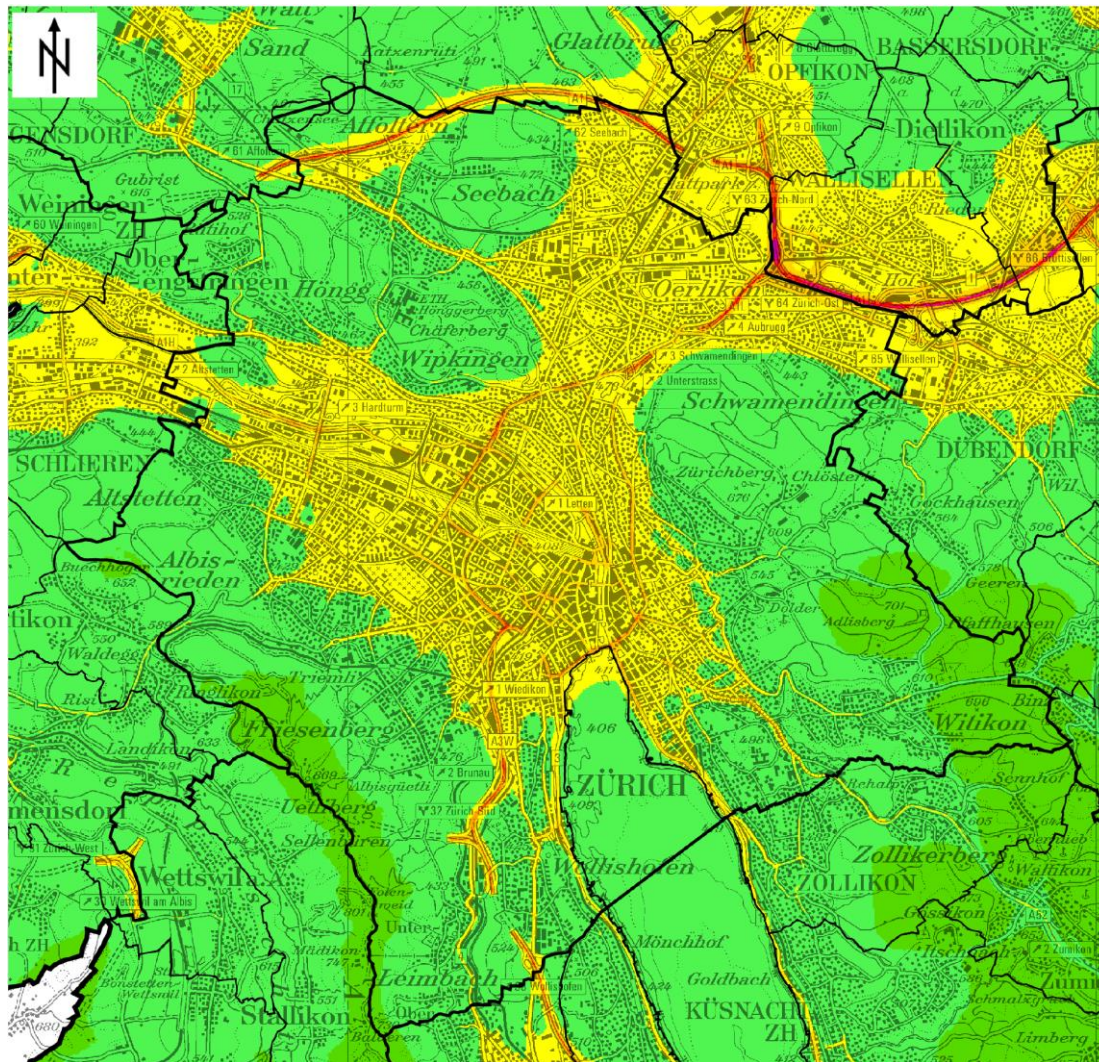
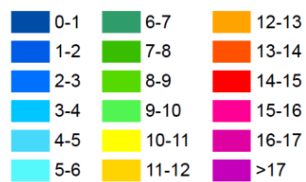


## A-3.2 PM<sub>2.5</sub>-Immissionen

2015

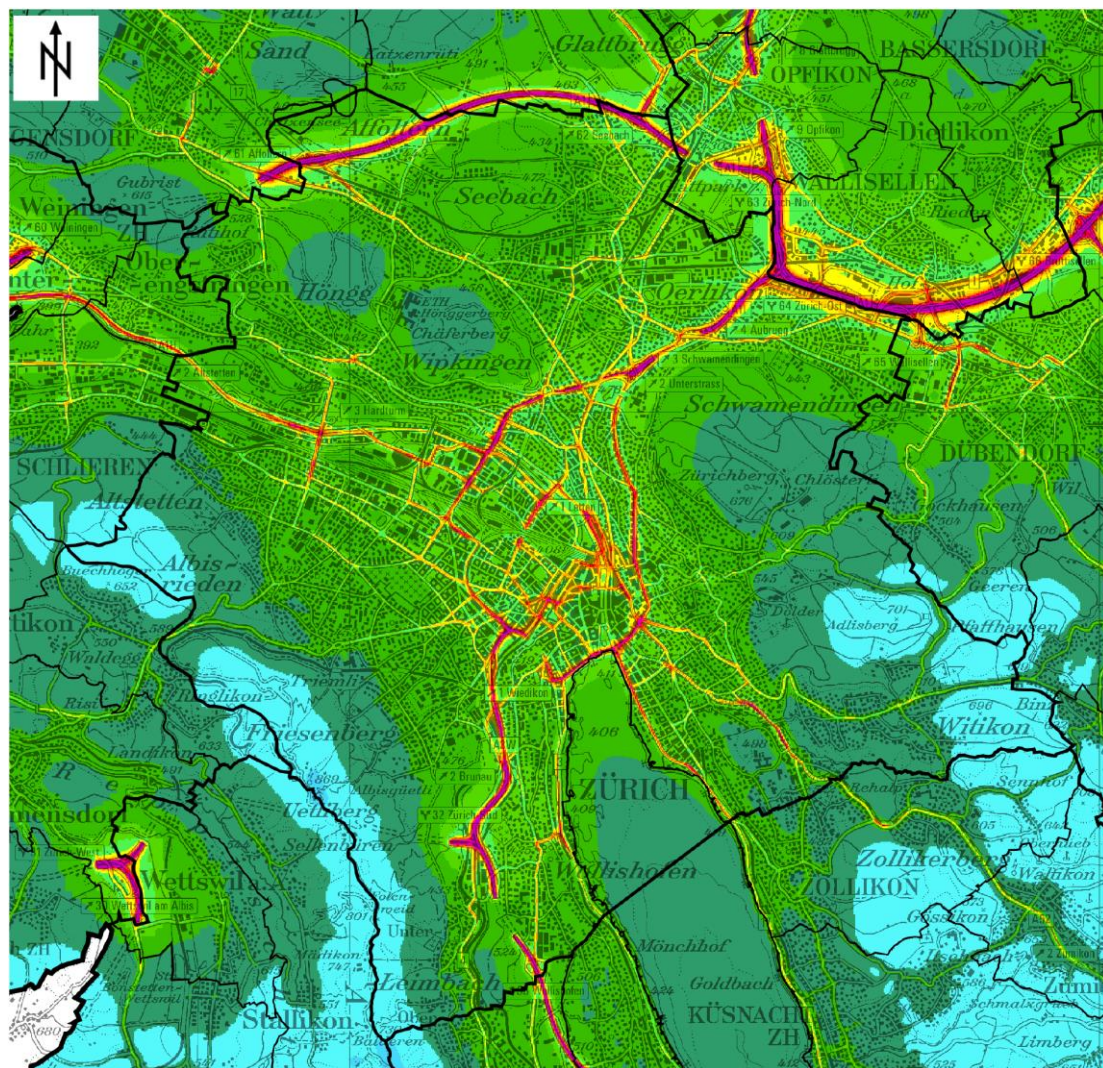


2020

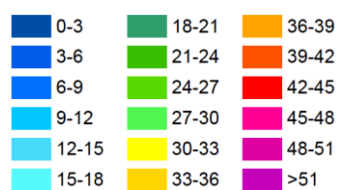
PM2.5-Jahresmittelwert in  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 

### A-3.3 NO<sub>2</sub>-Immissionen

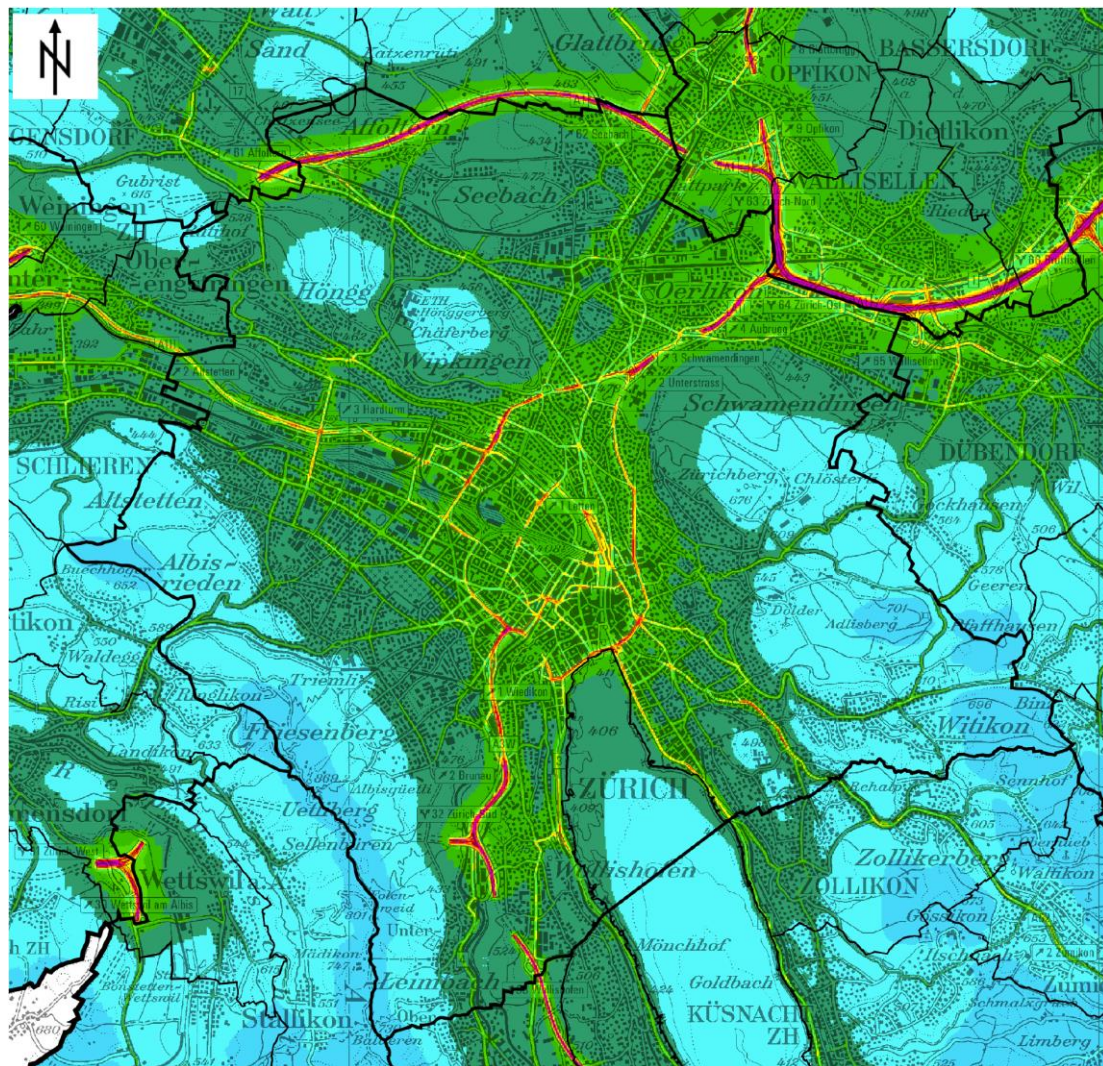
2015



NO<sub>2</sub>-Jahresmittelwert in  $\mu\text{g}/\text{m}^3$



2020

NO<sub>2</sub>-Jahresmittelwert in µg/m<sup>3</sup>

|       |       |       |
|-------|-------|-------|
| 0-3   | 18-21 | 36-39 |
| 3-6   | 21-24 | 39-42 |
| 6-9   | 24-27 | 42-45 |
| 9-12  | 27-30 | 45-48 |
| 12-15 | 30-33 | 48-51 |
| 15-18 | 33-36 | >51   |

## A-4 Bevölkerungsexposition

Quelle für Bevölkerungszahlen: UGZ Statistik Stadt Zürich. Anzahl Personen ([wirtschaftliche Bevölkerung](#)) in den Gebäuden der Stadt Zürich (über die EGID: Eidgenössischer Gebäude-Identifikator)

### A-4.1 PM10

| Belastungsniveau | 2015   | 2020    | Differenz |
|------------------|--------|---------|-----------|
| 10 bis 10.99     | 8      | 1       | 7         |
| 11 bis 11.99     | 42     | 14      | 28        |
| 12 bis 12.99     | 12426  | 8'822   | 3'604     |
| 13 bis 13.99     | 95941  | 53'695  | 42'246    |
| 14 bis 14.99     | 181561 | 158'685 | 22'876    |
| 15 bis 15.99     | 112433 | 139'224 | -26'791   |
| 16 bis 16.99     | 24524  | 38'713  | -14'189   |
| 17 bis 17.99     | 4748   | 7'326   | -2'578    |
| 18 bis 18.99     | 1931   | 2'298   | -367      |
| 19 bis 19.99     | 702    | 1'114   | -412      |
| 20 bis 20.99     | 248    | 427     | -179      |
| 21 bis 21.99     | 52     | 70      | -18       |
| 22 bis 22.99     | 13     | 10      | 3         |

Tabelle 19: Bevölkerungsexposition in der Stadt Zürich mit PM10.

### A-4.2 PM2.5

| Belastungsniveau | 2015   | 2020    | Differenz |
|------------------|--------|---------|-----------|
| 8 bis 8.99       | 8      | 15      | -7        |
| 9 bis 9.99       | 98166  | 16'852  | 81'314    |
| 10 bis 10.99     | 315954 | 295'629 | 20'325    |
| 11 bis 11.99     | 18896  | 92'881  | -73'985   |
| 12 bis 12.99     | 1506   | 4'483   | -2'977    |
| 13 bis 13.99     | 99     | 529     | -430      |
| 14 bis 14.99     | 0      | 10      | -10       |

Tabelle 20: Bevölkerungsexposition in der Stadt Zürich mit PM2.5.

**A-4.3 NO<sub>2</sub>**

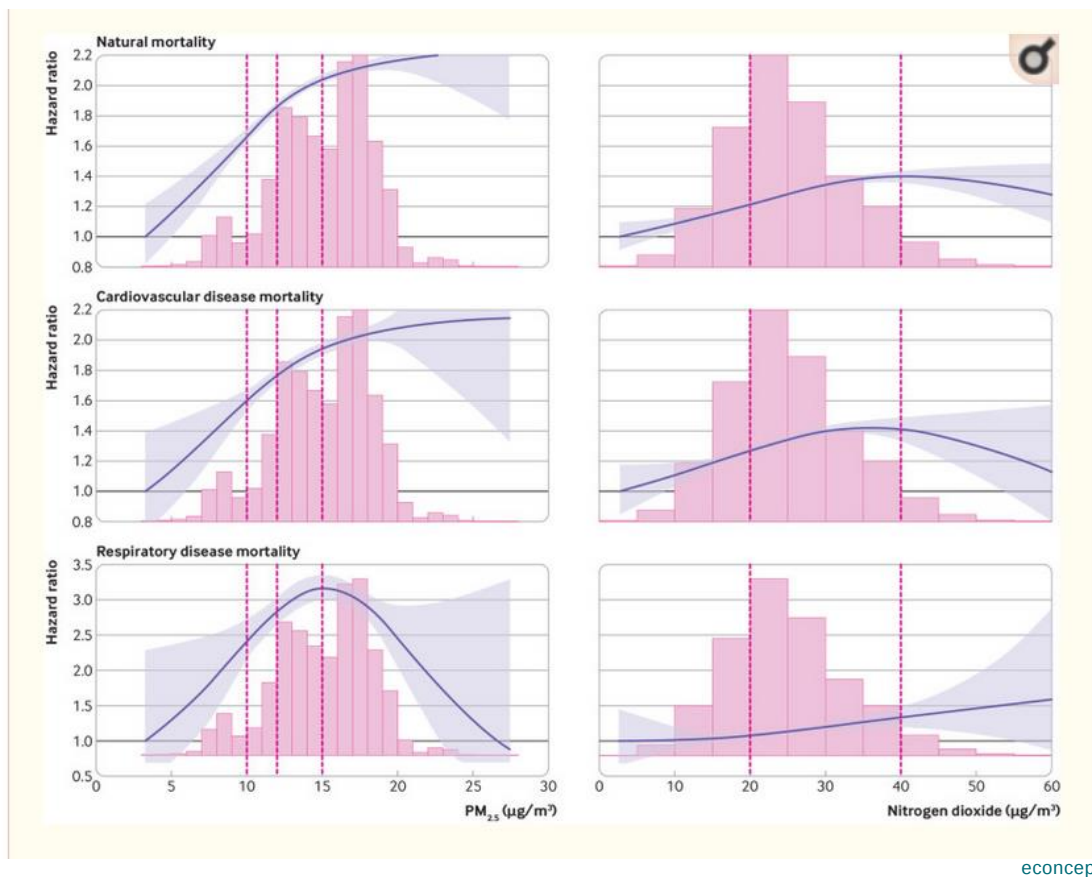
| Belastungsniveau | 2015  | 2020   | Differenz |
|------------------|-------|--------|-----------|
| 13 bis 13.99     | 8     | 0      | 8         |
| 15 bis 15.99     | 580   | 15     | 565       |
| 16 bis 16.99     | 5050  | 0      | 5'050     |
| 17 bis 17.99     | 10586 | 72     | 10'514    |
| 18 bis 18.99     | 38795 | 2'580  | 36'215    |
| 19 bis 19.99     | 55430 | 5'479  | 49'951    |
| 20 bis 20.99     | 62832 | 11'618 | 51'214    |
| 21 bis 21.99     | 66071 | 30'310 | 35'761    |
| 22 bis 22.99     | 62651 | 45'322 | 17'329    |
| 23 bis 23.99     | 45759 | 46'442 | -683      |
| 24 bis 24.99     | 29355 | 50'081 | -20'726   |
| 25 bis 25.99     | 19636 | 50'933 | -31'297   |
| 26 bis 26.99     | 12500 | 45'566 | -33'066   |
| 27 bis 27.99     | 8132  | 34'250 | -26'118   |
| 28 bis 28.99     | 5480  | 25'064 | -19'584   |
| 29 bis 29.99     | 2936  | 17'702 | -14'766   |
| 30 bis 30.99     | 1923  | 12'903 | -10'980   |
| 31 bis 31.99     | 1798  | 8'595  | -6'797    |
| 32 bis 32.99     | 1384  | 6'119  | -4'735    |
| 33 bis 33.99     | 882   | 4'566  | -3'684    |
| 34 bis 34.99     | 801   | 2'766  | -1'965    |
| 35 bis 35.99     | 436   | 1'884  | -1'448    |
| 36 bis 36.99     | 625   | 1'440  | -815      |
| 37 bis 37.99     | 237   | 1'506  | -1'269    |
| 38 bis 38.99     | 234   | 1'055  | -821      |
| 39 bis 39.99     | 119   | 777    | -658      |
| 40 bis 40.99     | 113   | 737    | -624      |
| 41 bis 41.99     | 89    | 567    | -478      |
| 42 bis 42.99     | 108   | 336    | -228      |
| 43 bis 43.99     | 67    | 596    | -529      |
| 49 bis 49.99     | 13    | 103    | -90       |
| 44 bis 44.99     | 0     | 265    | -265      |
| 45 bis 45.99     | 0     | 259    | -259      |
| 46 bis 46.99     | 0     | 105    | -105      |
| 47 bis 47.99     | 0     | 79     | -79       |
| 48 bis 48.99     | 0     | 55     | -55       |
| 50 bis 50.99     | 0     | 67     | -67       |
| 51 bis 51.99     | 0     | 139    | -139      |
| 52 bis 52.99     | 0     | 12     | -12       |
| 53 bis 53.99     | 0     | 23     | -23       |
| 55 bis 55.99     | 0     | 10     | -10       |

Tabelle 21: Bevölkerungsexposition in der Stadt Zürich mit NO<sub>2</sub>.

## A-5 Dosis-Wirkungs-Relationen

Die untenstehenden Tabellen zeigen die im Zuge des Projektes gesichteten Dosis-Wirkungs-Relationen, aus denen die schliesslich verwendeten Schätzer ausgewählt wurden (vgl. Kapitel 2.4).

Generell wurde in der ELAPSE 2021 Studie eine supralineare Beziehung bei den Belastungs-Wirkungs-Beziehungen gemessen wie in Abbildung 16 ersichtlich. Da die ausgewiesenen Schätzer allerdings auf einer linearen Schätzung basieren und für die Stadt Zürich die Belastung nicht am rechten Rand von Abbildung 16 ist, wurden die Gesundheitsauswirkungen der Schadstoff-Belastung anhand einer linearen Relation geschätzt.



econcept

Abbildung 16: Lineare bis supralineare Dosis-Wirkungs-Relationen. Quelle: ELAPSE 2021.

## A-5.1 Feinstaub

| Wirkung Feinstaubbelastung: Mortalität, PM2.5-basierte Dosis-Wirkungs-Relationen |                                                                                                                                               |                                                 |                                                                     |                |                            |                                                                                                                           |
|----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|----------------|----------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Schätzer                                                                         | Datengrundlage                                                                                                                                | Mittlere Belastung [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ] | Quelle                                                              | Kurz-/Langzeit | Publikation                | Bemerkung                                                                                                                 |
| 1.062                                                                            |                                                                                                                                               |                                                 | Hoek et al. (2013)                                                  | Langzeit       | HRAPIE 2013<br>COMEAP 2020 | Metaanalyse, 13 Studien                                                                                                   |
| 1.13                                                                             | Region: Europ. Kohorten Studien (Schweden, Dänemark, Niederlanden, Frankreich, Deutschland, Österreich) Alter: Durchschnitt 42-73. N: 325'367 | Durchschnitt (SD): 15.02 (3.22)                 | Strak M, Weinmayr G, Rodopoulou S, Chen J, de Hoogh K et al. (2021) | Langzeit       | ELAPSE 2021                | Effektschätzer bezieht sich auf eine Erhöhung um $5 \mu\text{gPM}_{2.5}/\text{m}^3$ . Konfidenzintervalle: (1.106, 1.155) |
| 1.08                                                                             |                                                                                                                                               |                                                 | Chen & Hoek (2020)                                                  | Langzeit       | WHO 2021                   | Metaanalyse, 25 Studien. Verlässlichste Studie wies linearen Zusammenhang aus.                                            |
| Zugrundeliegende Studien Chen & Hoek (2020)                                      |                                                                                                                                               |                                                 |                                                                     |                |                            |                                                                                                                           |
| 1.26                                                                             | Region: Kanada<br>Alter: 25-90<br>N: 299'500                                                                                                  | 6.32                                            | Pinault et al. (2016)                                               | Langzeit       |                            |                                                                                                                           |
| 1.16                                                                             | Region: Kanada<br>Alter: 25-90<br>N: 2'291'250                                                                                                | 6.5                                             | Cakmak et al. (2018)                                                | Langzeit       |                            |                                                                                                                           |
| 1.18                                                                             | Region: Kanada<br>Alter: 25-90<br>N: 2'448'500                                                                                                | 7.37                                            | Pinault et al. (2017)                                               | Langzeit       |                            |                                                                                                                           |
| 0.95                                                                             | Region: Iowa, North Carolina<br>Alter: -<br>N: 83'378                                                                                         | 9.5                                             | Weichenthal et al. (2014)                                           | Langzeit       |                            |                                                                                                                           |
| 1.12                                                                             | Region: Kanada<br>Alter: 40-59<br>N: 89'835                                                                                                   | 9.1                                             | Villeneuve et al. (2015)                                            | Langzeit       |                            |                                                                                                                           |
| 1.08                                                                             | Region: USA<br>Alter: 65+<br>N: 60'925'443                                                                                                    | 11                                              | Di et al. (2017a)                                                   | Langzeit       |                            |                                                                                                                           |
| 1.03                                                                             | Region: USA<br>Alter: 25+<br>N: 657'238                                                                                                       | 11.8                                            | Parker, Kravets & Vaidyanathan (2018)                               | Langzeit       |                            |                                                                                                                           |
| 1.08                                                                             | Region: USA<br>Alter: -<br>N: 1'729'108                                                                                                       | 11.8                                            | Bowe et al. (2018)                                                  | Langzeit       |                            |                                                                                                                           |
| 1.13                                                                             | Region: USA<br>Alter: 54-79<br>N: 108'767                                                                                                     | 12.0                                            | Hart et al. (2015)                                                  | Langzeit       |                            |                                                                                                                           |
| 1.07                                                                             | Region: Iowa, North Carolina<br>Alter: 30+<br>N: 669'046                                                                                      | 12.6                                            | Turner et al. (2016)                                                | Langzeit       |                            |                                                                                                                           |

| Wirkung Feinstaubbelastung: Mortalität, PM2.5-basierte Dosis-Wirkungs-Relationen |                                                       |                                                 |                         |                |             |           |
|----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|-------------------------|----------------|-------------|-----------|
| Schätzer                                                                         | Datengrundlage                                        | Mittlere Belastung [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ] | Quelle                  | Kurz-/Langzeit | Publikation | Bemerkung |
| 1.11                                                                             | Region: England<br>Alter: 40-89<br>N: 835'607         | 12.9                                            | Carey et al. (2013)     | Langzeit       |             |           |
| 1.14                                                                             | Region: Europa<br>Alter: -<br>N: 367'251              | 13.4                                            | Beelen et al. (2014)    | Langzeit       |             |           |
| 1.03                                                                             | Region: USA<br>Alter: 50-71<br>N: 517'041             | 12.2                                            | Thurston et al. (2016a) | Langzeit       |             |           |
| 1.1                                                                              | Region: USA<br>Alter: Durchschnitt 42<br>N: 53'814    | 14.1                                            | Hart et al. (2011)      | Langzeit       |             |           |
| 1.14                                                                             | Region: USA<br>Alter: 25-74<br>N: 8'096               | 15.9                                            | Lepeule et al. (2012)   | Langzeit       |             |           |
| 1.16                                                                             | Region: Frankreich<br>Alter: -<br>N: 20'327           | 17.0                                            | Bentayeb et al. (2015)  | Langzeit       |             |           |
| 0.86                                                                             | Region: USA<br>Alter: 40-75<br>N: 17'545              | 17.8                                            | Puett et al. (2011)     | Langzeit       |             |           |
| 1.01                                                                             | Region: Kalifornien<br>Alter: $\leq 30$<br>N: 101'884 | 17.9                                            | Ostro et al. (2015)     | Langzeit       |             |           |
| 1.05                                                                             | Region: Rom<br>Alter: 30+<br>N: 1'249'108             | 19.6                                            | Badaloni et al. (2017)  | Langzeit       |             |           |
| 1.01                                                                             | Region: Kalifornien<br>Alter: 43-99<br>N: 35'783      | 23.4                                            | Enstrom (2005)          | Langzeit       |             |           |
| 1.06                                                                             | Region: Holland<br>Alter: 55- 69<br>N: 120'852        | 28.3                                            | Beelen et al. (2008)    | Langzeit       |             |           |
| 0.92                                                                             | Region: Taiwan<br>Alter: -<br>N: 43'227               | 29.6                                            | Tseng et al. (2015)     | Langzeit       |             |           |
| 1.09                                                                             | Region: China<br>Alter: 40+<br>N: 189'793             | 43.7                                            | Yin et al. (2017)       | Langzeit       |             |           |
| 1.06                                                                             | Region: Hong Kong<br>Alter: 65+<br>N: 66'820          | 42.2                                            | Yang et al. (2018)      | Langzeit       |             |           |
| 1.09                                                                             | Region: Kalifornien<br>Alter: 27+<br>N: 1,266         | 31.9                                            | McDonnell et al. (2000) | Langzeit       |             |           |

Tabelle 22: Wirkung PM<sub>2.5</sub>. Effektschätzer: Anstieg des relativen Risikos (RR) pro Anstieg der Belastung um 10 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ] (wenn nicht anders angegeben).

Die grauen, eingerückten Schätzwerte beziehen sich auf die in der obenstehenden Metastudie betrachteten Studien. Wenn zwei Mediankonzentrationen angegeben sind, bezieht sich der obere Wert auf WHO (2021) und der untere, kursive Wert auf Chen & Hoek (2020).

| Wirkung Feinstaubbelastung: Mortalität, PM10-basierte Dosis-Wirkungs-Relationen |                                                    |                                                             |                        |                |             |                                                                                                                              |
|---------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|------------------------|----------------|-------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Schätzer                                                                        | Datengrundlage                                     | Median/Durchschnitts-Belastung [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ] | Quelle                 | Kurz-/Langzeit | Publikation | Bemerkung                                                                                                                    |
| 1.04                                                                            |                                                    |                                                             | Chen & Hoek (2020)     | Langzeit       | WHO 2021    | Metastudie, 17 Studien, nur eine Studie wies CRF aus, welche keine signifikante Abweichung von einer linearen Relation fand. |
| Zugrundeliegende Studien Chen & Hoek (2020)                                     |                                                    |                                                             |                        |                |             |                                                                                                                              |
| 1.07                                                                            | Region: England<br>Alter: 40-89<br>N: 835,607      | 19.7                                                        | Carey et al. (2013)    | Langzeit       |             |                                                                                                                              |
| 1.24                                                                            | Region: England<br>Alter: Alle<br>N: 367'658       | 20.7                                                        | Hansell et al. (2016)  | Langzeit       |             |                                                                                                                              |
| 1.04                                                                            | Region: Europa<br>Alter: -<br>N: 367'251           | 20.9                                                        | Beelen et al. (2014)   | Langzeit       |             |                                                                                                                              |
| 1.16                                                                            | Region: USA<br>Alter: 30-55<br>N: 66'250           | 21.6                                                        | Puett et al. (2008)    | Langzeit       |             |                                                                                                                              |
| 1.18                                                                            | Region: Frankreich<br>Alter: -<br>N: 20'327        | 25.0                                                        | Bentayeb et al. (2015) | Langzeit       |             |                                                                                                                              |
| 1.07                                                                            | Region: USA<br>Alter: Durchschnitt 42<br>N: 53'814 | 26.8                                                        | Hart et al. (2011)     | Langzeit       |             |                                                                                                                              |
| 0.92                                                                            | Region: USA<br>Alter: 40-75<br>N: 17'545           | 27.9                                                        | Puett et al. (2011)    | Langzeit       |             |                                                                                                                              |
| 1.09                                                                            | Region: USA<br>Alter: 25-74<br>N: 8'111            | 28.9                                                        | Dockery et al. (1993)  | Langzeit       |             |                                                                                                                              |
| 1.08                                                                            | Region: Holland<br>Alter: 30+<br>N: 7'218'363      | 29.0                                                        | Fischer et al. (2015)  | Langzeit       |             |                                                                                                                              |
| 1.00                                                                            | Region: Kalifornien<br>Alter: -<br>N: 101'784      | 29.2                                                        | Lipsett et al. (2011)  | Langzeit       |             |                                                                                                                              |
| 0.98                                                                            | Region: Japan<br>Alter: 30+<br>N: 73'094           | 34.9                                                        | Ueda et al. (2012)     | Langzeit       |             | Mit PM <sub>7</sub> geschätzt                                                                                                |
| 1.02                                                                            | Region: Rom<br>Alter: 30+<br>N: 1'249'108          | 36.6                                                        | Badaloni et al. (2017) | Langzeit       |             |                                                                                                                              |
| 1.22                                                                            | Region: Deutschland<br>Alter: 50-59<br>N: 4'752    | 43.7                                                        | Heinrich et al. (2013) | Langzeit       |             |                                                                                                                              |
| 1.01                                                                            | Region: Kalifornien<br>Alter: 27-95<br>N: 6'338    | 51.2                                                        | Abbey et al. (1999)    | Langzeit       |             |                                                                                                                              |



| Wirkung Feinstaub: Weitere Gesundheitswirkungen PM10-basierte Dosis-Wirkungs-Relationen |                               |                                                             |                                      |                |             |                                                                                                                                                    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------------------------------------|--------------------------------------|----------------|-------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Schätzer                                                                                | Datengrundlage                | Median/Durchschnitts-Belastung [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ] | Quelle                               | Kurz-/Langzeit | Publikation | Bemerkung                                                                                                                                          |
| 1.040                                                                                   | 4 Millionen Säugling in USA   |                                                             | Woodruff, Grillo & Schoendorf (1997) | Langzeit       | HRAPIE 2013 | Metaanalyse                                                                                                                                        |
| 1.18                                                                                    | 3.5 Millionen Säugling in USA |                                                             | Woodruff, Darrow & Parker (2008)     | Langzeit       | HRAPIE 2013 | Säuglingssterblichkeit aufgrund von Atemwegerkran-<br>kung, nicht empfohlen,<br>wenn keine spezifischen To-<br>desstatistiken dazu vorhan-<br>den. |
| Inzidenz chronische Bronchitis bei Erwachsenen                                          |                               |                                                             |                                      |                |             |                                                                                                                                                    |
| 1.117                                                                                   | Kalifornien, Schweiz          |                                                             | AHSMOG, SAPALDIA                     | Langzeit       | HRAPIE 2013 | Metaanalyse, 2 Studien                                                                                                                             |
| Prävalenz von Bronchitis bei Kindern                                                    |                               |                                                             |                                      |                |             |                                                                                                                                                    |
| 1.08                                                                                    | 40'000 Kinder aus 9 Ländern   |                                                             | PARTY study, Hoek et al. 2012        | Langzeit       | HRAPIE 2013 | Metaanalyse, heterogene Ef-<br>fekte in verschiedenen Stu-<br>dien                                                                                 |
| Tage mit Asthmasymptomen bei Erwachsenen                                                |                               |                                                             |                                      |                |             |                                                                                                                                                    |
| 1.029                                                                                   |                               |                                                             |                                      |                | ARE 2014    | Metaanalyse von 6 europäi-<br>schen Studien                                                                                                        |
| Tage mit Asthmasymptomen bei Kindern                                                    |                               |                                                             |                                      |                |             |                                                                                                                                                    |
| 1.028                                                                                   | 51 Länder, 36 in Eu-<br>ropa  |                                                             | Weinmayr et al. (2010)               | Kurzzeit       | HRAPIE 2013 | Metaanalyse                                                                                                                                        |

Tabelle 25: Wirkung PM<sub>10</sub>. Effektschätzer: Anstieg des relativen Risikos (RR) pro Anstieg der Belastung um 10 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ].

## A-5.2 NO<sub>2</sub>

| Wirkung NO <sub>2</sub> : Dosis-Wirkungs-Relationen Mortalität Erwachsene |                                                                                                                                                                                     |                                                             |                                                                                    |                |             |                                        |
|---------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|----------------|-------------|----------------------------------------|
| Schätzer                                                                  | Datengrundlage                                                                                                                                                                      | Median/Durchschnitts-Belastung [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ] | Quelle                                                                             | Kurz-/Langzeit | Publikation | Bemerkung                              |
| 1.055                                                                     |                                                                                                                                                                                     |                                                             | Hoek et al. (2013)                                                                 | Langzeit       | HRPIE 2013  |                                        |
| 1.0027                                                                    | 30 europäische Städte                                                                                                                                                               |                                                             |                                                                                    | Kurzzeit       | HRPIE 2013  | RR korrigiert für PM <sub>10</sub>     |
| 1.086                                                                     | Region: Europäi-<br>sche Kohorten Stu-<br>dien (Schweden,<br>Dänemark, Nieder-<br>landen, Frankreich,<br>Deutschland, Öster-<br>reich) Alter: Durch-<br>schnitt 42-73<br>N: 325'367 | Durch-<br>schnitt (SD):<br>25.00 (8.05)                     | Strak M,<br>Weinmayr G,<br>Rodopoulou<br>S, Chen J, de<br>Hoogh K et<br>al. (2021) | Lang-<br>zeit  | ELAPSE      | Konfidenzintervalle:<br>(1.070, 1.102) |

| Wirkung NO <sub>2</sub> : Dosis-Wirkungs-Relationen Mortalität Erwachsene |                                                    |                                                         |                                                         |                                               |                         |                  |                                                                                            |
|---------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|-------------------------|------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|
| Schätzer                                                                  | Datengrundlage                                     |                                                         | Me-<br>dian/Durch-<br>schnitts-<br>Belastung<br>[µg/m³] | Quelle                                        | Kurz-<br>/Lang-<br>zeit | Publika-<br>tion | Bemerkung                                                                                  |
| 1.02                                                                      |                                                    |                                                         |                                                         | Huangfu & At-<br>kinson (2020)                | Lang-<br>zeit           | WHO<br>2021      | Metaanalyse, 24 Studien,<br>CDFs lassen einen supra-<br>linearen Zusammenhang<br>vermuten. |
|                                                                           | Zugrundeliegende Studien Huangfu & Atkinson (2020) |                                                         |                                                         |                                               |                         |                  |                                                                                            |
|                                                                           | 1.01                                               | Region: England<br>Alter: 25+<br>N: 154'204             | 18.5                                                    | Tonne & Wil-<br>kinson (2013)                 | Lang-<br>zeit           |                  |                                                                                            |
|                                                                           | 1.04                                               | Region: Kanada<br>Alter: 25-89<br>N: 2'448'500          | 21.6                                                    | Weichenthal,<br>Pinault & Bur-<br>nett (2017) | Lang-<br>zeit           |                  |                                                                                            |
|                                                                           | 1.03                                               | Region: Kanada<br>Alter: 25-89<br>N: 2'521'525          | 21.8                                                    | Crouse et al.<br>(2015)                       | Lang-<br>zeit           |                  |                                                                                            |
|                                                                           | 1.02                                               | Region: USA<br>Alter: 30+<br>N: 669'046                 | 21.8                                                    | Turner et al.<br>(2016)                       | Lang-<br>zeit           |                  |                                                                                            |
|                                                                           | 1.12                                               | Region: Japan<br>Alter: 65-84<br>N: 13'412              | 22.0                                                    | Yorifuji et al.<br>(2013)                     | Lang-<br>zeit           |                  |                                                                                            |
|                                                                           | 1.02                                               | Region: England<br>Alter: 40-89<br>N: 830'429           | 22.5                                                    | Carey et al.<br>(2013)                        | Lang-<br>zeit           |                  |                                                                                            |
|                                                                           | 1.01                                               | Region: Europa<br>Alter: Alle<br>N: 367'251             | 22.2                                                    | Beelen et al.<br>(2014)                       | Lang-<br>zeit           |                  |                                                                                            |
|                                                                           | 1.01                                               | Region: USA<br>Alter: 15.3-84.9<br>N: 53'814            | 26.1                                                    | Hart et al.<br>(2013)                         | Lang-<br>zeit           |                  |                                                                                            |
|                                                                           | 1.05                                               | Region: USA<br>Alter: 30-55<br>N: 84,562                | 26.7                                                    | Hart et al.<br>(2013)                         | Lang-<br>zeit           |                  |                                                                                            |
|                                                                           | 1.07                                               | Region: Frankreich<br>Alter: 35-50<br>N: 20'327         | 28.0                                                    | Bentayeb et<br>al. (2015)                     | Lang-<br>zeit           |                  |                                                                                            |
|                                                                           | 1.08                                               | Region: USA<br>Alter: 30+<br>N: 406'917                 | 30.3                                                    | Krewski et al.<br>(2003)                      | Lang-<br>zeit           |                  |                                                                                            |
|                                                                           | 1.03                                               | Region: Holland<br>Alter: >=30<br>N: 7'218'363          | 31.0                                                    | Fischer et al.<br>(2015)                      | Lang-<br>zeit           |                  |                                                                                            |
|                                                                           | 1.00                                               | Region: USA<br>Alter: 64 (Durch-<br>schnitt)<br>N: 6575 | 35.9                                                    | Hartiala et al.<br>(2016)                     | Lang-<br>zeit           |                  |                                                                                            |
|                                                                           | 1.14                                               | Region: Frankreich<br>Alter: 25-59<br>N: 14'284         | 36.5                                                    | Filleul et al.<br>(2005)                      | Lang-<br>zeit           |                  |                                                                                            |

| Wirkung NO <sub>2</sub> : Dosis-Wirkungs-Relationen Mortalität Erwachsene |      |                                                          |                                                         |                         |                         |                  |                                                                                                                                                                                                                                   |
|---------------------------------------------------------------------------|------|----------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|-------------------------|-------------------------|------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Schätzer                                                                  |      | Datengrundlage                                           | Me-<br>dian/Durch-<br>schnitts-<br>Belastung<br>[µg/m³] | Quelle                  | Kurz-<br>/Lang-<br>zeit | Publika-<br>tion | Bemerkung                                                                                                                                                                                                                         |
|                                                                           | 1.03 | Region: USA<br>Alter: 51 (Durchschnitt)<br>N: 28'635     | 37.2                                                    | Lipfert et al. (2006)   | Langzeit                |                  |                                                                                                                                                                                                                                   |
|                                                                           | 1.03 | Region: Holland<br>Alter: 55-69<br>N: 120'227            | 38.0                                                    | Brunekeet et al. (2009) | Langzeit                |                  |                                                                                                                                                                                                                                   |
|                                                                           | 1.23 | Region: Kanada<br>Alter: 56.6 (Durchschnitt)<br>N: 2'360 | 39.1                                                    | Jerrett et al. (2009)   | Langzeit                |                  |                                                                                                                                                                                                                                   |
|                                                                           | 0.92 | Region: China<br>Alter: 23-89<br>N: 39'054               | 40.7                                                    | Chen et al. (2016)      | Langzeit                |                  |                                                                                                                                                                                                                                   |
|                                                                           | 1.03 | Region: Italien<br>Alter: 30+<br>N: 1'265'058            | 43.6                                                    | Cesaroni et al. (2013)  | Langzeit                |                  |                                                                                                                                                                                                                                   |
|                                                                           | 0.94 | Region: UK<br>Alter: 68.8 (Durchschnitt)<br>N: 1800      | 44.6                                                    | Desikan et al. (2016)   | Langzeit                |                  |                                                                                                                                                                                                                                   |
|                                                                           | 0.95 | Region: Italien<br>Alter: 35-84<br>N: 6'513              | 48.5                                                    | Rosenlund et al. (2008) | Langzeit                |                  |                                                                                                                                                                                                                                   |
|                                                                           | 0.98 | Region: USA<br>Alter: 30+<br>N: 12'336                   | 63.1                                                    | Lipsett et al. (2011)   | Langzeit                |                  |                                                                                                                                                                                                                                   |
|                                                                           | 1.00 | Region: USA<br>Alter: 27-95<br>N: 5'652                  | 69.2                                                    | Abbey et al. (1999)     | Langzeit                |                  |                                                                                                                                                                                                                                   |
|                                                                           | 1.00 | Region: China<br>Alter: 65+<br>N: 61'386                 | 104.0                                                   | Yang et al. (2018)      | Langzeit                |                  |                                                                                                                                                                                                                                   |
| 1.023<br>1.006 – 1.013<br>(nur NO <sub>2</sub> -Effekt)                   |      |                                                          |                                                         |                         | Langzeit                | COMEAP           | Metaanalyse, 11 Studien, einige Überschneidungen mit Studien, die für WHO 2021 Schätzer verwendet wurden, Studien von 1999 -2015. Effektschätzer in Studien reichen von 0.984 bis 1.078.                                          |
| 1.030                                                                     |      |                                                          |                                                         |                         | Langzeit                |                  | Metaanalyse, 6 Studien, viele Überschneidungen mit Studien, die für WHO 2021 Schätzer verwendet wurden, Studien von 2009-2016, Relevanz für Deutschland wurde in der Auswahl der Studien berücksichtigt.<br>ACHTUNG: Schätzer für |

| Wirkung NO <sub>2</sub> : Dosis-Wirkungs-Relationen Mortalität Erwachsene |                |                                                                      |        |                         |                  |                                  |
|---------------------------------------------------------------------------|----------------|----------------------------------------------------------------------|--------|-------------------------|------------------|----------------------------------|
| Schätzer                                                                  | Datengrundlage | Me-<br>dian/Durch-<br>schnitts-<br>Belastung<br>[µg/m <sup>3</sup> ] | Quelle | Kurz-<br>/Lang-<br>zeit | Publika-<br>tion | Bemerkung                        |
|                                                                           |                |                                                                      |        |                         |                  | Kardiovaskuläre Mortali-<br>tät. |
| Spitaleintritte wegen Atemwegserkrankungen                                |                |                                                                      |        |                         |                  |                                  |
| 1.0015                                                                    |                |                                                                      |        | Kurzzeit                | HRPIE<br>2013    | Metaanalyse, 4 Studien           |
| 1.0180                                                                    |                |                                                                      |        | Kurzzeit                | HRPIE<br>2013    | Metaanalyse, 15 Studien          |

Tabelle 26: Wirkung NO<sub>2</sub>. Effektschätzer: Anstieg des relativen Risikos (RR) pro Anstieg der Belastung um 10 [µg/m<sup>3</sup>].

## A-6 Kostensätze detailliert

|                                                        | Einheit   | Immaterielle<br>Kosten | Medizinische<br>Behandlungs-<br>kosten | Nettoprodukti-<br>onsausfall | Total     |
|--------------------------------------------------------|-----------|------------------------|----------------------------------------|------------------------------|-----------|
| Mortalität                                             | Todesfall | 2'394'509              | -                                      | 122'013                      | 2'516'521 |
| Verlorene Lebenszeit                                   | Todesfall | 2'394'509              | -                                      | -                            | 2'394'509 |
| Verlorene Erwerbszeit                                  | Todesfall | -                      | -                                      | 117'584                      | 117'584   |
| Wiederbesetzungskosten<br>(Durchschnitt m/f)           | Todesfall | -                      | -                                      | 4'429                        | 4'429     |
| Spitaleintritt wegen Herzkreis-<br>lauferkrankungen    | Fall      | 7'316                  | 13'219                                 | 7'080                        | 27'615    |
| Spitaleintritt wegen Atemwegser-<br>krankungen         | Fall      | 5'783                  | 7'055                                  | 3'616                        | 16'453    |
| Chronische Bronchitis bei Erwach-<br>senen ((18 J.)    | Fall      | 114'154                | 7'024                                  | 1'536                        | 122'713   |
| Akute Bronchitis bei Kindern (5-17<br>Jahre)           | Fall      | 310                    | 56                                     | 19                           | 386       |
| Tag mit Asthmasymptome bei Er-<br>wachsenen (18 Jahre) | Tag       | 74                     | 1                                      | 110                          | 184       |
| Tag mit Asthmasymptome bei Kin-<br>dern (5-17 Jahre)   | Tag       | 74                     | 1                                      | 19                           | 94        |
| Tag mit eingeschränkter Aktivität<br>(18 Jahre)        | Tag       | 223                    | -                                      | 272                          | 495       |

Tabelle 27: Kostensätze Erhebungsjahr 2015. Quellen: ARE 2021 ergänzt mit eigenen Berechnungen.

|                                                           | Bezug     | Immaterielle<br>Kosten | Medizinische<br>Behandlungs-<br>kosten | Nettoprodukti-<br>onsausfall | Total     |
|-----------------------------------------------------------|-----------|------------------------|----------------------------------------|------------------------------|-----------|
| Mortalität                                                | Todesfall | 2'485'218.68           | -                                      | 124'429.25                   | 2'609'648 |
| Verlorene Lebenszeit                                      | Todesfall | 2'485'218.68           | -                                      | -                            | 2'485'219 |
| Verlorene Erwerbszeit                                     | Todesfall | -                      | -                                      | 119'969.23                   | 119'969   |
| Wiederbesetzungskosten<br>(Durchschnitt m/f)              | Todesfall | -                      | -                                      | 4'460.02                     | 4'460     |
| Spitaleintritt wegen Herz-Kreislauf-<br>erkrankungen      | Fall      | 7'400.49               | 12'581                                 | 7'243.96                     | 27'225    |
| Spitaleintritt wegen Atemwegser-<br>krankungen            | Fall      | 5'849.58               | 6'714                                  | 3'699.73                     | 16'263    |
| Chronische Bronchitis bei Erwach-<br>senen (ab 18 J.)     | Fall      | 115'476.09             | 6'926                                  | 1'571.34                     | 123'974   |
| Akute Bronchitis bei Kindern (5-17<br>Jahre)              | Fall      | 313.99                 | 55                                     | 18.85                        | 388       |
| Tag mit Asthmasymptome bei Er-<br>wachsenen (ab 18 Jahre) | Tag       | 74.81                  | 1                                      | 112.13                       | 188       |
| Tag mit Asthmasymptome bei Kin-<br>dern (5-17 Jahre)      | Tag       | 74.81                  | 1                                      | 18.85                        | 94        |
| Tag mit eingeschränkter Aktivität<br>(18 Jahre)           | Tag       | 225.58                 | -                                      | 278.01                       | 504       |

Tabelle 28: Kostensätze Erhebungsjahr 2020. ARE 2021 ergänzt mit eigenen Berechnungen.

| Inputs für die Berechnung der Mortalitätskosten                                                              |      |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| Bei Todesfall durchschnittliche Anzahl verlorene Lebensjahre<br>(Gewichteter Durchschnitt Gesamtbevölkerung) | 9.96 |
| Bei Todesfall durchschnittliche Anzahl verlorene Erwerbsjahre                                                | 1.18 |
| Erwerbsquote der Verstorbenen (relevant für Wiederbesetzungskosten)                                          | 12%  |

Tabelle 29: Inputs für die Berechnung der Mortalitätskosten. Quelle: ARE 2021.

## A-7 Attributable Fälle pro 1 µg/m³ zusätzliche Belastung

|                         |                                                   | Einheit         | Attributable Fälle durch zusätzliche 1 µg/m³ PM10-Belastung pro 100'000 Einwohner und Jahr | Attributable Fälle durch zusätzliche 1 µg/m³ PM2.5-Belastung pro 100'000 Einwohner und Jahr |
|-------------------------|---------------------------------------------------|-----------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|
| Best-guess              | Mortalität Erwachsene                             | Fälle           | 15                                                                                         | 18                                                                                          |
| At-least                | Mortalität Erwachsene                             | Fälle           | 3                                                                                          | 5                                                                                           |
| Best-guess und At-least | Säuglingssterblichkeit                            | Fälle           | 0                                                                                          | 0                                                                                           |
|                         | Spitaleintritte wegen Atemwegserkrankungen        | Spitaleintritte | 1                                                                                          | 2                                                                                           |
|                         | Spitaleintritte wegen Herz/Kreislaufkrankungen    | Spitaleintritte | 1                                                                                          | 1                                                                                           |
|                         | Inzidenz chronische Bronchitis bei Erwachsenen    | Fälle           | 28                                                                                         | 37                                                                                          |
|                         | Prävalenz von Bronchitis bei Kindern              | Fälle           | 100                                                                                        | 136                                                                                         |
|                         | Tage mit Asthmasymptomen bei Erwachsenen          | Tage            | 100                                                                                        | 140                                                                                         |
|                         | Tage mit Asthmasymptomen bei Kindern              | Tage            | 216                                                                                        | 301                                                                                         |
|                         | Tag mit eingeschränkter Aktivität bei Erwachsenen | Tage            | 12'036                                                                                     | 16'770                                                                                      |

Tabelle 30: Attributable Fälle pro 1 µg/m³ zusätzliche Belastung für Feinstaub.

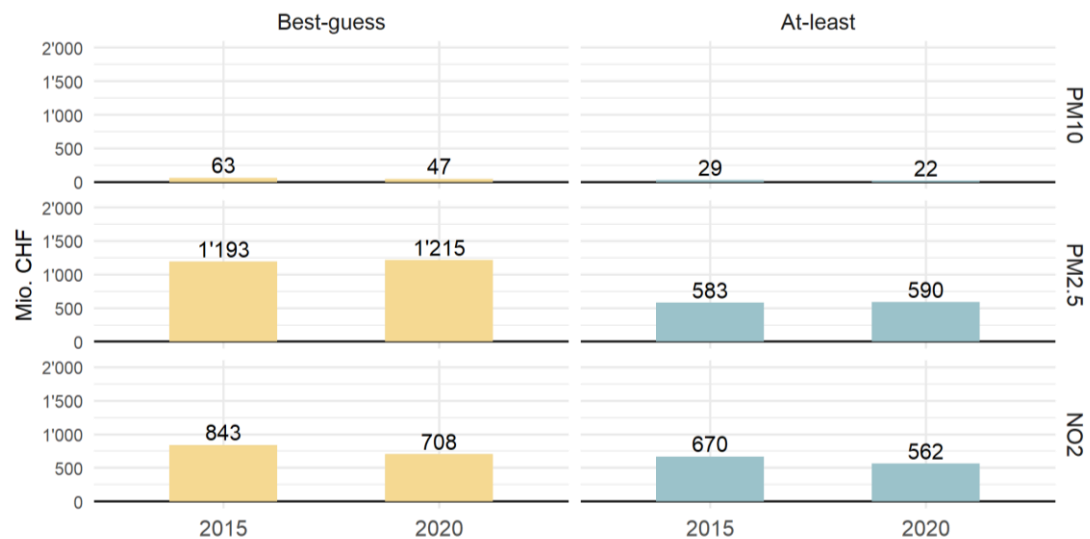
|                         |                                            | Einheit         | Attributable Fälle durch zusätzliche 1 µg/m³ NO <sub>2</sub> -Belastung pro 100'000 Einwohner und Jahr |
|-------------------------|--------------------------------------------|-----------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Best-guess              | Mortalität Erwachsene                      | Fälle           | 6                                                                                                      |
| At-least                | Mortalität Erwachsene                      | Fälle           | 4                                                                                                      |
| Best-guess und At-least | Spitaleintritte wegen Atemwegserkrankungen | Spitaleintritte | 2                                                                                                      |

Tabelle 31: Attributable Fälle pro 1 µg/m³ zusätzliche Belastung für NO<sub>2</sub>.

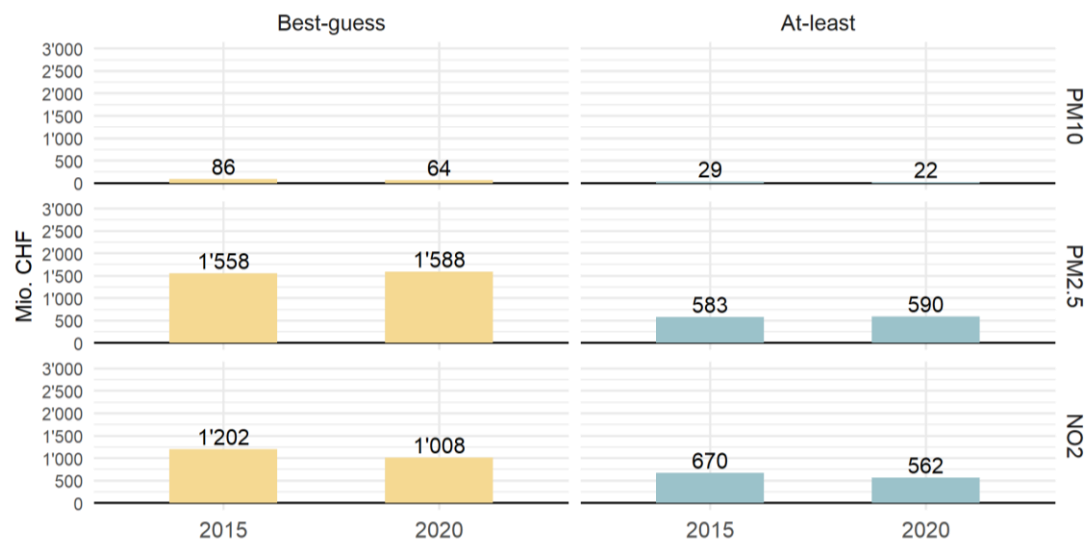
## A-8 Sensitivität

### Sensitivitätsanalyse

Schätzung mit den unteren Grenzen der 95%-Konfidenzintervalle der Effektschätzer



Schätzung mit den oberen Grenzen der 95%-Konfidenzintervalle der Effektschätzer



econcept

Abbildung 17: Luftschadstoffbedingte Gesundheitskosten in der Stadt Zürich 2015 und 2020. Die auf Basis der verschiedenen Schadstoffe (PM10, PM2.5, NO<sub>2</sub>) geschätzten Kosten dürfen nicht addiert werden. Die PM10-bedingten Kosten werden mit hoher Wahrscheinlichkeit in beiden Varianten unterschätzt. Als Indikator für die durch feinstaubbedingten Gesundheitskosten werden daher die PM2.5-bedingten Gesundheitskosten empfohlen.

## Literatur

- ARE (2019): Externe Effekte des Verkehrs 2015. Aktualisierung der Berechnungen von Umwelt-, Unfall- und Gesundheitseffekten des Strassen-, Schienen-, Luft- und Schiffsverkehrs 2010 bis 2015. Schlussbericht (überarbeitete Version).
- ARE (2021): Externe Kosten und Nutzen des Verkehrs in der Schweiz - Strassen-, Schienen-, Luft- und Schiffsverkehr 2018 – Grundlagen für die Berechnungen. (Die Grundlagen wurden auf Anfrage durch das ARE zur Verfügung gestellt.)
- 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/BAFU (2004): Externe Gesundheitskostendurch verkehrsbedingte Luftverschmutzung in der Schweiz. Bern, Zürich, Altdorf, ecoplan/Infras im Auftrag des ARE.
- econcept (2013): Die Kosten der Luftverschmutzung für den Kanton Zürich, die Stadt Zürich und die Stadt Winterthur.
- econcept (2018): Die Kosten der Luftverschmutzung 2005 bis 2015 für den Kanton Zürich, die Stadt Zürich und die Stadt Winterthur.
- 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.
- ELAPSE (2021): Long term exposure to low level air pollution and mortality in eight European cohorts within the ELAPSE project: pooled analysis.
- 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.
- Infras/Meteotest (2020): Immissionen Schweiz und Lichtenstein. Modellresultate NO<sub>2</sub>, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> für 2015, 2020, 2030. Im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU).

NEEDS (2007): Final Report on the monetary valuation of mortality and morbidity risks from air pollution. NEEDS RS1b, Deliverable D6.7.

OECD (2012): Mortality Risk Valuation in Environment, Health and Transport Policies. On-line: <http://www.oecd.org/environment/mortalityriskvaluationinenvironmenthealthandtransportpolicies.htm> (10.8.2015).

UBA (2018): Quantifizierung von umweltbedingten Krankheitslasten aufgrund der Stickstoffdioxid- Exposition in Deutschland.

WHO (2021): WHO global air quality guidelines. Quantifizierung von umweltbedingten Krankheitslasten aufgrund der Stickstoffdioxid- Exposition in Deutschland. Particulate matter (PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub>), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide.