



Luftbilanz 2024

Resultate der
flächendeckenden
Messkampagne



Impressum

Herausgeberin

Stadt Zürich
Umwelt- und Gesundheitsschutz Zürich (UGZ)
Messung Luftqualität
Eggbühlstrasse 23
8050 Zürich

stadt-zuerich.ch/luft

T +41 44 412 20 20
UGZ-Messung-Luftqualitaet@zuerich.ch

Mitwirkung

Markus Scheller
Noël Rederlechner
Corinne Hörger
Marion Muff

Zitiervorschlag

Luftbilanz 2024. Stadt Zürich (Hrsg.). Zürich, 2025

Fotografie Titelblatt

© Felix – stock.adobe.com

Gestaltung

Züriblauf, Geomatik + Vermessung, Stadt Zürich

1	Vorwort	4
2	Zusammenfassung	6
3	Glossar	10
4	Einleitung	12
5	Messprogramm 2024	14
6	Luftschadstoffe und Luftbelastung	18
6.1	Wetterverlauf 2024 und Einfluss auf die Luftbelastung	19
6.2	Stickoxide	19
6.3	Ozon	23
6.4	Feinstaub	27
6.5	Staubniederschlag	38
6.6	Flüchtige organische Verbindungen	39
6.7	Kohlenmonoxid	41
6.8	Schwefeldioxid	42
7	Projektmessung Biomassenverbrennung Bullingerhof	44
7.1	Lufthygienische Kennwerte 2024	45
7.2	Russbelastung	46
8	Luftbelastung an stark verkehrsbelasteten Standorten	48
8.1	Lokale Stickoxidbelastung an der Rosengartenstrasse	49
8.2	Manessestrasse	50
9	Ausblick: WHO Air Quality Guidelines	52
10	Literatur	56
	Anhang	60
A1	Immissions-Grenzwerte der LRV	61
A2	Messorte und erfasste Luftschadstoffparameter 2024	62
A3	Eingesetzte Messverfahren	63
A4	NO ₂ -Messungen im Detail	64
A4.1	NO ₂ -Messwerte 2020 und 2024	64
A4.2	NO ₂ -Tagesgrenzwertüberschreitungen	66
A5	Zusammensetzung PM ₁₀	66
A6	Schwermetallgehalte im Staubniederschlag	67
A7	Messunsicherheiten	68
A7.1	Ozon-Messungen	68
A7.2	Stickstoffdioxid-Messungen	69
A7.3	Feinstaub PM ₁₀ und PM _{2.5}	70
A7.4	Russ (TOT/EUSAAR)	70
A7.5	VOC	70
A7.6	Metallanalytik, Ionen (Salze), Ultrafeine Partikel	70

1

Vorwort

Wie sauber ist die Luft in der Stadt Zürich heute? Was braucht es, damit sie morgen noch besser wird? Ein dichtes Netz an Messstationen überwacht die Luftqualität in Zürich laufend. Alle vier Jahre ergänzen flächendeckende Messungen dieses Bild und zeigen, wie sich die Belastung entwickelt.

Die aktuelle Luftbilanz zeigt: Die Luftqualität in der Stadt Zürich hat sich weiter verbessert. Viele Werte liegen deutlich unter den gesetzlichen Grenzwerten. Das ist ein gutes Zeichen – aber kein Grund, nachzulassen. Entlang stark befahrener Strassen ist die Belastung mit Stickstoffdioxid weiterhin eine Herausforderung. Der motorisierte Individualverkehr bleibt einer der grössten Verursacher dieser Immissionen.

Auch die Belastung durch Feinstaub und Russ ist weiter gesunken. Dies zeigt, dass technische Fortschritte und gezielte Umweltschutzmassnahmen wirken. Die Weltgesundheitsorganisation (WHO) empfiehlt allerdings strengere Grenzwerte für Luftschadstoffe, weil auch geringe Schadstoffkonzentrationen für unsere Gesundheit relevant sind.

Zürich steht gut da. Trotzdem bleibt die Luftqualität eine wichtige Aufgabe, insbesondere weil städtische Lebensräume verdichtet werden. Indem wir klimafreundliche Mobilität fördern, Heizungen modernisieren und den Energieverbrauch senken, verbessern wir nicht nur das Klima, sondern auch die Luft, die wir alle atmen. Saubere Luft ist eine wichtige Grundlage für Gesundheit und Lebensqualität in unserer Stadt.

Andreas Hauri, Stadtrat
Vorsteher Gesundheits- und Umweltdepartement der Stadt Zürich

2

Zusammenfassung

Im Jahr 2024 führte der Umwelt- und Gesundheitsschutz Zürich (UGZ) eine erweiterte Messkampagne der Luftschadstoffe durch. Diese wird seit den 1980er Jahren alle vier Jahre durchgeführt. Dabei werden zusätzliche Schadstoffparameter gemessen, welche im Standardmessbetrieb nicht erfasst werden. Dazu gehören Metalle und Salze im Feinstaub PM10 sowie der Staubniederschlag der groben Partikel, einschliesslich seiner metallischen Inhaltsstoffe. Zudem zeigen jeweils räumlich verdichtete NO₂-Passivsammelmessungen die Belastungsentwicklung an diversen Standorten über eine lange Zeitperiode.

Belastungssituation 2024

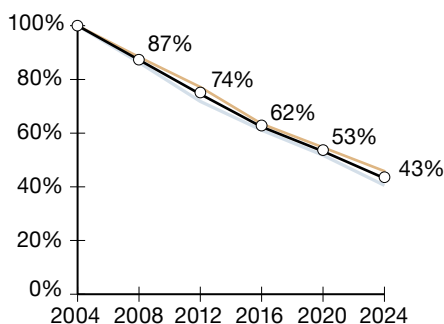
Die Luftqualität in Zürich verbesserte sich 2024 deutlich weiter, was sowohl an den sinkenden Emissionen als auch am günstigen Wetter lag. Besonders erfreulich: Der Langzeitgrenzwert für Feinstaub PM10 wurde an allen Messstandorten deutlich unterschritten. Beim Feinstaub PM2.5 gab es ebenfalls keine Überschreitungen, auch wenn die Werte teilweise nur knapp unter dem Grenzwert lagen. Hingegen wurde der Grenzwert für Stickstoffdioxid (NO₂) an starkbefahrenen Strassen weiterhin deutlich überschritten. Die Anzahl Grenzwertüberschreitungen bei den Ozon-Stundenwerten waren wetterbedingt unterdurchschnittlich. Jedoch zeigen die langjährigen Verlaufsdaten der Spitzenkonzentrationen, dass sich die Ozonbelastung über die Jahre kaum reduziert hat.

Schadstoffverlauf unter dem Einfluss von Massnahmen

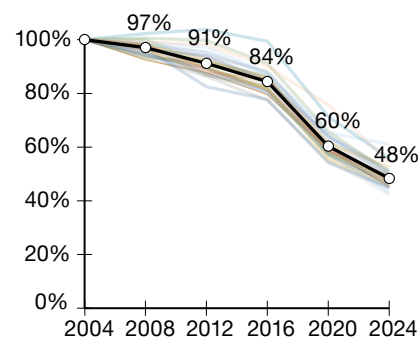
Vor 20 Jahren verlangsamte sich der zuvor deutliche Trend zur Verbesserung der Luftqualität. Dies, obwohl die theoretischen Emissionsfaktoren diverser Quellen markant sanken. Doch Mitte der 2010er Jahre nahm der positive Trend wieder zu. Während die Feinstaub-Belastung (PM10) kontinuierlich abnahm, zeigte sich bei den NO₂-Werten ein deutlicher Knick nach dem Jahr 2016. Die Vermutung liegt nahe, dass dieser plötzliche Rückgang der NO₂-Belastung mit dem «Dieselskandal» und den daraufhin eingeführten Massnahmen in Verbindung steht. Die beiden folgenden Verlaufsgrafiken zeigen, dass sich die in der Vergangenheit eingeführten lufthygienischen Massnahmen positiv auf die Luftqualität auswirkten.

Abbildung 1: Standardisierter Verlauf der NO₂- und PM10-Entwicklung der letzten 20 Jahre.

PM10 Entwicklung in den letzten 20 Jahren



NO₂-Entwicklung in den letzten 20 Jahren



Russ aus Biomasseverbrennungen

Der kanzerogene Russ entsteht bei der unvollständigen Verbrennung fossiler und biogener Brenn- und Treibstoffe. Die Russpartikel sind sehr klein und daher fallen sie fast vollständig in die Feinstaubfraktion PM_{2.5}. Mit Hilfe einer Messung der Russpartikel am Standort Bullingerhof konnten die dortigen Russquellen unterschieden werden: Rund die Hälfte des Russes im städtischen Hintergrund stammt aus der Verbrennung von Biomasse, wie Holzheizungen. An verkehrsreichen Strassen dominiert hingegen der Russ aus fossilen Quellen. Da die Feinstaubbelastung PM_{2.5} in Zürich zu einem grossen Teil aus dem Umland importiert wird, trägt auch die ländliche Umgebung massgeblich zur Russbelastung der Stadt bei. In ländlichen Regionen kann Russ aus Biomasseverbrennung sogar zwei Drittel der gesamten Belastung ausmachen.

WHO-Richtlinie 2021, neue Erkenntnisse alte Grenzwerte

Im September 2021 veröffentlichte die Weltgesundheitsorganisation (WHO) neue Empfehlungen zur Luftqualität [1], welche die bisherigen Richtwerte einiger Schadstoffe stark nach unten korrigierten. Grundlage dafür sind neue wissenschaftliche Erkenntnisse, welche zeigen, dass bereits geringe Schadstoffkonzentrationen negative Auswirkungen auf die Gesundheit haben.

Das Schweizer Umweltschutzgesetz (USG) verlangt, dass Grenzwerte so festgelegt werden, dass ein umfassender Schutz von Mensch und Umwelt gewährleistet ist. In den vergangenen Jahrzehnten orientierte sich die Schweizer Gesetzgebung an den WHO-Empfehlungen. Doch obwohl die Grenzwerte der Luftreinhalte-Verordnung (LRV) seit ihrer Einführung in den 1980er-Jahren mehrfach angepasst wurden, entsprechen sie heute nicht mehr den neusten Erkenntnissen. Die Eidgenössische Kommission für Lufthygiene (EKL) hat daher die neuen WHO-Empfehlungen beurteilt und dem Bundesrat ihren Bericht übergeben [2]. Die neuen verschärften WHO-Richtlinien zeigen den Weg auf, wie die Schweiz ihre Luftqualität weiter verbessern kann, um den hohen gesetzlichen Anforderungen zu entsprechen.

Zustand der Luftqualität in der Stadt Zürich – gestern und heute

Im Jahr 1986 trat die LRV in Kraft. Die darin formulierten Grenzwerte waren sehr ehrgeizig, entsprachen jedoch dem damaligen Wissensstand über die Wirkung von Luftschadstoffen auf Mensch und Umwelt. Damals wurde kaum einer dieser Werte eingehalten, wie die vereinfachte Darstellung in Tabelle 1 zeigt. Die Luftqualität war weit davon entfernt, den gesetzlichen Anforderungen zu genügen. Im Jahr 2024 hat sich dieses Bild grundlegend verändert. Die meisten Grenzwerte werden mittlerweile eingehalten. Nur noch wenige Schadstoffe zählen zur Kategorie «häufig überschritten». Falls die neuen, strengeren WHO-Richtlinien in die Schweizer Gesetzgebung aufgenommen werden, steht eine ähnlich grosse Aufgabe bevor wie in den 1980er-Jahren.

Tabelle 1: Vergleich der LRV-Grenzwert-Überschreitungen zwischen 1986 (Einführung der LRV) und 2024.

	Parameter	Grenzwert	1986	2024
Schwefeldioxid (SO₂)	Jahresmittelwert	30 µg/m ³	☹️	😊
	95 % der ½-h-Mittelwerte eines Jahres	100 µg/m ³	☹️	😊
	Anz. Tagesmittelwerte > 100 µg/m ³	Max. 1/Jahr	☹️	😊
Stickstoffdioxid (NO₂)	Jahresmittelwert	30 µg/m ³	☹️	😐
	95 % der ½-h-Mittelwerte eines Jahres	100 µg/m ³	☹️	😊
	Anz. Tagesmittelwerte > 80 µg/m ³	Max. 1/Jahr	☹️	😊
Kohlenmonoxid (CO)	Tagesmittelwert, max. 1 Überschreit. im Jahr	8 mg/m ³	😊	😊
Ozon (O₃)	98 % der ½-h-Mittelwerte eines Monats	100 µg/m ³	☹️	☹️
	Anz. Stundenmittelwerte > 120 µg/m ³	Max. 1/Jahr	☹️	☹️
Feinstaub PM10	Jahresmittelwert	20 µg/m ³	☹️	😊
	Anz. Tagesmittelwerte > 50 µg/m ³	Max. 3/Jahr	☹️	😊
Blei (Pb) im Feinstaub PM10	Jahresmittelwert	500 ng/m ³	☹️	😊
Cadmium (Cd) im Feinstaub PM10	Jahresmittelwert	1.5 ng/m ³	☹️	😊
Feinstaub PM2.5	Jahresmittel	10 µg/m ³	–	😐
Staubniederschlag	Jahresmittelwert	200 mg/m ² /d	☹️	😊
Blei (Pb) im Staubniederschlag	Jahresmittelwert	100 µg/m ² /d	☹️	😊
Cadmium (Cd) im Staubniederschlag	Jahresmittelwert	2 µg/m ² /d	☹️	😊
Zink (Zn) im Staubniederschlag	Jahresmittelwert	400 µg/m ² /d	☹️	😊

😊: Grenzwerte flächendeckend eingehalten

😐: Grenzwert selten oder an wenigen Orten überschritten

☹️: Grenzwerte häufiger überschritten

3

Glossar

Al	Aluminium	PAK/PAH	polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (polycyclic aromatic hydrocarbons)
ARE	Bundesamt für Raumentwicklung	Pb	Blei
BC	Black Carbon (Russ)	PM2.5	Particulate Matter, Partikel mit einem aerodynamischen Durchmesser < 2.5 µm
Ca²⁺	Calcium	PM10	Particulate Matter, Partikel mit einem aerodynamischen Durchmesser < 10 µm
Cl⁻	Chlorid	PN/PNC	Partikelanzahlkonzentration
Cd	Cadmium	Sb	Antimon
CO	Kohlenmonoxid	Sn	Zinn
Co	Kobalt	SO₂	Schwefeldioxid
Cr	Chrom	SO₄²⁻	Sulfat
Cu	Kupfer	Th	Thallium
d	Tag	TSP	Gesamtschwebstaub (Total suspended particulates)
DTV	Durchschnittlicher täglicher Verkehr	UFP	Ultrafeine Partikel
DTVs	Durchschnittlicher täglicher Verkehr, Schwerverkehr zehnfach gewichtet	UGZ	Umwelt- und Gesundheitsschutz Zürich
EC	elementarer Kohlenstoff (Russ)	USG	Umweltschutzgesetz
EKL	Eidgenössische Kommission für Lufthygiene	UV	ultraviolett
Emission	Schadstoffausstoss	VOC	flüchtige organische Verbindungen (volatile organic compounds)
Empa	Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Materials Science and Technology)	WHO	Weltgesundheitsorganisation (World Health Organization)
Fe	Eisen	Zn	Zink
Fz.	Fahrzeuge		
HVS	High Volume Sampler		
Immission	Schadstoffeinwirkung		
K⁺	Kalium		
kanzerogen	krebserregend		
KVA	Kehrichtverbrennungsanlage		
LRV	Luftreinhalte-Verordnung		
mg	Milligramm (1 tausendstel Gramm)		
m²	Quadratmeter		
m³	Kubikmeter		
µg	Mikrogramm (1 millionstel Gramm)		
µm	Mikrometer (1 millionstel Meter)		
Mg²⁺	Magnesiumion		
Mn	Mangan		
Mo	Molybdän		
mutagen	erbgutverändernd		
N₂	Stickstoff		
Na⁺	Natriumion		
NH₃	Ammoniak		
NH₄⁺	Ammonium		
Ni	Nickel		
nm	Nanometer (1 milliardstel Meter)		
NO	Stickstoffmonoxid		
NO₂	Stickstoffdioxid		
NO₃⁻	Nitrat		
NO_x	Stickoxide		
O₂	Sauerstoff		
O₃	Ozon		
OC	organischer Kohlenstoff (organic carbon)		
OM	organisches Material (organic matter)		

4

Einleitung

Die Luftverschmutzung führt in der Schweiz jährlich zu über 2000 frühzeitigen Todesfällen [3, 4]. Allein in der Stadt Zürich entstehen dadurch Gesundheitskosten von ca. 1.4 Mia. Schweizer Franken [5].

Der Schutz von Mensch und Umwelt vor negativen Auswirkungen von Luftschadstoffen ist im Artikel 14 des Umweltschutzgesetzes (USG) festgehalten [6]. Gemäss USG sind Immissionsgrenzwerte so festzulegen, dass ein umfassender und nachhaltiger Schutz von Mensch und Umwelt gewährleistet ist. In der Luftreinhalte-Verordnung (LRV) [7] werden diese Immissionsgrenzwerte definiert.

Da in städtischen Gebieten die gesundheitsschädlichen Stoffe vielfach in unmittelbarer Nähe von Menschen in die Aussenluft gelangen, tragen die Städte eine besonders grosse Verantwortung für den Schutz der Wohn- und Arbeitsbevölkerung. Die Gesundheitsbehörden der Stadt Zürich, vertreten durch den Umwelt- und Gesundheitsschutz (UGZ), sind sich dieser Rolle seit Jahrzehnten bewusst. Heute ist bekannt, dass selbst Luftbelastungen unterhalb der aktuellen Grenzwerte der Luftreinhalte-Verordnung (LRV) schädlich sein können. Das zeigt, wie wichtig es ist, die Luftqualität kontinuierlich zu überwachen und zu verbessern.

Das Überwachungskonzept für Luftschadstoffe in der Stadt Zürich basiert auf den folgenden Komponenten:

- **Ein kontinuierliches Messnetz:** Dauerhaft betriebene Messstationen an charakteristischen Standorten liefern rund um die Uhr verlässliche Daten zur Luftbelastung in der Stadt.
- **Flexible und gezielte Messungen:** Eine mobile Messstation kommt bei spezifischen Fragestellungen zum Einsatz. Ergänzt wird dies durch ein engmaschiges Netz von Stickstoffdioxid (NO₂)-Passivsammlern, die eine hohe räumliche Abdeckung ermöglichen.
- **Spezialanalysen:** In regelmässigen Abständen werden Proben auf krebserregende und erbgutverändernde Stoffe wie Benzol oder elementarer Kohlenstoff analysiert.
- **Kampagnen:** Alle vier Jahre wird eine erweiterte Messkampagne durchgeführt. Diese liefert eine verbesserte räumliche Auflösung und erfasst zusätzliche Messgrössen wie den Staubbiederschlag.

Diese umfassenden Messungen bilden die Grundlage für die vierjährige Luftbilanz – das lufthygienische Fazit zur Qualität der Zürcher Luft.

5

Messprogramm 2024

Insgesamt wurden in der Stadt Zürich 2024 an 47 Standorten Messungen durchgeführt (Abbildung 2).

- Vier UGZ-Dauermessstationen (blaue Punkte; Anhang A2): Rosengarten (28), Schimmelstrasse (29), Schulhaus Heubeeribüel (30), Stampfenbachstrasse (38).
- Projektmessstation Biomassenverbrennung (roter Punkt; Anhang A2): Bullingerhof (47) mit Online-Russmessung.
- Projektmessung Hotspot (roter Punkt; Anhang A2): Manessestrasse (22) mit zwei High Volume Samplern und zwei NO₂-Passivsamplern.
- VOC-Messstandorte mit NO₂-Passivsamplern (Anhang A2): Bellevue (5; grüner Punkt) und an den vier UGZ-Dauermessstationen (blaue Punkte; Rosengarten (28), Schimmelstrasse (29), Schulhaus Heubeeribüel (30), Stampfenbachstrasse (38))
- NO₂-Passivsamplern (grüne Punkte; Anhang A4.1): Die restlichen Messstandorte waren ausschliesslich mit NO₂-Passivsamplern ausgerüstet.

Abbildung 2: Übersichts-karte über die im Jahr 2024 betriebenen Mess-standorte. Blau markiert sind kontinuierliche Messungen. Grün sind Passivsammler gekennzeichnet und rot steht für die beiden Projekt-messungen.

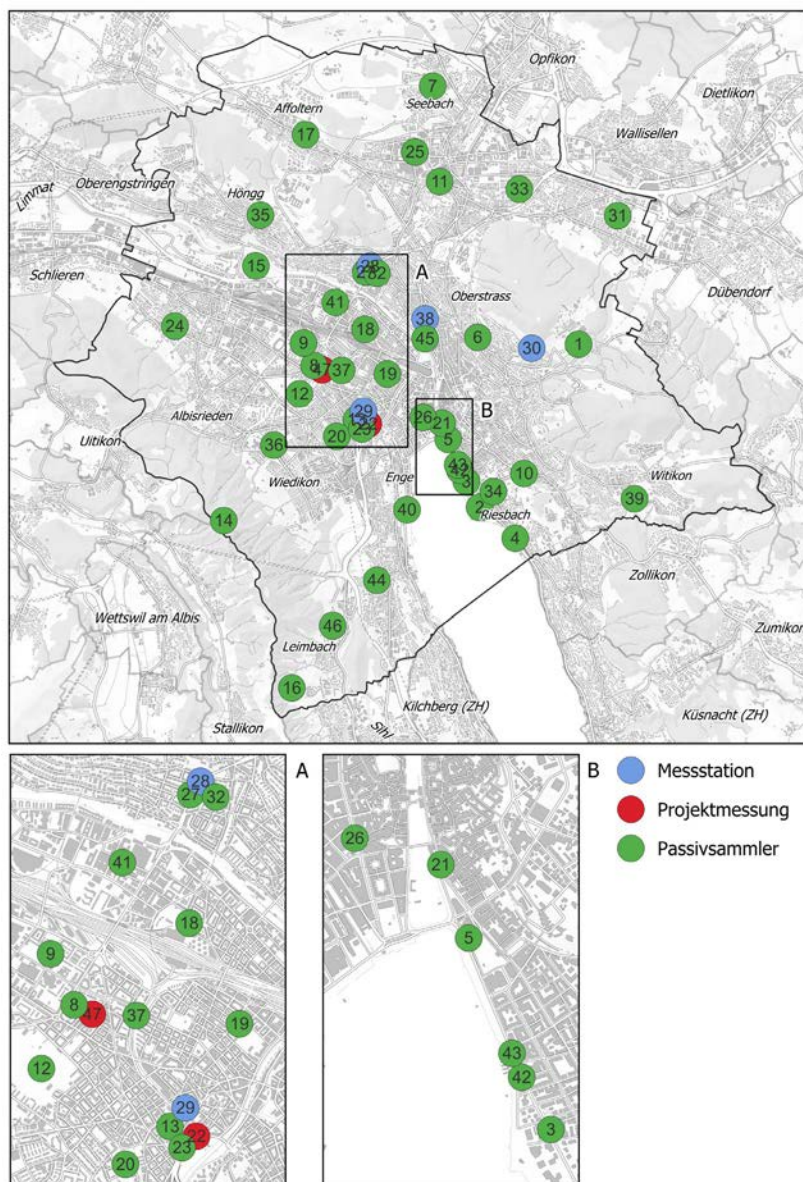


Tabelle 2: Messstationen und Hotspot-Messung der Messkampagne 2024.



Messort Nr. 47
Zürich – Bullingerhof
Projektmessung Biomassenverbrennung



Messort Nr. 22
Zürich – Manessestrasse 20
Projektmessung Hotspot



Messort Nr. 28
Zürich – Rosengartenstrasse
Dauermessung, starker Verkehrseinfluss



Messort Nr. 29
Zürich – Schimmelstrasse
Dauermessung, starker Verkehrseinfluss



Messort Nr. 30
Zürich – Schulhaus Heubeeribüel
Dauermessung, Naherholungsgebiet,
Hintergrundbelastung



Messort Nr. 38
Zürich – Stampfenbachstrasse
Dauermessung, mittlere städtische Belastung

6

Luftschadstoffe und Luftbelastung

Die Verbrennung fossiler Energieträger ist weltweit eine der Hauptursachen für Luftverschmutzung. Dabei entstehen verschiedene schädliche Stoffe. Es wird zwischen zwei Kategorien unterschieden:

- Primärschadstoffe:** Diese Stoffe, wie zum Beispiel Kohlenmonoxid, werden direkt in die Umwelt freigesetzt.
- Sekundärschadstoffe:** Diese bilden sich erst in der Atmosphäre durch chemische Reaktionen. Dazu gehören Ozon und Stickstoffdioxid.

Obwohl hunderte unterschiedlicher Fremdstoffe in der Stadtluft nachweisbar sind, konzentrieren sich Messungen auf die wichtigsten «Leitschadstoffe». Ihre schädlichen Auswirkungen auf Mensch und Umwelt machen sie zu den entscheidenden Indikatoren für die Luftqualität. Die wichtigsten davon sind: Stickoxide, Ozon, Feinstaub, Staubbiederschlag, flüchtige organische Verbindungen, Kohlenmonoxid und Schwefeldioxid.

6.1 Wetterverlauf 2024 und Einfluss auf die Luftbelastung

Während die Schadstoffemissionen die Luftqualität vor allem langfristig prägen, spielt das Wetter eine entscheidende Rolle für kurzfristige Schwankungen. Deshalb sind die Schadstoffwerte von 2024 auch unter Einbezug des Wettereinflusses während dieser Zeit zu beurteilen.

Das Jahr 2024 war hauptsächlich durch Wetterlagen geprägt, welche eher niedrigere Schadstoffkonzentrationen begünstigten. Dies gilt sowohl für den Feinstaub und die Stickoxide als auch für die Ozonbelastungen im Sommerhalbjahr.

Tabelle 3: Zusammenfassung des Wettergeschehens im Jahr 2024 und dessen Einfluss auf die Schadstoffkonzentrationen.

Jahresbeginn	Januar und Februar waren aussergewöhnlich mild. 2024 verzeichnete den mildesten Februar seit Messbeginn von MeteoSchweiz im Jahr 1864. Häufige Wetterwechsel verhinderten lange Hochdruckphasen, während denen sich ausgeprägte Inversionslagen hätten bilden können. Dies kam der Luftqualität zugute und sorgte für relativ niedrige Schadstoffkonzentrationen
Frühling	März und Mai waren überdurchschnittlich nass und wechselhaft. Diese Wetterlagen begünstigten niedrige Luftschadstoffwerte. Oft bestimmten Südwestlagen das Wetter, was um Ostern auch zu einem grösseren Saharastaubereignis führte.
Sommer	Juni und Juli verzeichneten Temperaturen leicht über dem Durchschnitt, jedoch waren wolkenlose Tage selten. Dies verhinderte vielfach eine Überschreitung der Ozongrenzwerte. Der August brachte weniger Bewölkung und Temperaturen von 2.5 °C über der langjährigen Norm, aber die bereits geringere Sonnenintensität wirkte sich dämpfend auf die Ozonbildung aus.
Jahresende	Die Herbstmonate waren in weiten Teilen der Schweiz zu feucht. Nördlich der Alpen bewegten sich die Niederschlagsmengen im Bereich von 130 Prozent der üblichen Mengen. Zudem wurden im November Rekordschneemengen verzeichnet. Bis Mitte Dezember hielt das recht wechselhafte Wetter an, bevor sich in der letzten Woche des Jahres ein Hochdruckgebiet mit schönem Wetter in den Bergen einstellte. Auch diese Wetterlagen begünstigten grösstenteils niedrige Luftschadstoffwerte.

6.2 Stickoxide

Entstehung

Stickoxide (NO_x) entstehen als unerwünschte Nebenprodukte bei Verbrennungsvorgängen. Bei sehr hohen Temperaturen reagiert Stickstoff aus der Luft mit Sauerstoff und bildet Stickstoffmonoxid (NO). Ein weiterer Teil der Stickoxide stammt aus dem in Brenn- und Treibstoffen enthaltenen Stickstoff. Bei beiden Prozessen entsteht vor allem Stickstoffmonoxid (NO), welches in der Atmosphäre rasch in das giftige Stickstoffdioxid (NO₂) umgewandelt wird. Die Summe von NO und NO₂ wird als NO_x bezeichnet. In der LRV sind Immissionsgrenzwerte für das giftige NO₂ definiert worden (Anhang A1).

Abbildung 3 zeigt die Emissionen der Stickoxide basierend auf den Daten des Emissionskatasters der Stadt Zürich. Rund die Hälfte der Stickoxidemissionen in der Stadt Zürich stammt im Jahr 2022 aus dem motorisierten Strassenverkehr. Feuerungsanlagen und die Verbrennung von Siedlungsabfällen in Kehrichtverbrennungsanlagen (KVA) sind für einen Drittel der Emissionen verantwortlich. Der Rest wird durch viele einzelne Quellen, wie das Baugewerbe, oder industrielle respektive landwirtschaftliche Fahrzeuge emittiert. Die Gesamtemissionen von NO_x sind auch im Jahr 2022 weiter gesunken. Die Abnahme verlangsamt sich jedoch, da das Optimierungspotenzial bei vielen Quellen bereits weitgehend ausgeschöpft ist.

NO_x-Emissionen

Tonnen/Jahr

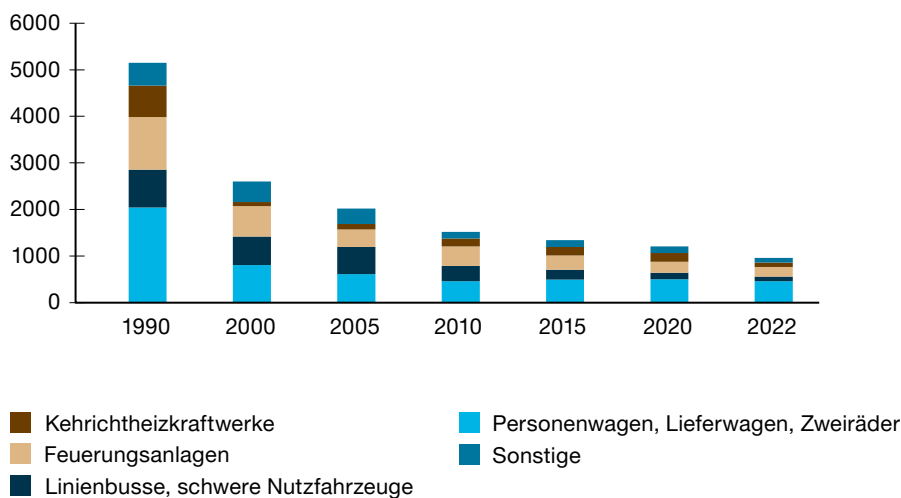


Abbildung 3: Stickoxid-Emissionen in der Stadt Zürich nach Verursachergruppen. (Prozentuale Anteile 2022: 48 % Personenwagen/Linienbusse/Nutzfahrzeuge, 22 % Feuerungsanlagen, 10 % Kehrichtheizkraftwerke, 10 % Sonstige) [8].

Gesundheitliche Auswirkungen

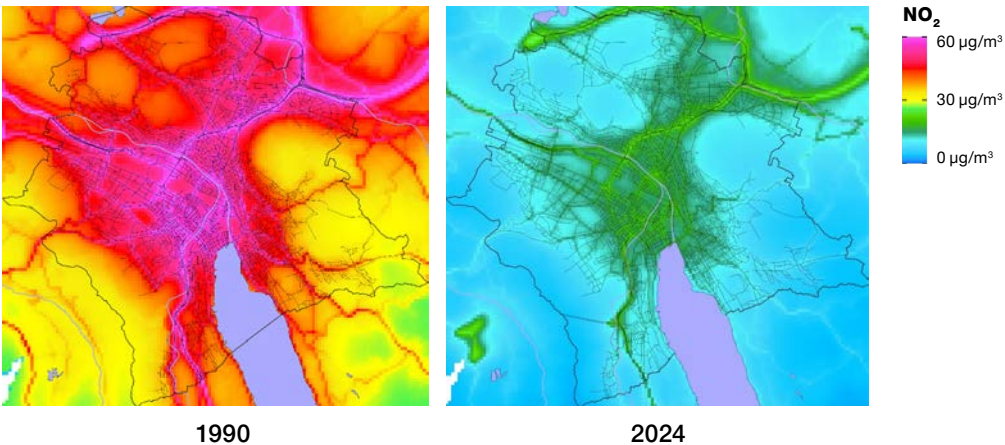
Stickoxide sind hoch reaktive Luftschadstoffe. Insbesondere Stickstoffdioxid (NO₂) reizt die Atemwege und kann zu Zellschäden im Atemtrakt führen, was Atemwegserkrankungen begünstigt. Eingeatmetes Stickstoffdioxid wird in der Lunge teilweise absorbiert, kann als giftiges Nitrit ins Blut gelangen und so den Sauerstofftransport behindern. Neuere Studien zeigen, dass gesundheitliche Schäden im Zusammenhang mit NO₂ bereits bei Belastungen unterhalb der geltenden Schweizer Grenzwerte auftreten können [9], [10].

Vereinzelte Grenzwertüberschreitungen an Hauptverkehrsachsen

Die Reduktion der Stickoxid-Emissionen hat in den letzten dreissig Jahren zu einer starken Verbesserung der Luftbelastung geführt. Lag 1990 die Stickstoffdioxid-Konzentration beinahe auf dem gesamten Stadtgebiet über dem LRV-Jahresgrenzwert von 30 µg/m³, wird dieser heute an den meisten Orten eingehalten (Abbildung 4).

Trotz dieser Fortschritte wird der Grenzwert entlang stark befahrener Hauptverkehrsachsen weiterhin überschritten. Dies betrifft oft dicht besiedelte, zentrumsnahe Gebiete mit regem Publikumsverkehr. Deshalb besteht bezüglich einer Minderung der Stickstoffdioxid-Belastung weiterhin ein grosser Handlungsbedarf.

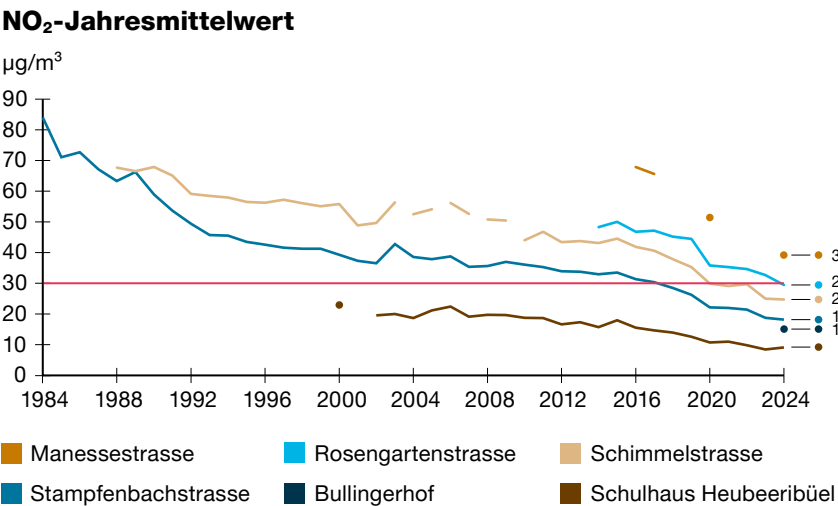
Abbildung 4: Stickstoffdioxid-Belastung 1990 (links) und 2024 (rechts) anhand der Jahresmittelwerte. Gelb = Belastung in Höhe des Grenzwertes (Quelle: Immissionsmodellierung UGZ¹).



Langzeitentwicklung NO₂-Belastungen

Nach einer starken Reduktion der chronischen Luftschadstoffbelastung in den 1980er und 1990er Jahren verlangsamte sich die Abnahme der Stickstoffdioxidkonzentration in den 2000er Jahren, wie dies die Langzeitmessungen der Messstation an der Stampfenbachstrasse deutlich zeigen (Abbildung 5). Seit ca. 2016 beschleunigte sich die Abnahme jedoch wieder markant.

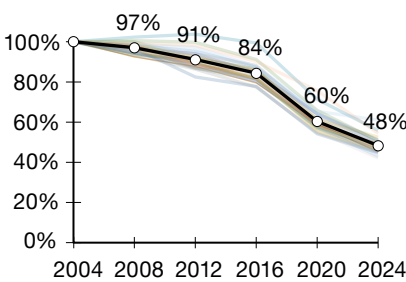
Abbildung 5: Entwicklung der Luftbelastung durch Stickstoffdioxid (Jahresmittelwerte von 1984–2024). Rote Linie: Grenzwert LRV.



Diese positive Entwicklung fällt zeitlich auffallend mit der Aufdeckung des «Dieselskandals» und den damals eingeführten Software-Updates zusammen. Dies und die steigende Zahl von Elektro- und Hybridfahrzeugen haben die Stickoxidemissionen deutlich sinken lassen. In der Schweiz lag deren Anteil 2024 bei fast 14 % [11]. Insgesamt ist die durchschnittliche NO₂-Belastung an den Zürcher Messorten seit 2004 um etwa die Hälfte zurückgegangen (Abbildung 6), was den Erfolg der Massnahmen beweist.

Abbildung 6: Standardisierte Entwicklung der NO₂-Konzentrationen an 27 Passivsammlermessorten zwischen 2004 und 2024.

NO₂-Entwicklung in den letzten 20 Jahren



¹ Die Karte basiert auf Modellberechnungen. Die Auflösung der Karte beträgt 100x100m und kann daher lokale Spitzenbelastungen nicht korrekt abbilden.

NO₂-Passivsammler

Das Messnetz aus NO₂-Passivsammlern liefert ein räumlich differenzierteres Bild von der Belastungssituation in der Stadt Zürich. Während an verkehrsarmen Orten die Grenzwerte immer eingehalten wurden, kam es 2024 an verkehrsreichen Standorten weiterhin zu Überschreitungen. Allerdings waren diese weniger stark ausgeprägt als noch 2020 (Abbildung 7).

Neben der Verkehrsbelastung tragen auch die Zentrumsnähe oder ungünstige Umgebungsbedingungen zur Höhe der Luftbelastung bei. An der Manessestrasse etwa führt ein Lichtsignal mit einer anschliessend ansteigenden Fahrbahn zu starken Beschleunigungen. Diese Faktoren begünstigen hohe Verkehrsemissionen.

NO₂-Passivsammler nach Verkehrsbelastung

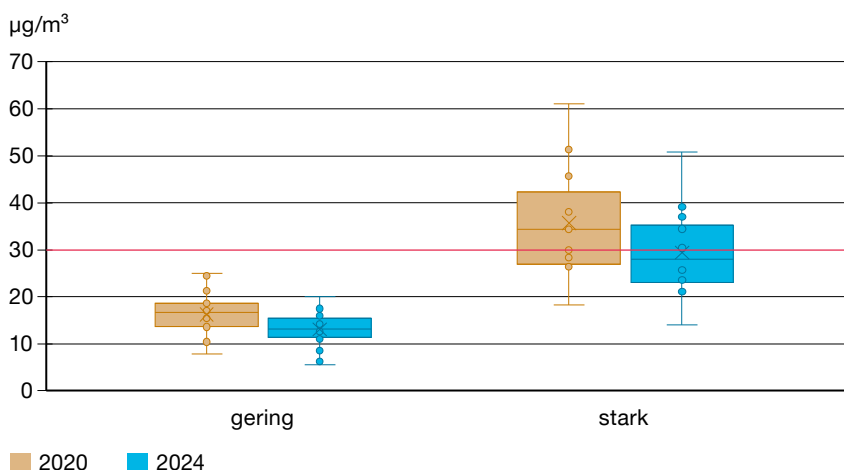


Abbildung 7: Verteilung der NO₂-Belastung aller Passivsammler-Messorte 2020 und 2024 in Abhängigkeit zur Verkehrsexposition (Klassierung anhand des durchschnittlichen täglichen Verkehrs mit zehnfacher Gewichtung des Schwerverkehrs (DTVs): gering = DTVs < 10 000 Fz./d, stark = DTVs > 10 000 Fz./d). Rote Linie: Grenzwert LRV.

Die NO₂-Belastungen in der Stadt Zürich sind stark von lokalen Bedingungen abhängig und können daher sehr unterschiedlich ausfallen. Orte mit hohen Konzentrationen können in allen Stadtkreisen auftreten. Im Vergleich zu 2020 nahm die NO₂-Belastung an allen Messstandorten ab.

NO₂-Passivsammler, Jahresmittelwerte nach Stadtkreis

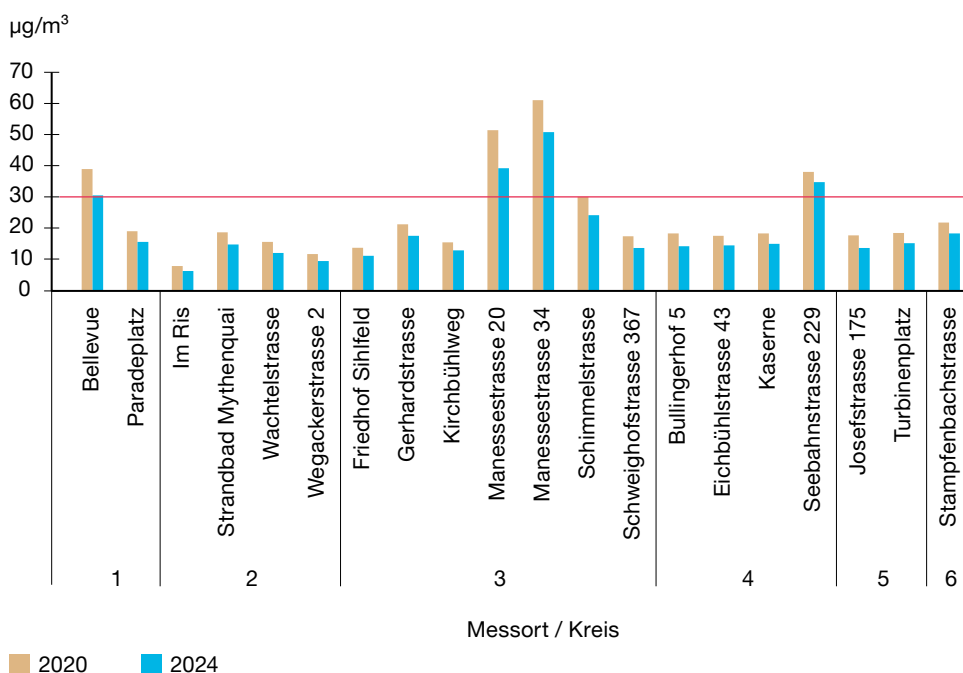
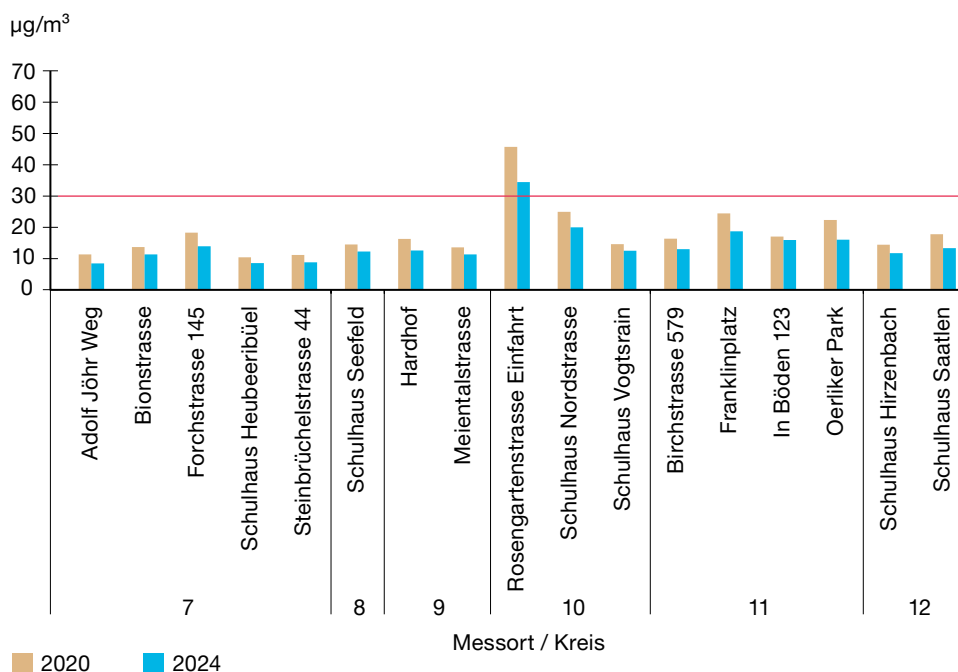


Abbildung 8: Stickstoffdioxid-Passivsammler-Jahresmittelwerte 2020 und 2024 nach Stadtkreis. Rote Linie: Grenzwert LRV.

NO₂-Passivsammler, Jahresmittelwerte nach Stadtkreis



6.3 Ozon

Entstehung

Ozon (O₃) ist eines der wichtigsten Spurengase der Atmosphäre. Die kurzwellige harte UV-Strahlung der Sonne erzeugt in der oberen Atmosphäre, durch Spaltung von Sauerstoffmolekülen, Ozon. Da gleichzeitig auch Ozon abgebaut wird, entsteht ein chemisches Gleichgewicht, welches in 15 bis 30 km Höhe die lebenswichtige Ozonschicht entstehen lässt [12]. Diese schützt die Erdoberfläche weitgehend vor der schädlichen UV-Strahlung.

In den erdnahen Schichten jedoch, in der sogenannten Troposphäre, wird Ozon zu einem gefährlichen Luftschadstoff. Dieses bodennahe Ozon wird nicht direkt ausgestossen. Es ist ein sekundärer Schadstoff, der sich aus Vorläufersubstanzen bildet. Diese Vorläufer, hauptsächlich Stickoxide (NO_x; Abschnitt 6.2) und flüchtige organische Verbindungen (VOCs; Abschnitt 6.6), stammen zum grössten Teil aus menschlichen Aktivitäten, wie den Abgasen von Fahrzeugen. Bei starker UV-Einstrahlung und hohen Temperaturen, wie an heissen Sommertagen, wird aus diesen Schadstoffen durch komplexe photochemische Prozesse Ozon gebildet [13].

Ein kleiner Anteil der troposphärischen Ozonbelastung stammt auch aus natürlichen Prozessen. Dabei handelt es sich um Ozon aus der Stratosphäre, das in die Troposphäre diffundiert [14], sowie um Ozon aus biogen erzeugten Vorläuferstoffen wie flüchtige organische Verbindungen. Es gibt keine nennenswerten Quellen, die Ozon direkt in die Luft abgeben.

Ozon ist in höheren Luftschichten sehr langlebig und kann, abhängig von der Wetterlage, weite Distanzen zurücklegen. So tragen Emissionen der gesamten nördlichen Erdhemisphäre wesentlich zur aktuellen Ozonbelastung in der Schweiz bei [15]. Durch vertikale Austausch- und Mischprozesse gelangt dieses globale und regionale Ozon in die bodennahen Luftmassen. Zusammen mit natürlichen Beiträgen kann dies bei sommerlichen Schönwetterlagen zu hohen Grundbelastungen führen. Dieser grosse Anteil kann somit durch lokale Reduktionsmassnahmen der Vorläuferschadstoffe nicht beeinflusst werden.

Gesundheitliche Auswirkungen

Die schädlichen Effekte von Ozon auf Mensch, Tier und Pflanzen beruhen auf seiner hohen Oxidationskraft. Ozon wirkt dort schädlich, wo es auftritt: auf Blattoberflächen von Pflanzen oder tief im menschlichen Atemtrakt. Aufgrund seiner geringen Wasserlöslichkeit dringt Ozon tief in die Lunge ein und kann dort das Gewebe schädigen, welches nicht durch eine schützende Schleimschicht bedeckt ist.

Die Empfindlichkeit gegenüber Ozon ist individuell verschieden. Es können Symptome wie Halsreizungen, Augenbrennen und Kopfschmerzen auftreten. Diese Beeinträchtigungen hängen von der Dauer des Aufenthalts in der mit Ozon belasteten Aussenluft und der Höhe der Ozonbelastung ab. Bei sehr hohen Ozonkonzentrationen, ab ca. $180\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$, kann es bei längerem Aufenthalt im Freien und reger körperlicher Aktivität zu Einschränkungen der Lungenfunktion und vorübergehender verminderter körperlicher Leistungsfähigkeit kommen.

Langzeitverlauf der Ozonbelastung

Obwohl NO_x - und VOC-Emissionen in Zürich seit 1990 um über 75% gesunken sind, hat sich die Ozon-Belastung nur leicht verringert. Die Anzahl der Grenzwertüberschreitungen hat sich in den letzten 30 Jahren nur geringfügig reduziert. In Jahren mit heissen Sommern werden beim Schulhaus Heubeeribüel immer noch rund 400 Überschreitungen verzeichnet (Abbildung 9). Dafür sind unterschiedliche Faktoren verantwortlich. Neben der Meteorologie spielt auch die Menge der Vorläuferschadstoffe, deren Verhältnis sowie der überregionale Transport von Ozon eine entscheidende Rolle.

Anzahl Überschreitungen des Ozon-Stundengrenzwertes

Anzahl Überschreitungen

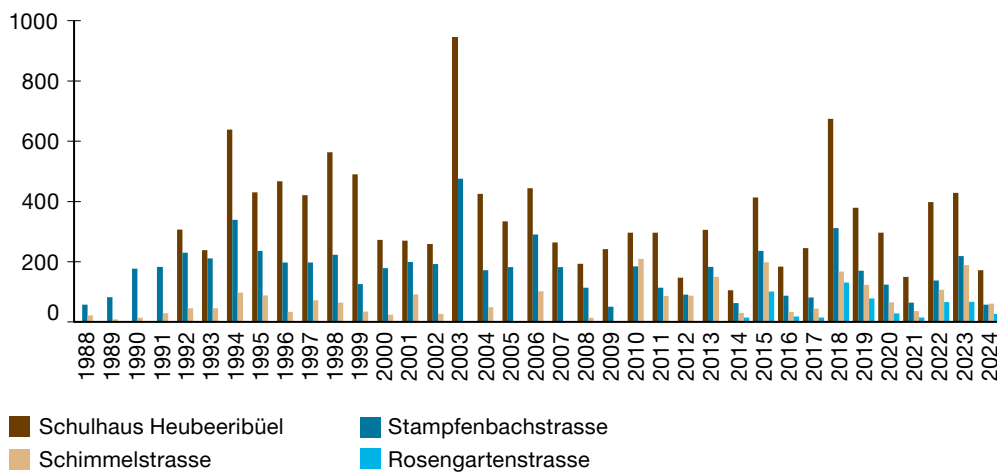
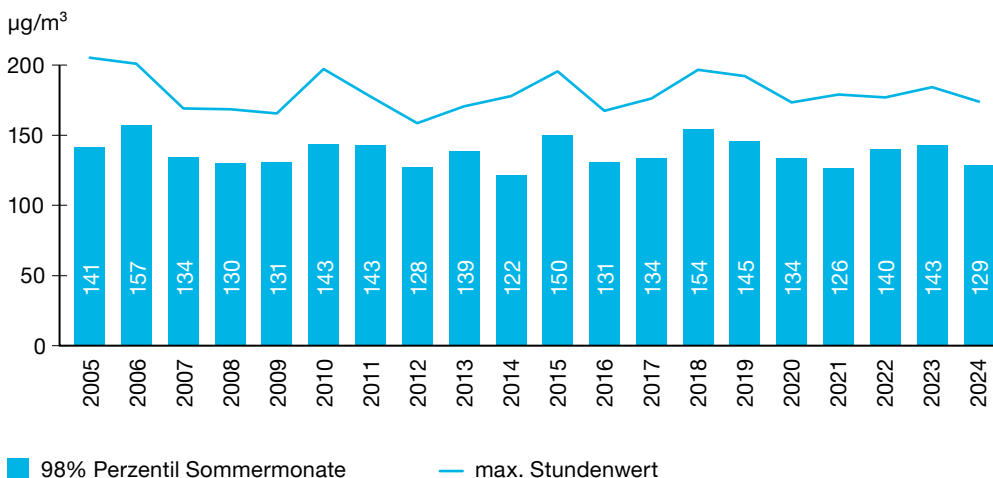


Abbildung 9: Anzahl Überschreitungen des Stundengrenzwertes für Ozon von 1988 bis 2024. Grenzwert LRV: Der Stundenmittelwert von $120\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ darf höchstens einmal pro Jahr überschritten werden.

Die Anzahl der Ozon-Grenzwertüberschreitungen ist stark durch Wetterlagen beeinflusst. Ozon-Spitzenkonzentrationen innerhalb eines Jahres hingegen weisen eine höhere Stabilität gegenüber Jahren mit unterschiedlich sonnigen Sommern auf. Wird das 98%-Perzentil der Monate April bis September, oder die maximalen Ozon-Stundenkonzentrationen an allen Messstationen über die letzten 20 Jahre betrachtet, ist nur eine sehr geringe Abnahme der Ozonbelastung zu beobachten (Abbildung 10).

Abbildung 10: Entwicklung des mittleren 98%-Perzentils der Ozon-Stundenwerte in den Sommermonaten April bis September sowie der maximalen Stundenkonzentration aller UGZ-Messstationen.

Ozon-Spitzenbelastungen Stadt Zürich



Klimawandel und Ozonbelastung

Die Ozonbildung und damit die Entstehung von Sommersmog hängt stark von den meteorologischen Bedingungen ab. In Jahren mit heissen und sonnigen Sommern kommt es zu mehr und höheren Grenzwertüberschreitungen als bei feuchterem, kühlem Sommerwetter. Die Anzahl Überschreitungen des Ozongrenzwertes kann somit von Jahr zu Jahr stark variieren. So weisen z. B. die Hitzesommer 1994, 2003 und 2018 wesentlich mehr Überschreitungen auf als die restlichen Jahre (Abbildung 9).

Durch den Klimawandel ist in der Schweiz zukünftig mit einem häufigeren Auftreten von langanhaltenden, heissen Schönwetterlagen im Sommer zu rechnen [15]. Der fortschreitende Klimawandel könnte die Ozonbelastung somit negativ beeinflussen und die bereits erreichten Erfolge gefährden. Dies könnte den bisherigen leichten Trend zu niedrigeren Spitzenwerten beenden.

Ozonbelastung 2024 und Wetterabhängigkeit

Gesundheitlich relevant sind hauptsächlich die Ozon-Spitzenbelastungen. Diese Belastungen korrelieren stark mit den Wetterverhältnissen des entsprechenden Sommers. In Abbildung 11 ist die monatliche Anzahl Grenzwertüberschreitungen des Ozonstundenwertes der letzten beiden Jahre dargestellt. Während der Sommer 2023 von zwei längeren Hitzeperioden und einer leicht überdurchschnittlichen Sonnenscheindauer geprägt war [16], zeichnete sich der Sommer 2024 vor allem durch einen trüben Juni aus [17]. Da im Juni und Juli die Sonnenstrahlung jeweils am intensivsten ist, wirken sich die Wetter-situationen in diesen Monaten am stärksten auf die Anzahl O₃-Überschreitungen aus. So hatte der trübe Juni 2024 einen erheblichen Einfluss auf die Anzahl Ozon-Grenzwert-überschreitungen. Während im Juni 2023 im Heubeeribüel 240 Überschreitungen gemessen wurden, waren es im Juni 2024 nur deren fünf.

Anzahl Überschreitungen des Ozonstundengrenzwertes Schulhaus Heubeeribüel

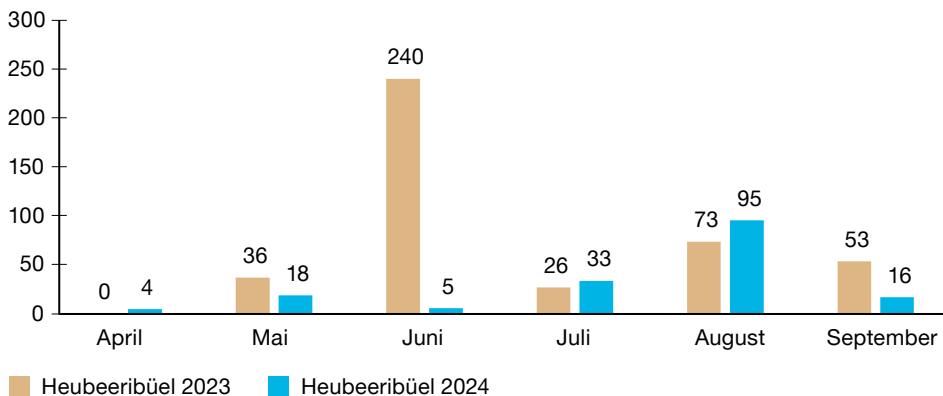


Abbildung 11: Anzahl Überschreitungen des Ozonstundengrenzwertes, verteilt auf die Monate der Jahre 2023 und 2024. Grenzwert LRV: Der Stundenmittelwert von $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ darf höchstens einmal pro Jahr überschritten werden.

Die Wetterabhängigkeit der Ozonbelastung zeigt sich auch in den Immissionskarten für Ozon. Diese modellierten Karten zeigen die Verteilung der Ozonüberschreitungen auf Stadtgebiet für das Jahr 2024. Während 2023 in der Peripherie des Stadtgebietes noch ca. 400 Überschreitungen zu verzeichnen waren, reduzierte sich diese Anzahl 2024 auf rund 200 Stundenwerte.

Anzahl Überschreitungen des Ozonstundengrenzwertes

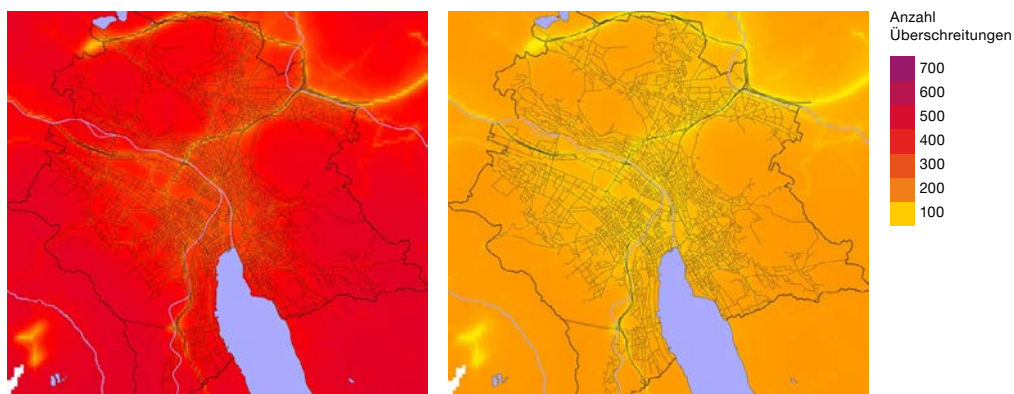


Abbildung 12: Anzahl Überschreitungen des Ozonstundengrenzwertes 2023 und 2024 im Vergleich (Quelle: Immissionsmodellierung UGZ²).

Lokale Belastungsunterschiede

Die höchsten Ozon-Belastungen treten nicht an strassennahen, verkehrsbelasteten Standorten, sondern am Stadtrand bzw. in der Agglomeration auf. An strassennahen Standorten wird das gebildete Ozon teilweise durch die vom Strassenverkehr emittierten Stickoxide fortlaufend abgebaut. Dies führt zu weniger Grenzwertüberschreitungen.

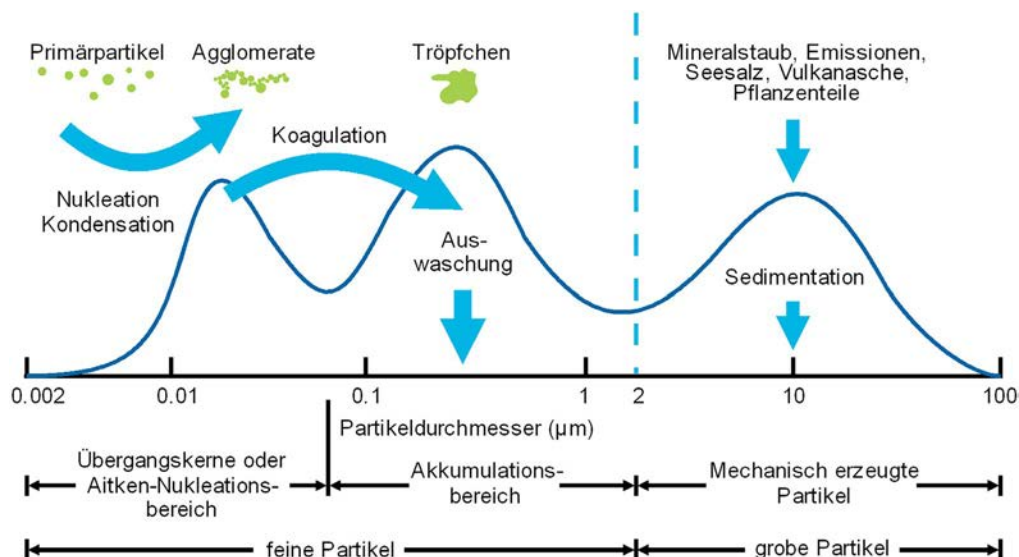
Bei strassenfernen Standorten wird Ozon weniger abgebaut, da weniger Reaktionspartner wie Stickoxide vorhanden sind. Somit können sich die Ozonkonzentrationen während anhaltender Schönwetterperioden kontinuierlich aufbauen. Auf Stadtgebiet werden deshalb die meisten Überschreitungen des Stundengrenzwerts jeweils am Hintergrund-Standort Schulhaus Heubeeribüel verzeichnet (Abbildung 9).

² Die Karte basiert auf Modellberechnungen. Die Auflösung der Karte beträgt $100\text{m} \times 100\text{m}$ und kann daher lokale Spitzenbelastungen nicht korrekt abbilden.

6.4 Feinstaub

Feinstaub besteht aus Partikeln verschiedenster Grössen und einer Mischung diverser chemischer Substanzen. Dabei variieren die Durchmesser der Partikel über vier Zehnerpotenzen. Die Kombination von Grösse und chemischer Zusammensetzung bestimmt über ihre Wirkung.

Abbildung 13: Schematische multimodale Partikelgrössenverteilung (modifiziert nach [18], [19])



6.4.1 Einteilung und Entstehung

Die Partikel werden aufgrund ihres aerodynamischen Durchmessers in verschiedene Grössenklassen unterschieden. Mit der Partikelgrösse ändert sich auch die Eindringtiefe in den Atemtrakt und damit ihre gesundheitsrelevanten Wirkungen. Partikel in der Grössenklasse Feinstaub PM₁₀ (inhalierbarer Feinstaub) weisen einen Durchmesser von höchstens 10 μm auf, während Partikel im PM_{2.5} (lungengängiger Feinstaub) höchstens 2.5 μm gross sind. Ultrafeine Partikel (UFP) sind kleiner als 0.1 μm .

Feinstaubbelastungen von PM₁₀ und PM_{2.5} werden als Masskonzentrationen ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) angegeben, während ultrafeine Partikel als Partikelanzahl pro Volumeneinheit der Luft ($1/\text{cm}^3$) gemessen (gezählt) werden. Obwohl die ultrafeinen Partikel anzahlmässig den grössten Anteil des Feinstaubs darstellen, machen sie nur einen geringen Anteil der Gesamtmasse des Feinstaubs aus [20], [21], [22].

Feinstaub wird zudem in primären und sekundären Feinstaub unterteilt. Primärer Feinstaub wird direkt emittiert und umfasst sowohl Partikel aus Verbrennungs- und Abriebprozessen (z. B. Bremsabrieb von Fahrzeugen) als auch Partikel aus natürlichen Prozessen (z. B. Mineralstaub oder Pollenfragmente). Sekundärer Feinstaub hingegen bildet sich durch chemische Umwandlungen aus gasförmigen Vorläuferschadstoffen in der Aussenluft. Diese Partikel bestehen vielfach zu einem bedeutenden Anteil aus Nitraten und Sulfaten und zeichnen sich durch sehr kleine Durchmesser aus. Sie werden zu den ultrafeinen Partikeln gezählt.

Wesentliche Emittenten für Feinstaub in der Schweiz sind der Strassen- und Schienenverkehr, Feuerungen, Industrie und Gewerbe, aber auch die Land- und Forstwirtschaft [23]. Beim motorisierten Strassenverkehr lagen bisher die Abgase im Fokus. Allerdings tragen auch die Partikel aus Abriebprozessen (z. B. aus Reifen oder Bremsbelägen) wesentlich zur Gesamtmasse bei [24]. Gesundheitlich sind diese Partikel durch ihre metallischen Anteile relevant.

In der Stadt Zürich stammt je ein Viertel der PM₁₀-Emissionen aus dem motorisierten Strassenverkehr respektive dem Baugewerbe. Der Schienenverkehr ist für 15 % der Emissionen verantwortlich. Feuerungsanlagen, Industrie und Gewerbe, sowie sonstige Quellen emittieren das verbleibende Drittel (Abbildung 14). Bei der PM_{2.5}-Belastung zeigt sich ein ähnliches Bild, ausser dass der Massenanteil aus dem Baugewerbe mit ca. 9 % deutlich niedriger ausfällt. Das ist der Tatsache geschuldet, dass bei Bauarbeiten ein grosser Teil der Partikelemissionen aus der gröberen Fraktion besteht (Abbildung 15).

PM₁₀ Emissionen

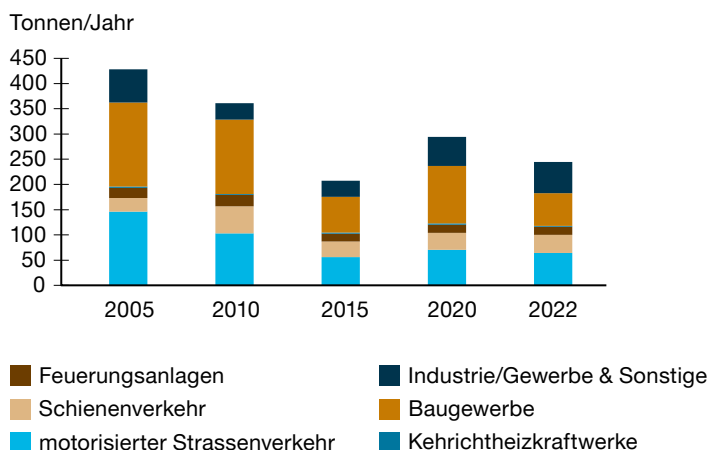


Abbildung 14: Feinstaub PM₁₀ Emissionen in der Stadt Zürich nach Verursachergruppen.
 (Prozentuale Anteile 2022: 26 % Baugewerbe, 26 % motorisierter Strassenverkehr, 25 % Industrie/Gewerbe/Sonstige, 15 % Schienenverkehr, 7 % Feuerungsanlagen, 1 % KVA) [8].

PM_{2.5} Emissionen

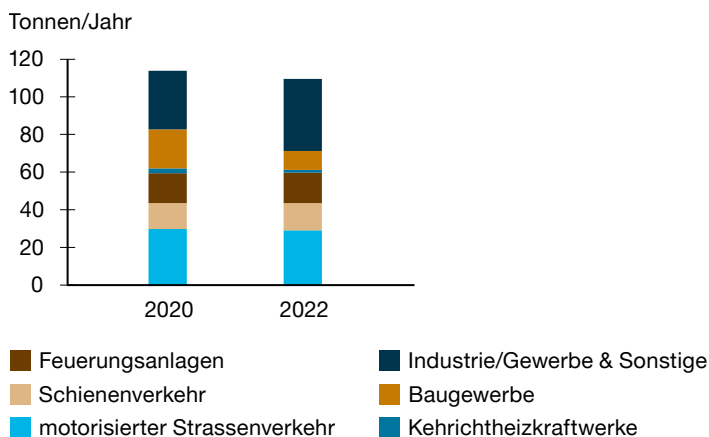


Abbildung 15: Feinstaub PM_{2.5} Emissionen in der Stadt Zürich nach Verursachergruppen.
 (Prozentuale Anteile 2022: 35 % Industrie/Gewerbe/Sonstige, 27 % motorisierter Strassenverkehr, 15 % Feuerungsanlagen, 13 % Schienenverkehr, 9 % Baugewerbe, 1 % KVA) [8].

Ultrafeine Partikel – die kleinste Feinstaubfraktion – entstehen entweder direkt durch Verbrennungsprozesse oder aus gasförmigen Vorläuferschadstoffen. Die bedeutendsten Quellen in der Stadt Zürich sind die Abgase aus dem motorisierten Verkehr und aus Heizungsanlagen. Weiter stammen UFP von Industrie, Gewerbe und der Luftfahrt. Im globalen Rahmen betrachtet spielen auch die Schifffahrt und natürliche Quellen, wie Waldbrände eine bedeutende Rolle [25], [26], [27]. Von Pflanzen emittierten Partikeln, gebildet aus VOC, spielen gewöhnlich eine untergeordnete Rolle.

UFP aus Verbrennungsprozessen bestehen oft hauptsächlich aus elementarem Kohlenstoff (EC). Auf der Oberfläche solcher Partikel können krebserregende Substanzen wie polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) haften bleiben [28]. Normalerweise wachsen die UFP durch Kondensation und Koagulation relativ rasch zu einem Durchmesser von 0.1 bis 1 µm an und werden dem Akkumulationsmodus zugerechnet. Partikel dieser Grössenklasse besitzen die längste Aufenthaltsdauer in der Atmosphäre [25] (Abbildung 13).

Feinstaubpartikel können auf Grund ihrer Stabilität und der geringen Sinkgeschwindigkeit lange in der Luft verbleiben und über grosse Distanzen transportiert werden. Folglich übertrifft der importierte, überregionale Anteil des Feinstaubes die lokalen Emissionen deutlich. Der importierte Anteil macht in der Stadt Zürich im Jahresmittel bei sehr stark verkehrsbelasteten Standorten etwa 60 % der PM₁₀-Gesamtbelastung aus, während der Anteil bei weniger belasteten Messstationen auf bis zu 80 % ansteigen kann.³ Beim Feinstaub PM_{2.5} ist der importierte Anteil noch höher als beim PM₁₀ (65 % bis 85 %). Für eine substanzielle Verbesserung der Feinstaubbelastung in der Stadt Zürich sind deshalb, neben lokalen Minderungsmaßnahmen, auch regionale und internationale Emissionsreduktionen zwingend notwendig.

6.4.2 Gesundheitliche Auswirkungen

Seit vielen Jahren ist der Zusammenhang zwischen der Feinstaubbelastung und deren schädlichen Auswirkungen auf die Gesundheit bekannt. In der Schweiz haben dies mehrere epidemiologische Studien gezeigt [29], [30], [31]. Mit zunehmender PM₁₀-Belastung treten vermehrt chronische Erkrankungen der Atemwege auf. Dazu gehören beispielsweise Atemnot, Husten, Auswurf oder Atemwegsinfektionen. Damit verbunden sind Einschränkungen der Lungenfunktion, die Auslösung entzündlicher Reaktionen und Herz-/Kreislaufkrankungen. Hinzu kommt, dass Russpartikel und an Partikeln haftende chemische Verbindungen, wie polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK), teils als krebserregend und/oder erbgutschädigend eingestuft werden. Allein in der Stadt Zürich entstehen durch Feinstaub PM_{2.5} Gesundheitskosten von ca. 1.4 Mia. Schweizer Franken [5].

Je kleiner die Partikel sind, umso tiefer werden sie eingeatmet (Abbildung 16). Während gröbere Partikel bereits im Nasen- und Rachenraum aufgehalten werden, können kleinere Partikel den Kehlkopf passieren und tief in den Atemtrakt gelangen. Die ultrafeinen Partikel mit einem Durchmesser kleiner 0,1 µm, dringen bis in die tiefsten Bereiche der Lunge vor und werden in den Lungenbläschen abgelagert. Diese kleinen Partikel können in Folge ihrer geringen Grösse Zellwände durchdringen und so ins Blut gelangen.

Abbildung 16: Feinstaub im Atemtrakt, seine Depositionsorte und die gesundheitlichen Auswirkungen.

Feinstaub im Atemtrakt

Inhalierbarer Feinstaub (PM₁₀) mit einem Durchmesser von 2,5–10 µm wird meist in den oberen Atemwegen abgefangen.

Nasen-Rachenraum
Luftröhre

Partikel 5 – 10 µm
Partikel 3 – 5 µm

Lungengängiger Feinstaub (PM_{2.5}) von 0,1 – 2,5 µm dringt tief in die Lunge vor und gelangt bis zu den Lungenbläschen.

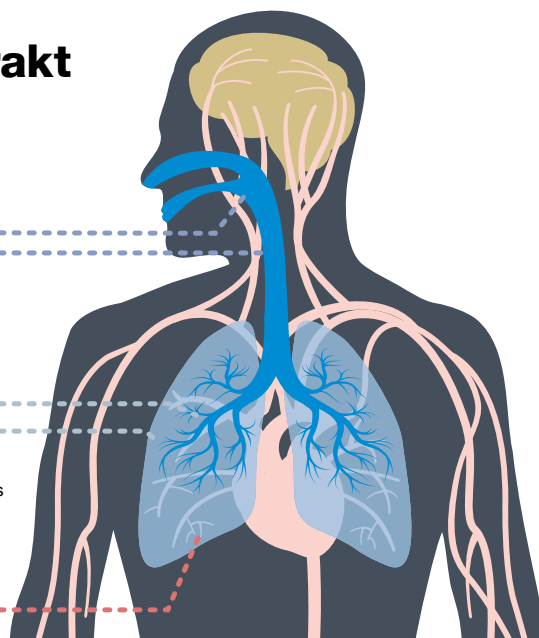
Bronchien
Bronchiolen
Alveolen (Lungenbläschen)

Partikel 2 – 3 µm
Partikel 1 – 2 µm
Partikel 0,1 – 1 µm

Ultrafeine Partikel (UFP) kleiner als 0,1 µm dringen bis in tiefe Zellebenen der Lunge vor und werden von dort nur sehr langsam oder gar nicht wieder entfernt. Sie können von dort auch in den Blutkreislauf oder in das Lymphsystem gelangen.

Blutkreislauf & Zellen

Partikel < 0,1 µm



Die gesundheitlichen Auswirkungen von UFP sind im Vergleich zum PM₁₀ wissenschaftlich noch nicht abschliessend beurteilt. Die Literatur zeigt jedoch, dass sie ein erhebliches Gesundheitsrisiko darstellen, welches sich zum Teil von jenem der gröberen Feinstaubfraktionen (PM₁₀, PM_{2.5}) unterscheidet. Da die UFP aufgrund ihrer kleinen Dimensionen in den Blutkreislauf und so in verschiedene Organsysteme, wie das Gehirn, gelangen, betreffen ihre gesundheitlichen Auswirkungen den gesamten Organismus. Ein

³ Abschätzung aus Vergleich mit PM₁₀ Belastung Hintergrundstandort Schulhaus Heubeeribüel.

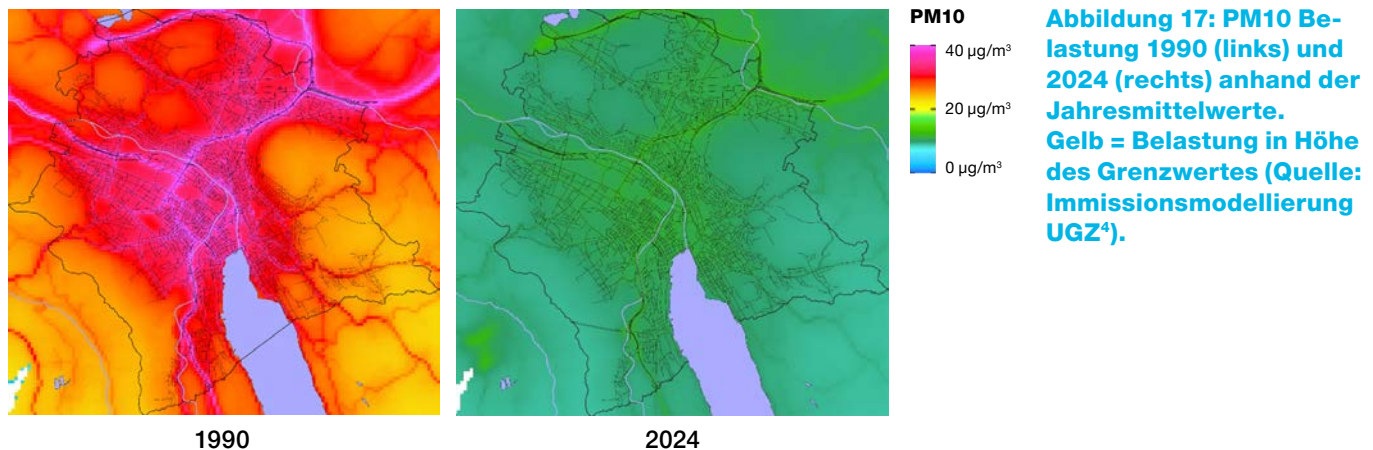
weiterer wichtiger Aspekt ist das hohe Oberflächen-zu-Masse-Verhältnis der UFP, das ihnen ermöglicht, zahlreiche toxischer Substanzen zu adsorbieren und transportieren [1], [2], [20], [31], [32].

Während für Feinstaub PM10 und PM2.5 Grenzwerte in der LRV definiert sind (Anhang A1), ist bisher kein Immissionsgrenzwert für UFP festgelegt. Auch die Eidgenössische Kommission für Lufthygiene folgt den aktuellen Empfehlungen der WHO-Luftqualitätsleitlinien von 2021, welche trotz wachsender Studienlage noch keine ausreichende Evidenz für die Festlegung von solchen Grenzwerten sehen und stattdessen Handlungsempfehlungen vorschlagen [26]. Es fehlt insbesondere ein internationales Referenzmessverfahren. Zudem mangelt es an qualitativ hochwertigen epidemiologischen Studien, vor allem im Hinblick auf Langzeiteffekte und die Abgrenzung der gesundheitlichen Folgen von UFP gegenüber anderen Luftschadstoffen. Die EKL, wie auch die neue WHO-Luftqualitätsleitlinien empfehlen Messungen zu diesem Parameter durchzuführen, da die Risiken Anlass zur Sorge geben und Daten erforderlich sind, um die Grundlage für epidemiologische Studien zu verbessern [1], [26], [33].

6.4.3 Belastungssituation

6.4.3.1 Belastung PM10

Die Feinstaubbelastung hat sich in den letzten 30 Jahren markant verbessert (Abbildung 17). Nach einer starken Reduktion der Jahresmittelwerte zwischen Messbeginn Mitte der 1980er-Jahre bis zum Jahr 2000, war die Abnahme seither etwas abgeflacht (Abbildung 18). Der Trend zu tieferen Jahresmittelwerten setzte sich, in abgeschwächter Form, jedoch auch danach kontinuierlich fort.

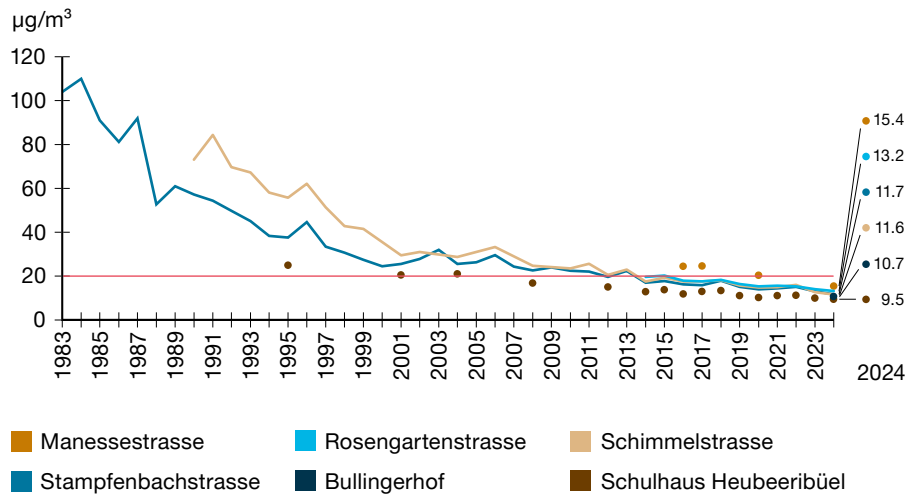


Im Jahr 2024 wurden sogar am Hotspot-Standort Manessestrasse der Jahresgrenzwert für PM10 eingehalten (Abbildung 18). Durch den grossen Anteil an importiertem Feinstaub, bzw. dem geringen Beitrag der lokalen Emissionen, ist die Belastung mit Feinstaub in der Stadt Zürich wesentlich homogener verteilt, als dies bei den Stickoxiden der Fall ist. Dies zeigt sich anhand der geringen Konzentrationsunterschiede zwischen den Messstandorten. Die PM10-Belastung auf Stadtgebiet bewegte sich 2024 zwischen 9 µg/m³ beim Hintergrundmessort Schulhaus Heubereibüel und 15 µg/m³ an der verkehrsbelasteten Manessestrasse. Bezüglich PM10 formuliert der Masterplan Umwelt für 2025 das Ziel einer flächendeckenden Einhaltung des Jahresmittelwertes von 20 µg/m³ [34].

4 Die Karte basiert auf Modellberechnungen. Die Auflösung der Karte beträgt 100x100m und kann daher lokale Spitzenbelastungen nicht korrekt abbilden.

Abbildung 18: Entwicklung der chronischen Luftbelastung (Jahresmittelwerte) durch Feinstaub PM10. Messungen vor 1997 als Gesamt-Schwebestaub, ab 1997 Messung als Feinstaub PM10. Rote Linie: LRV-Grenzwert.

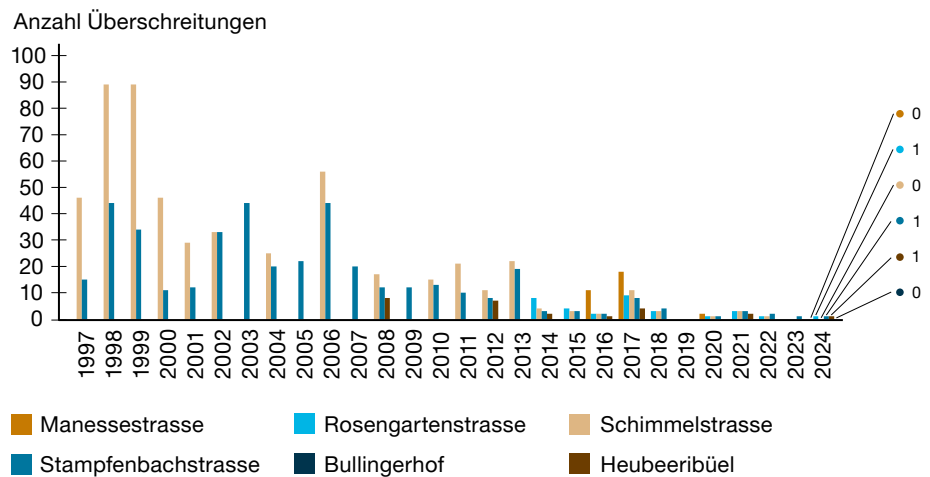
PM10 Jahresmittelwerte



Die Kurzzeitbelastungen haben sich ebenfalls positiv entwickelt. In den letzten fünf Jahren wurde der Tagesgrenzwert für PM10, selbst bei ungünstigen Wetterlagen, an allen kontinuierlich messenden Messstationen nur noch sehr selten überschritten.

Abbildung 19: Zahl der Überschreitungen des Feinstaub PM10-Kurzzeitgrenzwertes seit Beginn der PM10-Messungen. LRV-Grenzwert: max. 3 Überschreitungen des Tagesmittelwerts von 50 µg/m³ pro Jahr.

Anzahl Überschreitungen Tagesgrenzwertes für PM10



6.4.3.2 Belastung PM2.5

Die Feinstaubfraktion PM2.5 macht an den städtischen Standorten etwa zwei Drittel der PM10-Belastung aus. Dieses Verhältnis blieb über die letzten Jahre recht stabil. Dabei ist dieses Verhältnis bei verkehrsexponierten Standorten tendenziell etwas tiefer als bei Hintergrundmessorten. In Abbildung 20 sind die Jahresmittelwerte der UGZ-Messreihen seit 2017 dargestellt. An allen Standorten erfüllte 2024 die PM2.5 Belastung die LRV-Kriterien. Selbst der stark verkehrsexponierte Messort an der Manessestrasse lag mit 9.5 µg/m³ knapp unter dem Langzeitgrenzwert. Die PM2.5-Belastung auf Stadtgebiet bewegt sich somit zwischen gut 6 µg/m³ beim Hintergrundmessort Schulhaus Heubeeribüel bis zu knapp 10 µg/m³ an der verkehrsbelasteten Manessestrasse.

PM2.5 Jahresmittelwerte

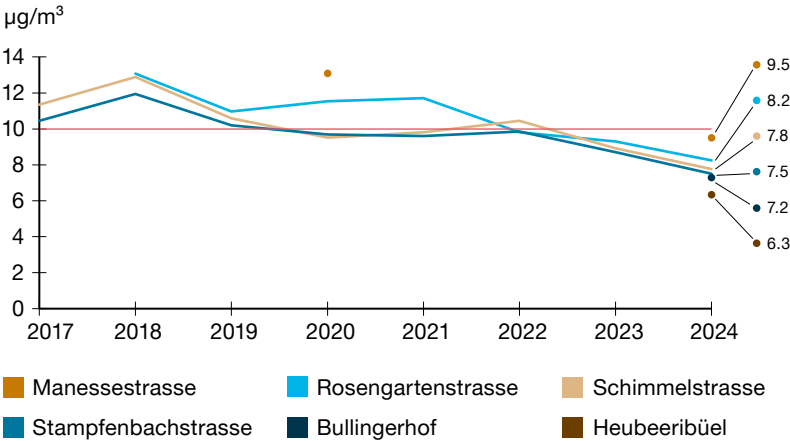


Abbildung 20: Verlauf der PM2.5-Jahresmittelwerte seit Messbeginn 2017. Rote Linie: LRV-Grenzwert.

6.4.3.3 Belastung Ultrafeine Partikel

In Abbildung 21 sind die Partikelanzahlkonzentrationen an drei UGZ-Stationen auf Tagesmittelbasis aus dem Jahr 2024 jenen aus dem Jahr 2020 gegenübergestellt. Anders als bei der Feinstaubbelastung hat sich die Situation bei den ultrafeinen Partikeln nicht entspannt. Die Anzahlkonzentrationen lagen 2024 sogar leicht höher als vier Jahre zuvor.

Partikelanzahlkonzentrationen 2020 vs. 2024

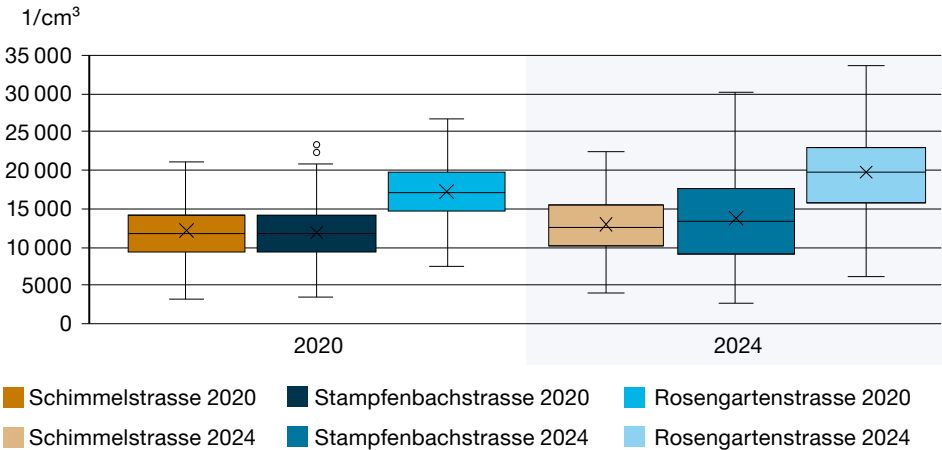
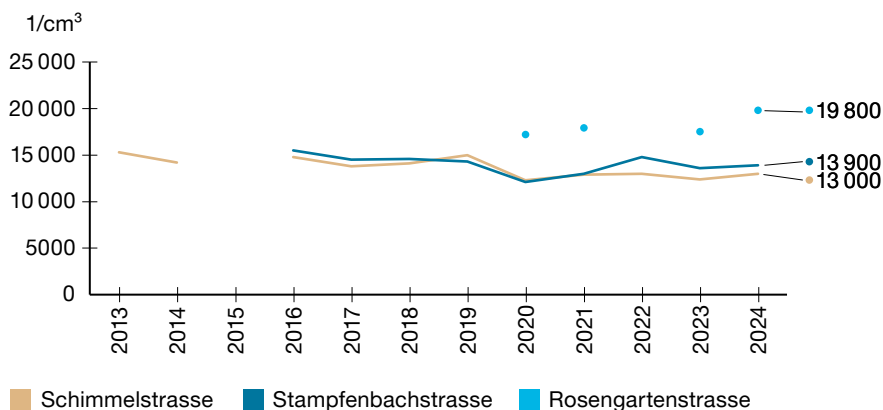


Abbildung 21: Partikelanzahlbelastung, basierend auf Tagesmittel, an den mit Partikelzählern ausgerüsteten Messstationen für die Jahre 2020 und 2024. (Boxplot: Kreuz = Mittelwert, mittlere Linie = Median)

Diese Tendenz zeigt sich auch in der UFP-Verlaufsgrafik (Abbildung 22). Die Konzentrationen sanken in den letzten 10 Jahren nicht signifikant und scheinen in den letzten vier Jahren eher wieder anzusteigen. An einem stark belasteten Messort wie der Rosengartenstrasse lagen die Konzentrationen 2024 bei etwa 20 000 Partikel pro cm³. An weniger stark belasteten Standorten sowie bei typischen städtischen Belastungen bewegten sich die Konzentrationen um die 13 000 Partikel pro cm³.

Abbildung 22: Partikelanzahlverlauf für die drei mit Partikelzählern ausgerüsteten Messstationen seit Beginn der Messungen an der Schimmelstrasse im Jahr 2013.

Partikelanzahlkonzentration



6.4.4 Feinstaub PM10 Inhaltsstoffe

Feinstaub besteht aus verschiedensten chemischen Substanzen. Je nach Quelle weist er eine unterschiedliche Zusammensetzung auf und enthält Stoffe, welche negative Auswirkungen auf die Gesundheit haben. Für die Schwermetalle Blei und Cadmium sind in der LRV Grenzwerte festgelegt (Anhang A1). Von gesundheitlicher Relevanz sind insbesondere auch krebserregende Bestandteile, zu denen z. B. (Diesel-)Russ oder auch die Substanzgruppe der polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffe (PAK) gehören. Zusätzlich zu den seit längerem bekannten Feinstaubbestandteilen aus Verbrennungsprozessen, rückt auch vermehrt das schädliche Potential von Abriebpartikeln aus Bremsbelägen, Kupplungen oder Reifen in den Fokus. So zeigen in einer neueren Studie metallhaltige Bremsabriebpartikel ähnlich toxische Eigenschaften wie Dieselmotorspartikel [24], [35].

Gemäss einer weiteren Studie ist der Feinstaub, dem die Bevölkerung in städtischen Regionen ausgesetzt ist, gesundheitsgefährdender als derjenige in ländlichen Regionen [36]. Als Mass für die Gesundheitsgefährdung wurde dabei das oxidative Potential verschiedener Feinstaubproben untersucht. Dies war in Proben von städtischen Standorten höher als in ländlichen Gegenden. Wie stark das oxidative Potential ausfällt, wird massgeblich durch den Anteil an Metallemissionen aus dem Bremsabrieb und durch anthropogene sekundäre organische Aerosole bestimmt. Letztere sind einen Teil der organischen Fraktion des Feinstaubes und stammen meist aus Holzfeuerungen. An der Gesamtmasse des Feinstaubes machen diese Bestandteile aber nur einen kleinen Anteil aus. Neben der Menge an Feinstaub ist also auch dessen Zusammensetzung ein wesentlicher Faktor der Gesundheitsbelastung.

Um diesem Umstand Rechnung zu tragen, analysiert der UGZ im Rahmen der periodischen Messkampagnen Feinstaubproben auf problematische Einzelsubstanzen und quantifiziert die verschiedenen Fraktionen der Gesamtzusammensetzung. Die Zusammensetzung liefert Informationen zu lokalen und importierten Beiträgen und lässt Rückschlüsse auf Emissionsquellen zu.

6.4.4.4 Russ / Elementarer Kohlenstoff

Entstehung

Russ wird im städtischen Umfeld hauptsächlich durch Verbrennungsprozesse im motorisierten Strassenverkehr, sowie durch Baumaschinen und Feuerungen freigesetzt. Dabei handelt es sich um sehr feine Partikel, die tief in die Lunge eindringen können. Moderne Dieselmotoren emittieren beispielsweise Partikel mit einem Durchmesser von lediglich 5–20 nm [37].

Die Abgasvorschriften für Dieselmotoren haben sich bezüglich Partikelemissionen durch die Implementation der Euro-Normen laufend verschärft. Um die Emissionsgrenzwerte einhalten zu können, wurde die Verwendung eines Partikelfiltersystems, ab Inkrafttreten von Euro 5 im Jahr 2009, de facto zur Pflicht [38]. Mit dem Einsatz von Partikelfiltern konnte die Anzahl der ultrafeinen Russpartikel um mindestens 95 % reduziert werden [39]. Partikelfilter sind in der Schweiz auch bei Baumaschinen Pflicht. Die Praxistauglichkeit derartiger Systeme ist heute für alle Fahrzeugkategorien unbestritten. Seit 2023 sind zudem Partikelanzahlmessungen für Fahrzeuge und Maschinen mit Strassenzulassung Pflicht. Messungen bestätigen, dass moderne Partikelfilter im Abgasstrom, unter idealen Bedingungen, zu Partikelanzahlkonzentrationen in der Grössenordnung der Aussenluft führen können [40].

Mit Aufkommen der Direkteinspritzung wurden Russ-Emissionen vermehrt auch bei Ottomotoren ein Thema. Moderne Benzinmotoren mit Direkteinspritzung stossen gemäss neueren Untersuchungen gleiche Mengen an Russpartikeln aus, wie ältere Dieselmotoren ohne Partikelfilter [41]. Deshalb wurden die Emissionsvorschriften auch für diese Motorentypen verschärft, so dass auch diese Motorentypen heute mit Partikelfiltern ausgerüstet sind. Da Abgasnormen immer nur für neuzugelassene Fahrzeuge gelten, entfalteten diese Vorschriften ihre gesamte Wirkung jedoch erst zeitverzögert bei einer Erneuerung des Fahrzeugbestandes.

Gesundheitliche Auswirkungen

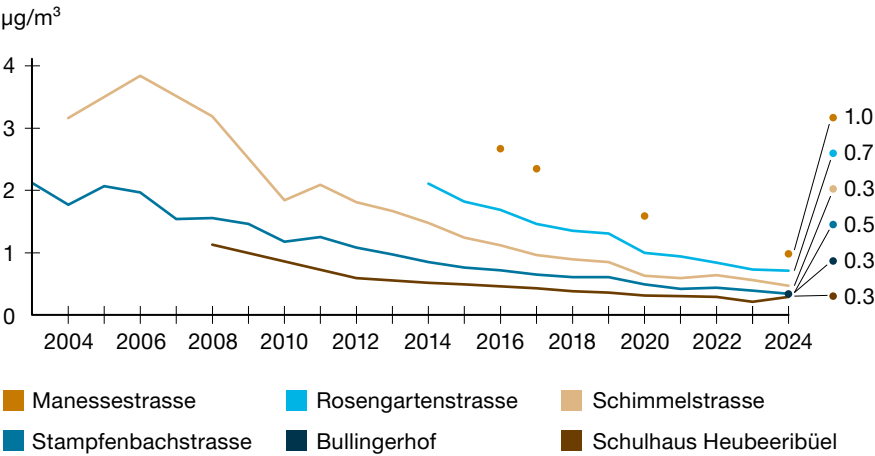
Russ wird als elementarer Kohlenstoff (EC) bestimmt. Wie für alle kanzerogenen Luftschadstoffe gilt für Russ das Minimierungsgebot, d. h. die Immissionen sollten so gering wie nur möglich gehalten werden. Dementsprechend sind in der LRV auch keine Grenzwerte für diese Schadstoffe festgelegt. Zur Beurteilung der gemessenen Immissionen kann, gemäss Eidgenössischer Kommission für Lufthygiene (EKL), das als «tolerierbar» eingestufte Krebsrisiko von einem, durch Russ verursachten Krebsfall, pro Million Einwohner begezogen werden. Für die am stärksten verkehrsbelasteten Standorte postuliert die EKL, basierend auf diesem Risiko, einen Richtwert von maximal 0.2–0.3 µg/m³ im Jahresmittel [26].

Russbelastung

Die erfassten Russmesswerte sinken in der Stadt Zürich seit Messbeginn stetig. An der Stampfenbachstrasse sind diese beispielsweise um 85 % gesunken. Die Unterschiede der Russbelastungen zwischen den Messorten weisen jedoch grössere Unterschiede auf, als dies bei deren PM₁₀-Konzentrationen zu beobachten ist. Dieser Umstand lässt sich auf den Einfluss der lokalen Emissionen zurückführen. Die Belastung mit krebserregendem Russ ist demnach stärker von lokalen Verhältnissen abhängig als dies bei PM₁₀ resp. bei PM_{2.5} der Fall ist. Auch 2024 ist der von der EKL geforderte Richtwert von 0.2 bis 0.3 µg/m³ in der Stadt Zürich immer noch nicht erreicht.

Abbildung 23: Jahresmittelwerte elementarer Kohlenstoff bzw. Russ im Feinstaub PM10. (EKL-Richtwert an verkehrsbelasteten Standorten: 0.2–0.3 µg/m³).

Russbelastung PM10 (EC Jahresmittelwert)



6.4.4.5 Metalle

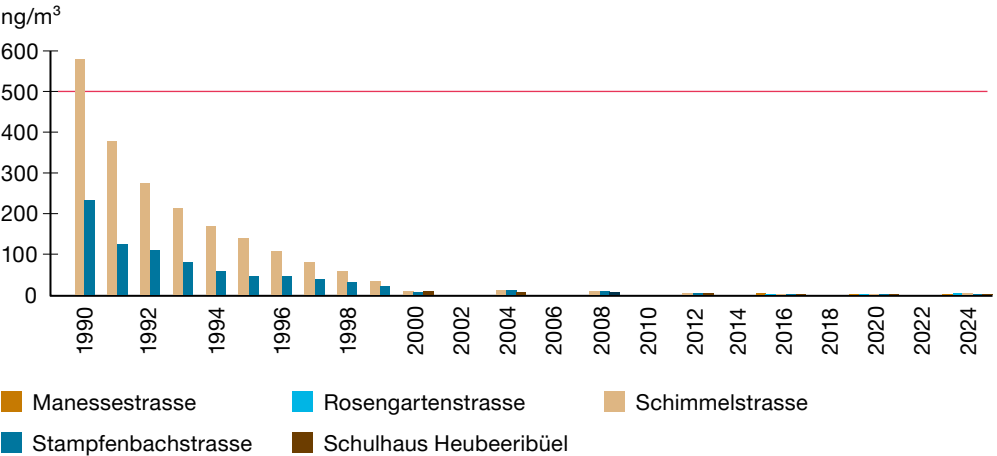
Feinstaub enthält verschiedene Metalle, darunter die beiden Schwermetalle Blei und Cadmium, welche in der LRV durch Grenzwerte reglementiert sind (Anhang A1). Als Bestandteil des Feinstaubes gelangen sie über die Atemwege in den Körper und entfalten dort ihre gesundheitsschädigenden Auswirkungen.

Blei

Mit der kontinuierlichen Reduktion des Bleigehalts im Benzin, bis hin zum definitiven Verbot im Jahr 2000, sowie der Ausrüstung der Kehrlichtheizkraftwerke mit Rauchgasreinigungen in den 80er und 90er Jahren, sank der Bleigehalt im Feinstaub rapide (Abbildung 24). Heute ist Blei im Feinstaub nur noch in Spuren nachweisbar. Die Werte von 2024 liegen an allen Messorten unter 2 ng/m³ und nähern sich der Nachweisgrenze der angewandten Analyseverfahren.

Abbildung 24: Jahresmittelwerte von Blei im Feinstaub PM10⁵ von 1990 bis 2020. Rote Linie: Grenzwert LRV.

Blei im Feinstaub PM10



⁵ Vor 1997: Bleibelastung im Gesamtschwebstaub (TSP)

Cadmium

Der Cadmium-Anteil im Feinstaub PM10 sinkt seit 1990 ebenfalls laufend und liegt bereits seit den 1990er Jahren deutlich unter dem Grenzwert der LRV (1.5 ng/m³; Abbildung 25). Im Jahr 2024 lag die Cadmiumbelastung an allen Messorten unter 0.2 ng/m³.

Cadmium im Feinstaub PM10

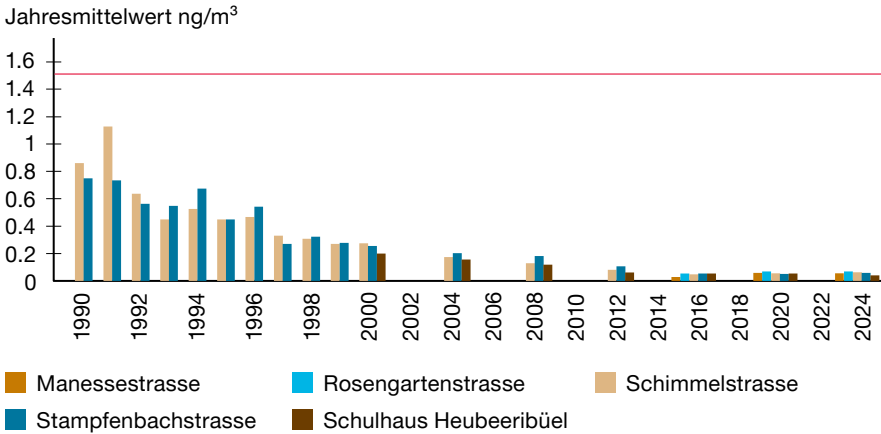


Abbildung 25: Jahresmittelwerte von Cadmium im Feinstaub PM10⁶ von 1990 bis 2020. Rote Linie: Grenzwert LRV.

Weitere Metalle

Neben den reglementierten Schwermetallen Blei und Cadmium findet sich im Feinstaub PM10 eine Reihe weiterer Metalle, wobei Eisen den mengenmässig grössten Anteil ausmacht. Viele dieser Metalle stammen hauptsächlich aus Abriebprozessen des Strassen- und Schienenverkehrs. Dementsprechend zeigen mehrere Metalle einen direkten Bezug zum Verkehrsaufkommen am jeweiligen Messort (Abbildung 26).

Metalle im Feinstaub PM10

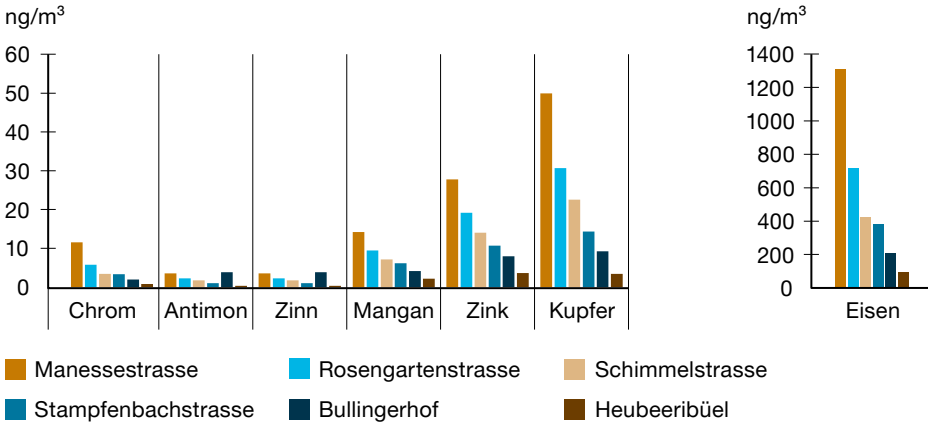


Abbildung 26: Jahresmittelwerte 2024 der Metallanteile im Feinstaub PM10⁷.

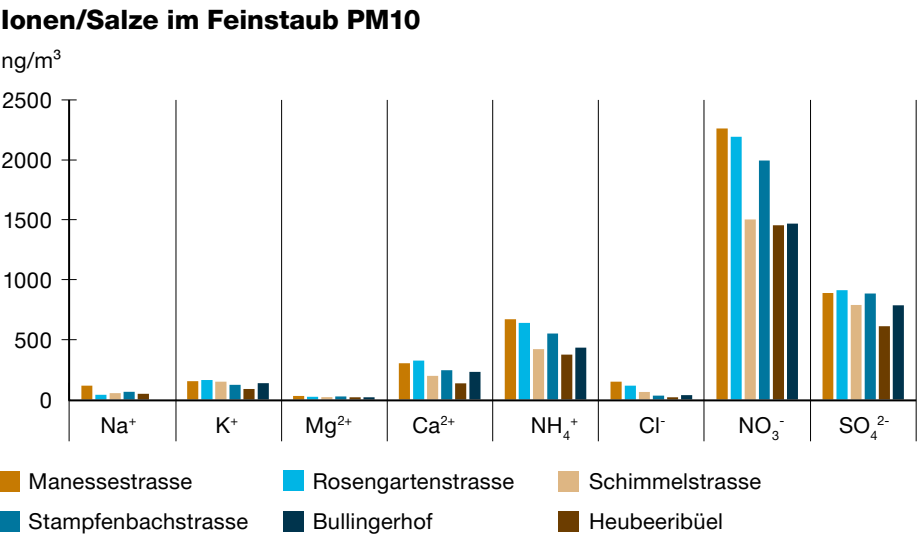
6.4.4.6 Ionen (Salze)

Ein weiterer mengenmässig wesentlicher Bestandteil im Feinstaub PM10 sind Salze, die vorwiegend aus der chemischen Umwandlung gasförmiger Vorläuferschadstoffe (NH₃, NO_x, SO₂) entstehen. Die Summe der Ionen hängt weniger vom Standort ab, als dies bei den Schwermetallen der Fall ist (Abbildung 27). Die ähnlichen Konzentrationen lassen darauf schliessen, dass die Ionen vor allem durch die Hintergrundbelastung dominiert werden und städtische Quellen eher eine untergeordnete Rolle einnehmen.

6 Vor 1997: Cadmiumbelastung im Gesamtschwebstaub (TSP)

7 Nicht aufgeführt: Kobalt, Nickel, Molybdän, Thallium: < Nachweisgrenze

Abbildung 27: Jahresmittelwerte 2024 der Ionengehalte im Feinstaub PM10.



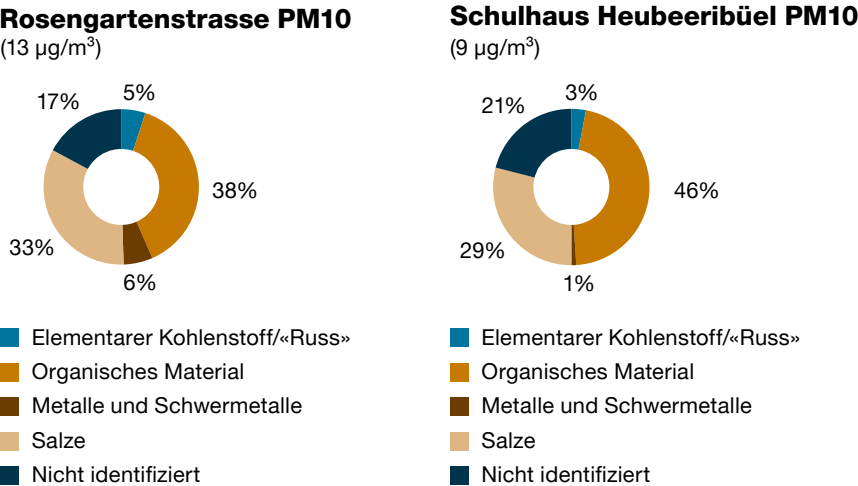
6.4.4.7 Fazit zu den Inhaltsstoffen im Feinstaub PM10

In der folgenden Zusammenfassung der PM10-Inhaltsstoffe ist zusätzlich der organische Anteil (OM, organic matter) des Feinstaubs aufgeführt. Dieser beinhaltet z.B. an den Partikeln anhaftende PAK, sekundär aus VOC gebildeter Feinstaub oder auch Pollenfragmente und Reifenabrieb.

Mit der angewandten Methodik machen die identifizierten Anteile jedoch nur etwa drei Viertel der gesamten PM10-Gesamtbelastung aus. Zum nicht identifizierten Anteil tragen unter anderem siliziumhaltige Stäube wie zum Beispiel Saharastaub, oder aus messtechnischen Gründen nicht quantifizierbare metallische Anteile bei.

Der Feinstaub PM10 an den Stadt Zürcher Messstationen besteht je nach Belastungsart zu ca. 5–15 % aus gesundheitlich sehr bedenklichen Russ- und Metallpartikeln. Ein Drittel besteht aus organischem Material und ein weiteres Drittel aus Salzen. In Abbildung 28 ist die Zusammensetzung der stark verkehrsexponierten Station Rosengartenstrasse und des Hintergrundmessortes Schulhaus Heubeeribüel dargestellt. Die Zusammensetzungen der Inhaltsstoffe des PM10 für die restlichen Messorte sind im Anhang (A5) zu finden.

Abbildung 28: Feinstaubzusammensetzung (PM10) an zwei Stadtzürcher Messstationen 2024. Der Jahresmittelwert der PM10-Belastung ist in Klammern dargestellt.



6.4.5 Feinstaubsituation 2024

- Der Verlauf der Feinstaubbelastung in der Stadt Zürich ist durch eine stete Abnahme gekennzeichnet. Dies gilt sowohl für PM10 als auch für PM2.5. Sämtliche Jahresmittelwerte der automatischen Messstationen von 2024 lagen unter den derzeit geltenden LRV-Grenzwerten. Sogar an der stark verkehrsbelasteten Manessestrasse wurde, mit einem PM2.5-Jahresmittelwert von $9.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$, der LRV-Langzeitgrenzwert von $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ knapp unterschritten. Vor vier Jahren schienen die damaligen Verbesserungen der Feinstaubbelastungen noch zu einem bedeutenden Anteil von der Coronapandemie beeinflusst zu sein und es musste für die folgenden Jahren wieder mit einem Anstieg gerechnet werden. Dies traf jedoch nicht ein, sondern die Feinstaubbelastung hat sich weiter verbessert.
- Anders als bei PM10 und PM2.5, ist bei den ultrafeinen Partikeln kein solch deutlich abnehmender Trend festzustellen (Abbildung 22). Während an der Schimmelstrasse und der Stampfenbachstrasse seit 2016 weitgehend eine Stagnation dominierte, ist an der Rosengartenstrasse eher eine leichte Zunahme der Partikelkonzentration zu beobachten.
- Auch der Russ im Feinstaub weist eine Tendenz zur Abnahme auf. Da er kanzerogen ist, können keine Grenzwerte definiert werden, unter denen keine nachteiligen gesundheitlichen Effekte mehr zu erwarten sind. Es gilt daher das Minimierungsgebot. Die Eidgenössische Kommission für Lufthygiene (EKL) hat jedoch Werte von $0.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ bis $0.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$, an verkehrsbelasteten Standorten als akzeptables Risiko definiert [26]. Diese Werte werden an vielen Orten noch überschritten.
- Die beiden Schwermetallfraktionen im Feinstaub, Blei und Cadmium, welche früher in sehr problematischen Konzentrationen zu messen waren, bewegen sich in den letzten Jahren in Richtung ihrer Nachweisgrenzen. Die restlichen, nicht gesetzlich regulierten Schwermetalle, bewegten sich im Konzentrationsbereich der letzten Messungen im Jahr 2020, mit einem leicht rückläufigen Trend [42]. Die Verkehrsexposition ist anhand der Konzentrationen der Schwermetalle gut zu erkennen (Abbildung 26).
- Im Feinstaub hat sich die Menge an Salzen in den letzten zehn Jahren halbiert. Dies ist das Ergebnis der Anstrengungen, Emissionen aus Verkehr, Industrie und der Landwirtschaft zu senken.

6.5 Staubbiederschlag

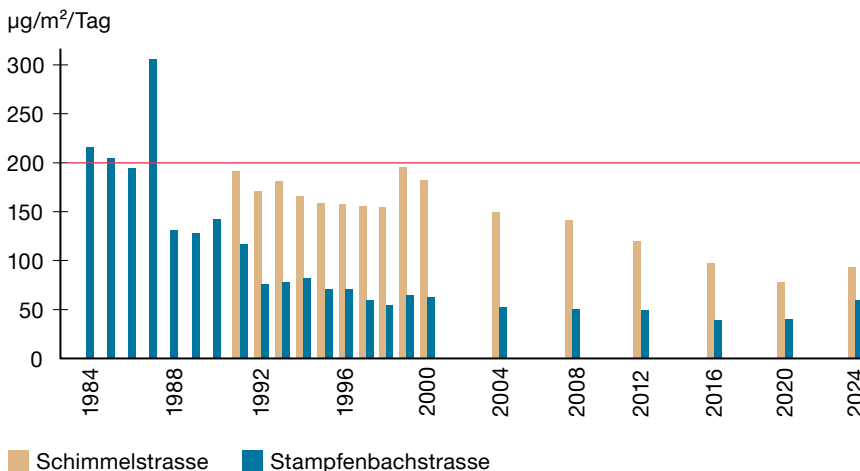
Zusammensetzung und Gesundheitliche Auswirkungen

Die chemische Zusammensetzung des gröberen Staubbiederschlags weist eine ähnliche Komplexität auf, wie diejenige des Feinstaubes. Gesundheitlich relevante Inhaltsstoffe sind in erster Linie Schwermetalle und persistente Stoffe mit toxischen Wirkungen. Staubbiederschlag besteht aus groben Partikeln, die nicht eingeatmet werden, und hat deshalb kaum direkte Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit. Indirekt stellen jedoch die Schwermetalle im Staubbiederschlag ein Gesundheitsrisiko dar, da sie sich in Böden und Pflanzen anreichern und so über die Nahrungskette aufgenommen werden. Sie beeinträchtigen zudem die Bodenfruchtbarkeit. Mit der Festlegung von Grenzwerten für diverse Schwermetalle in der LRV (Anhang A1) soll der Schwermetalleintrag eingedämmt und damit der Boden vor Langzeitschäden geschützt werden.

Belastungssituation

Abbildung 29: Jahresmittelwerte des Staubniederschlags von 1984–2024. Rote Linie: Grenzwert LRV

Staubniederschlag Jahresmittelwert



Der Staubeintrag in die Böden hat in den letzten vierzig Jahren kontinuierlich abgenommen und liegt heute deutlich unter dem Grenzwert von 200 mg/m² pro Tag im Jahresmittel. Seit dem Jahr 2000 wird der Parameter in der Stadt Zürich nur noch alle 4 Jahre, im Rahmen der periodischen Messkampagnen erfasst. Dasselbe gilt für den Blei- und Cadmiumgehalt dieses Niederschlags, welche im selben Zeitraum ebenfalls massiv abgenommen haben und aktuell deutlich unter den Grenzwerten liegen (Anhang A6). 2024 lagen die Schwermetalleinträge in der Grössenordnung von zwei bis zehn Prozent des LRV-Grenzwertes. Eine Ausnahme bildet der Zinkeintrag an der Schimmelstrasse, welcher knapp 40 % des höchstzulässigen Eintrags beträgt. Die Ursachen dieser relativ hohen Belastungen sind nicht bekannt.

6.6 Flüchtige organische Verbindungen

Entstehung

Flüchtige organische Verbindungen (VOCs) sind eine Gruppe von organischen Substanzen mit unterschiedlichen chemischen Eigenschaften und Verwendungszwecken. Gemeinsam ist ihnen, dass sie leichtflüchtig sind, also bei Raumtemperatur rasch verdampfen. Beispiele für VOCs sind Treibstoffbestandteile, darunter verschiedene Alkane und aromatische Komponenten. Sie werden zudem in Industrie und Gewerbebetrieben, aber auch im Haushalt als Lösungsmittel eingesetzt, wo sie z. B. in Farben, Klebstoffen oder Reinigungsmitteln vorkommen. Neben anthropogenen Quellen können VOCs auch natürlichen Ursprungs sein, wie dies bei Terpenemissionen von Pflanzen der Fall ist. In der Aussenluft tragen VOCs zur sekundären Bildung von Feinstaub bei und bilden, zusammen mit den Stickoxiden, Vorläuferschadstoffe für die Ozonbildung. Sämtliche Strategien zur Senkung der Ozonbelastung setzen deshalb auch bei der Reduktion dieser Vorläuferschadstoffe an.

Seit den 80er Jahren wurden schrittweise Massnahmen ergriffen, um die VOC-Emissionen zu senken. So wurde unter anderem der Benzolgehalt im Benzin auf 1 % beschränkt [43] (für andere Produkte gilt ein Benzolhöchstgehalt von 0.1 Prozent), Gasrückführungen bei Tankanlagen vorgeschrieben, oder eine VOC-Abgabe eingeführt. Auch der Katalysator bei den Motorfahrzeugen trug zu einer starken Reduktion der Gesamtemissionen bei. Im Vergleich zu 1990 haben die VOC-Emissionen in der Stadt Zürich im Jahr 2022 um rund 85 % abgenommen (Abbildung 30).

Die beiden Quellen «Industrie und Gewerbe» sowie «Haushalte, Hobby, Garten» machen zusammen ca. 90 % der Stadtzürcher Emissionen aus. Der Rest stammt aus dem Verkehr und den Feuerungen. Mit der Einführung von Katalysatoren bei Benzinmotoren und Gasrückführungen bei Tankstellen sanken die Beiträge der Quellgruppen aus dem Verkehr auf einstellige Prozentwerte ab.

VOC-Emissionen Stadt Zürich

Tonnen/Jahr

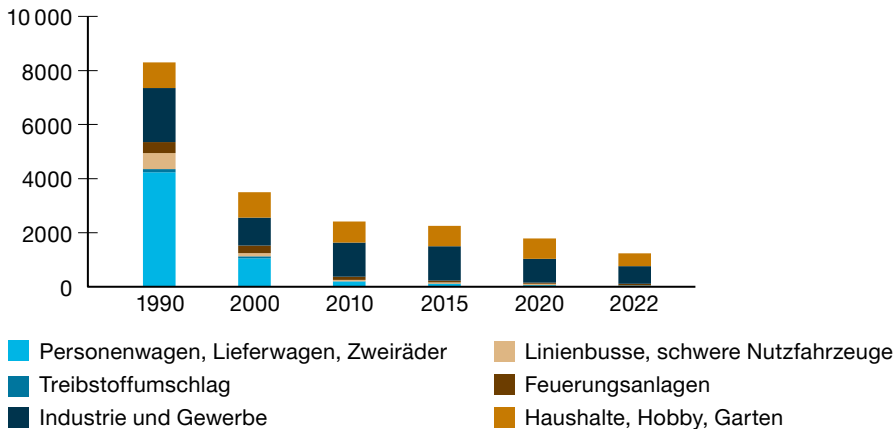


Abbildung 30: VOC-Emissionen in der Stadt Zürich nach Verursachergruppen. (Prozentuale Anteile 2022: Industrie ca. 50 % Haushalt, Hobby, Garten ca. 40 %, Rest ca. 10 %) [8].

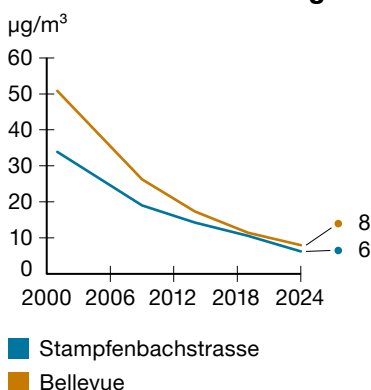
Gesundheitliche Auswirkungen

Da es sich bei den VOCs um eine sehr heterogene Gruppe von Substanzen handelt, ist auch ihr Gesundheitsrisiko sehr unterschiedlich. Verschiedene VOCs weisen toxische oder krebserregende Wirkungen auf. Eine besondere Stellung nimmt Benzol ein, dessen Verwendung aufgrund seiner Kanzerogenität stark reguliert ist. In der EU gilt seit 2010 ein Grenzwert von $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ für Benzol, der jedoch von der Eidgenössischen Kommission für Lufthygiene als nicht ausreichend im Sinn des gesetzlich vorgeschriebenen Schutzenspruchs der Schweizer Bevölkerung betrachtet wird [43]. Für Benzol, sowie auch für die anderen VOCs sind in der LRV keine Immissions-Grenzwerte festgelegt. Wie für alle kanzerogenen Substanzen gilt das Minimierungsgebot, das heisst, die Exposition der Bevölkerung sollte so gering wie möglich sein.

Langzeitentwicklung

Die Messungen in der Stadt Zürich zeigen, dass sich die erzielten Emissionsminderungen auch in den Immissionsmessungen widerspiegeln. Die VOC-Konzentrationen in der Stadtluft sind in den letzten 25 Jahren stark zurückgegangen. Die Summe aller VOC sind um 85 % zurückgegangen, während bei den kanzerogenen Benzolbelastungen sogar eine Reduzierung um 90 % gemessen werden konnte. Benzol stammt fast ausschliesslich aus dem Strassenverkehr und den Tankanlagen.

Gesamt-VOC-Belastung



Benzol Jahresmittelwerte

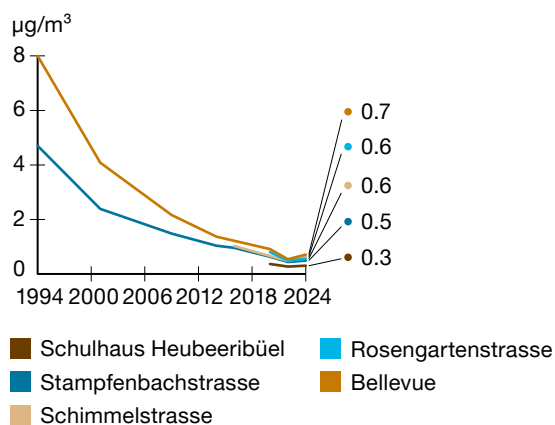


Abbildung 31: Jahresmittelwerte der VOC-Summe (links), sowie Jahresmittelwerte der Benzolkonzentrationen (rechts) in der Stadt Zürich.

6.7 Kohlenmonoxid

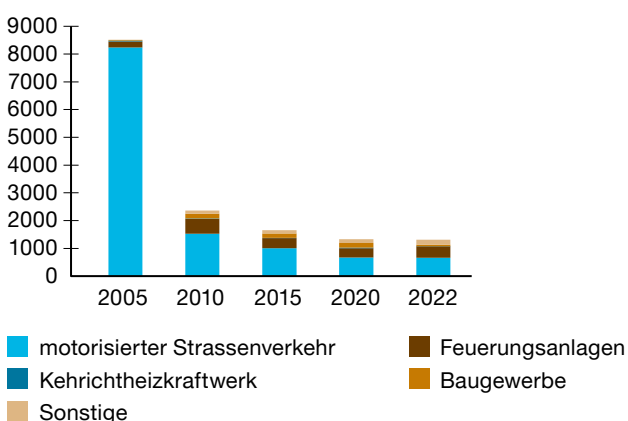
Entstehung

Kohlenmonoxid (CO) entsteht bei Verbrennungsprozessen, wenn zu wenig Sauerstoff für die Verbrennung zur Verfügung steht. Es kann in fast allen Verbrennungsabgasen nachgewiesen werden. 50 % der CO-Emissionen in der Stadt Zürich werden vom motorisierten Strassenverkehr ausgestossen [8], ein Drittel stammt aus Feuerungsanlagen.

Abbildung 32: Kohlenmonoxid-Emissionen in der Stadt Zürich nach Verursachergruppen. (Prozentuale Anteile 2022: 50 % motorisierter Strassenverkehr, 32 % Feuerungsanlagen, 5 % Baugewerbe, 12 % Sonstige, 0.2 % Kehrlichtheizkraftwerk) [8].

CO-Emissionen

Tonnen/Jahr



Gesundheitliche Auswirkungen

Bei Menschen und Tieren wirkt Kohlenmonoxid als Atemgift, da es sich rund 200- bis 300-fach stärker als der Sauerstoff an das Hämoglobin, den roten Blutfarbstoff im Blut, binden kann. So wird die Sauerstoffaufnahme bereits bei geringen Konzentrationen behindert. In hohen Konzentrationen wirkt CO tödlich.

Langzeitentwicklung

Die Belastungen haben seit Beginn der Messungen kontinuierlich abgenommen. Moderne Motoren und Feuerungsanlagen stossen heute immer weniger CO aus. Die letzten Überschreitungen des maximalen Tageswerts datieren auf Mitte der 80er Jahre.

Lange wurde CO noch als Verkehrsindikator und Hilfsgrösse gemessen. Da der Verkehr immer weniger Kohlenmonoxid aussties und die Unterschiede zwischen den Messstationen immer verkleinerten, wurde CO seit 2016 nur noch am Messort Stampfenbachstrasse erfasst (Abbildung 33). Ende 2024 wurden die CO-Messungen auch an der Stampfenbachstrasse eingestellt, da sich die Messwerte in den letzten zehn Jahren kaum mehr verändert hatten.

Maximaler CO-Tageswert

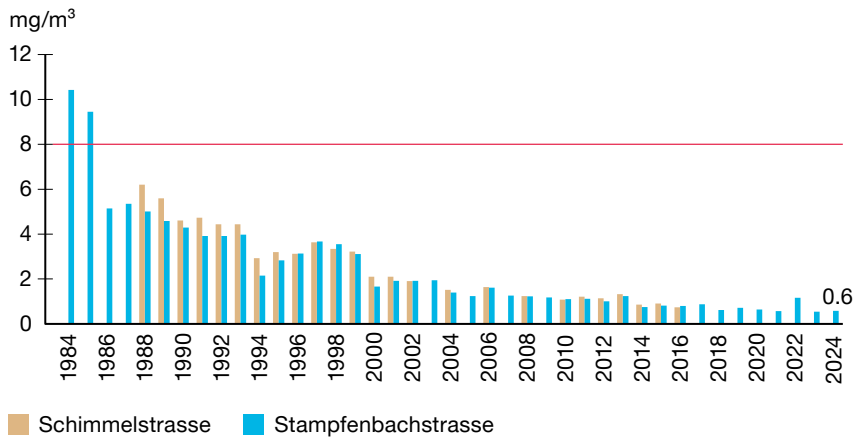


Abbildung 33: Entwicklung des maximalen Tageswerts für Kohlenmonoxid 1984 bis 2024. Rote Linie: Grenzwert LRV (Tagesmittelwert, welcher maximal einmal pro Jahr überschritten werden darf).

6.8 Schwefeldioxid

Entstehung

Alle fossilen Brenn- und Treibstoffe enthalten in unterschiedlichem Umfang Schwefelanteile. Bei ihrer Verbrennung entsteht Schwefeldioxid (SO_2). In der Stadt Zürich wird SO_2 von Feuerungsanlagen und den Kehrlichtheizkraftwerken freigesetzt. Der motorisierte Strassenverkehr spielt in dieser Betrachtung, mit einem einstelligen Prozentanteil, eine vernachlässigbare Rolle.

SO_2 -Emissionen

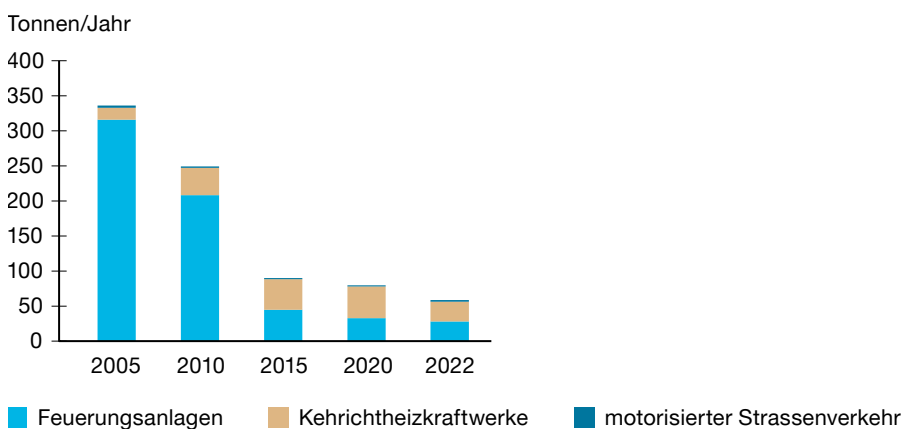


Abbildung 34: Schwefeldioxid-Emissionen in der Stadt Zürich nach Verursachergruppen. (Prozentuale Anteile 2022: 49 % KVA, 48 % Feuerungsanlagen, 3 % motorisierter Strassenverkehr) [8].

Gesundheitliche Auswirkungen und Umweltbelastung

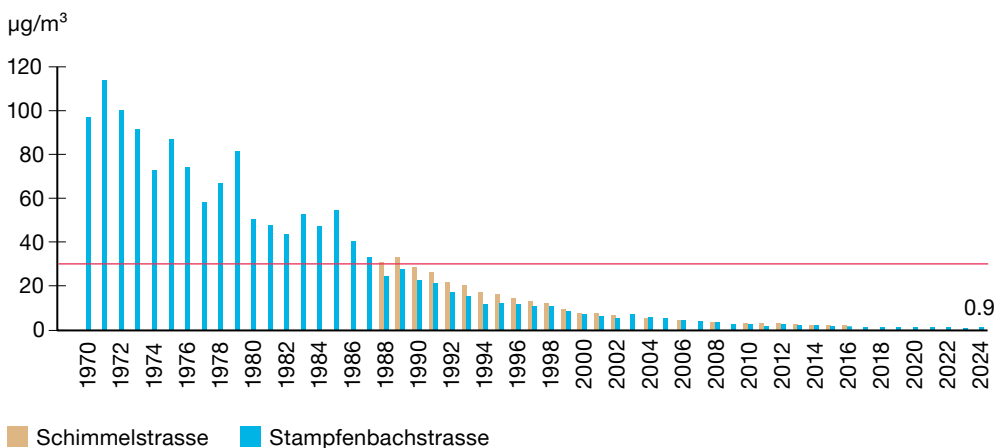
In Verbindung von SO_2 mit Wasser entsteht schweflige Säure und Schwefelsäure. Diese sind wesentliche Bestandteile von saurem Regen. Dieser durch SO_2 mitverursachte saure Regen führt zu einer Versauerung von Böden und Gewässern und greift Gebäudefassaden an. Zudem werden Pflanzen durch den von SO_2 verursachten Abbau des Blattgrüns geschädigt. Erhöhte Konzentrationen von SO_2 führen zu Reizungen der Augen und Schleimhäute und fördern Atemwegserkrankungen. Im Umfeld industrieller Betriebe, beispielsweise bei der Herstellung von Grafit, können unangenehme Geruchsbelästigungen auftreten.

Langzeitentwicklung

Seit Beginn der Messungen in den frühen 70er Jahren hat sich die Luftbelastung durch SO_2 massiv gebessert. Die zunehmende Entschwefelung bei der Raffinierung von Brenn- und Treibstoffen hatte zur Folge, dass heute kaum noch SO_2 in der Stadtzürcher Luft nachgewiesen werden kann.

Abbildung 35: Entwicklung der Schwefeldioxid-Belastung (Jahresmittelwerte) 1970 – 2024. Rote Linie: Grenzwert LRV.

SO_2 -Jahresmittelwert



Seit der Mitte der 90er Jahre waren keine Überschreitungen der Grenzwerte für Tages- und Jahresmittel mehr zu verzeichnen. In Folge der äusserts kleinen Konzentrationen wurde 2016 die Messung von SO_2 am Messort Schimmelstrasse eingestellt. Ende 2024 wurden auch die Messungen auch an der Stampfenbachstrasse beendet.

7

Projektmessung Biomassen- verbrennung Bullingerhof

In der Stadt Zürich stellen kleine Holzheizungen ohne Rauchgasreinigung eher eine Ausnahme dar. Es gibt jedoch einige wenige Siedlungen, welche mit kleinen Holzfeuerungen beheizt werden. Die Wohnungen des Erismannhofs beispielsweise, im Quartier Aussersihl, werden einzeln mit Stückholzfeuerungen beheizt. Westlich davon, in ca. 500 Metern Abstand, befindet sich der Bullingerhof, ein städtischer Park mit einer Fläche von ca. 15 000 m². Er wird durch Wohnbauten in mehrheitlich geschlossener Bauweise umgeben. Die lufthygienische Lage entspricht einem innerstädtischen Hintergrundstandort, welcher nicht direkt von grossen Emissionen betroffen ist. Die nächste stark befahrene Strasse befindet sich in einem Abstand von mindestens 150 Metern. Diese diffuse städtische Hintergrundbelastung prägt die Luftqualität im Hof.

2024 installierte der UGZ das Messfahrzeug auf dem Bullingerhof. Dabei wurde, neben NO_x-, Ozon- und Feinstaubmessgeräten auch ein Russmessgerät (Aethalometer) betrieben. Es kann in Echtzeit und zeitlich hoch aufgelöst Russ aus fossilen Quellen (Öl, Gas, Kohle) von biogenem Russ (Holz) unterscheiden.

Abbildung 36: Messfahrzeug auf dem Bullingerhof, sowie die Lage des Hofes mit Markierung des Fahrzeugstandortes.



7.1 Lufthygienische Kennwerte 2024

In Tabelle 4 sind die lufthygienischen Kennwerte der Messstation Bullingerhof im Vergleich zur Stampfenbachstrasse (mittlere städtische Belastung) und dem Schulhaus Heubeeribüel (Hintergrundbelastung Stadtrand) aufgeführt.

Stickstoffmonoxid (NO) ist ein primär ausgestossener Schadstoff und eignet sich deshalb gut zur Beurteilung der lokalen Emissionen. Die NO-Werte im Bullingerhof liegen zwischen jenen der Messstation Stampfenbachstrasse und des Schulhauses Heubeeribüel und entsprechen damit einem innerstädtischen Hintergrund. Die Ozonkennwerte des Bullingerhofs bewegen sich jedoch eher im Bereich des Standortes Heubeeribüel, wo die Ozonbelastung auf Stadtgebiet gewöhnlich am höchsten ist.

Tabelle 4: Luftbelastungskennwerte der Messstation Bullingerhof im Vergleich zur Stampfenbachstrasse (mittlere städtische Belastung) und zum Schulhaus Heubeeribüel (Hintergrundbelastung Stadtrand).

	Bullingerhof	Stampfenbachstrasse	Heubeeribüel
NO ₂ (µg/m ³)	15.1	18.2	9.2
NO (µg/m ³)	3.0	6.6	1.6
PM10 (µg/m ³)	10.7	11.7	9.5
PM2.5 (µg/m ³)	7.2	7.5	6.3
EC2.5 (µg/m ³)	0.29	0.29	–
EC10 (µg/m ³)	0.34	0.34	0.29
O ₃ max. h1 ⁸ (µg/m ³)	169.1	149.5	173.7
O ₃ Anz. >120 µg/m ³	144	58	171

8 h1 = Stundenmittelwert

7.2 Russbelastung

Russ entsteht durch unvollständige Verbrennung von kohlenstoffhaltigen Brennstoffen. Im städtischen Umfeld geschieht dies vornehmlich durch Verbrennungsmotoren aus Fahrzeugen oder Maschinen, aber auch durch Heizungen. Bei der Verbrennung von Biomasse entstehen jedoch ebenfalls erhebliche Mengen an Russ. In ländlichen Gegenden mit einem hohen Anteil von Holzfeuerungen können dadurch lokal starke Russbelastungen entstehen, besonders innerhalb Ortschaften in Tallagen.

Die Russpartikel im Feinstaub PM_{2.5} sind sehr klein und dringen dadurch tief in die Lunge ein. Zudem können sich toxische Substanzen auf den Russteilchen anheften. Russ begünstigt die Erkrankungen der Atemwege und des Herz-Kreislaufsystems und gilt als krebserregend. Damit stellt Russ im Feinstaub gesundheitlich die wichtigste Komponente dar. Je nach Messmethode wird der Russ auch als Elemental Carbon (EC) oder als Black Carbon (BC) bezeichnet.

In Abbildung 37 ist die Russbelastung aus dem Feinstaub PM_{2.5} im Bullingerhof in Vergleich zur Messstation Appenzell Feuerschau aufgetragen. Die ländlich gelegene Appenzeller Messstation befindet sich in einer Senke und ist zudem in einem Gebiet mit vielen Einzelholzfeuerungen plazierte. Appenzell Feuerschau ist deshalb potenziell einer erhöhten Russbelastung durch Biomassenverbrennung ausgesetzt. Damit unterscheidet sie sich stark von der Immissionssituation des Bullingerhofs und bot sich als Vergleich an. In Abbildung 37 ist die Russbelastung nach Quellenart unterteilt. Es wird zwischen Russ aus fossilen Brennstoffen und Russ aus Biomassenverbrennung unterschieden. Auf der linken Seite sind die Monatsmittelwerte aufgetragen, während die rechte Grafik die Jahresmittelwerte zeigt.

Werden die Russ-Messwerte der beiden Messstationen aufgetragen, ist bei beiden eine jahreszeitliche Abhängigkeit zu erkennen. Im Winter ist die Russbelastung, sowie auch der Russanteil aus der Biomassenverbrennung höher als in den Sommermonaten. Im Jahresdurchschnitt stammen am städtischen Hintergrundmessort Bullingerhof die Hälfte des Russes aus Biomassenverbrennungen. An städtischen strassennahen Standorten würde, infolge der direkten Verkehrsemissionen, der fossile Russanteil höher ausfallen. In ländlichen Gebieten können die Biomassenverbrennungen zwei Drittel und mehr der gesamten Russbelastungen ausmachen.

Russbelastung im PM_{2.5}, Bullingerhof vs. Appenzell

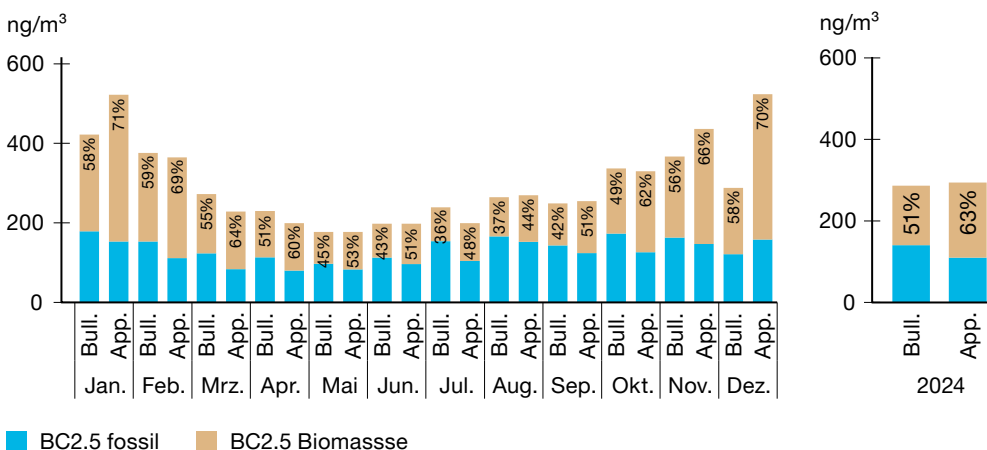


Abbildung 37: Russbelastung im Bullingerhof (Bull.), im Vergleich zu Messungen in Appenzell Feuerschau (App.). Die Russbelastung ist nach Quellenart unterteilt: Russ aus fossilen Brennstoffen (BC_{2.5} fossil) vs. Russ aus Biomassenverbrennung (BC_{2.5} Biomasse), wobei die Prozentangabe sich auf den Russanteil aus Biomasse bezieht. Links: Monatsmittelwerte, wobei der Monat Dezember nur Daten bis zum 16.12. enthält. Rechts: Jahresmittelwerte.

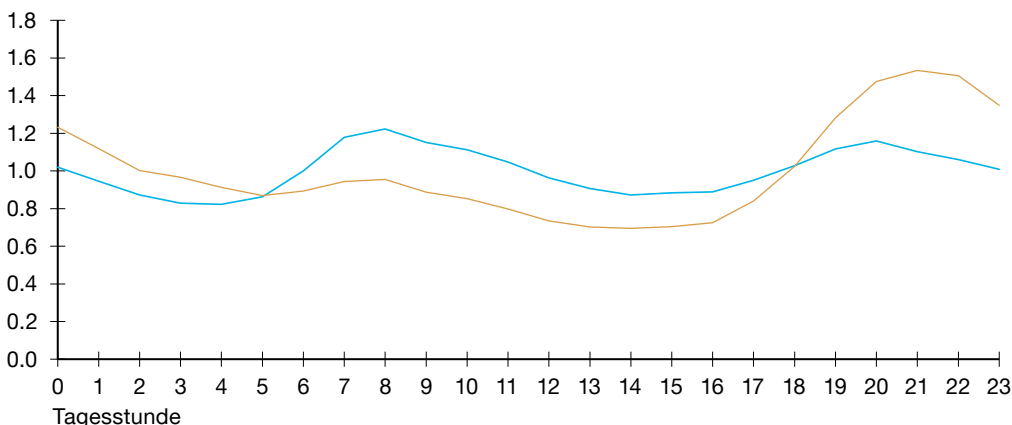
Die Russbelastung aus fossilen Brennstoffen in einer Stadt folgt typischerweise den Verkehrsaktivitäten, mit einer Morgen- und Abendspitze. In ländlichen Gebieten mit vielen Holzheizungen ist dieser Tagesgang auch beim Biomassen-Russignal zu erkennen. Stückholzheizungen werden oft morgens und abends betrieben und prägen so die tägliche Russbelastung. In der Stadt Zürich kommt dieser Heizungstyp nur sehr selten vor.

In Abbildung 38 ist der Tagesverlauf der beiden Russarten an der Messstation Bullingerhof dargestellt. Beim fossilen Anteil sind die oben erwähnten, zwei typischen Belastungsspitzen gut zu erkennen. Der «Biomassen-Russ» ist vor allem durch eine Abendspitze geprägt.

Abbildung 38: Standardisierter Tagesverlauf der Russbelastung aus PM2.5, unterteilt in fossile Brennstoffe und Biomasse.

Standardisierter Tagesverlauf BC2.5 im Bullingerhof, 2024

Faktor im Vergleich zum Mittelwert

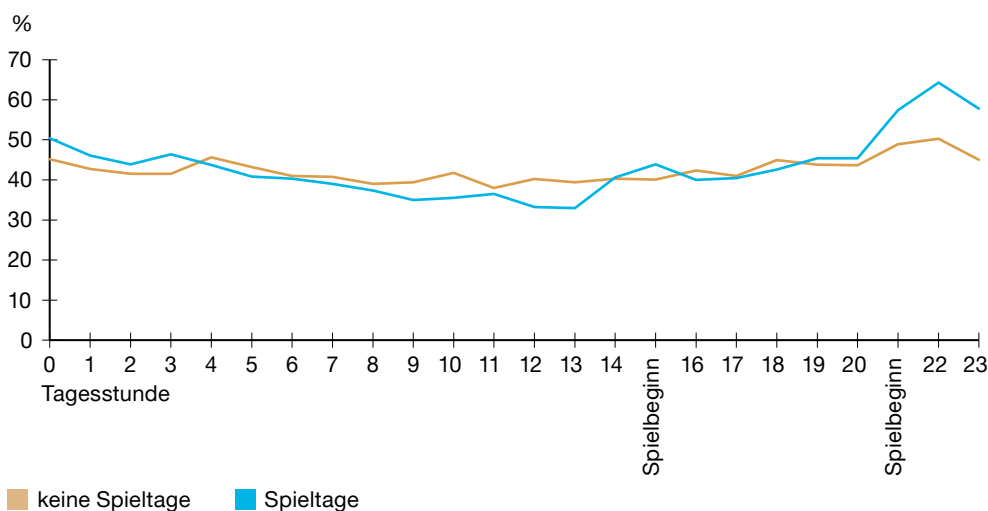


■ fossil ■ Biomasse

Während der Fussball-Europameisterschaften wurde im Bullingerhof eine Public-Viewing-Zone eingerichtet. An Spieltagen betrieben verschiedene Essensstände Grills, welche Quellen von Russ aus Biomasse darstellten. In Abbildung 39 ist der Tagesverlauf des Russanteils aus Biomassenverbrennung im Juni 2024 dargestellt. Dabei wurde zwischen Tagen mit Fussballmatches und solchen ohne unterschieden. Die Spiele begannen jeweils um 15 Uhr und um 21 Uhr. Es zeigte sich, dass im Bullingerhof der Russanteil während der Abendspiele deutlich stärker durch Biomassenverbrennung geprägt war als ausserhalb dieser Stunden.

Abbildung 39: Anteil des Russes aus Biomassenverbrennung während der Fussball EM 2024. Vergleich von Tagen mit und ohne Fussballspielen.

Anteil Biomasse am Russ im Bullingerhof, Juni 2024



■ keine Spieltage ■ Spieltage

Der Bullingerhof scheint auch in Bezug auf die Russbelastung im PM2.5 einem städtischen Hintergrundort zu entsprechen. Dies zeigte sich in der durchschnittlichen Russbelastung (Tabelle 4) sowie auch im durchschnittlichen Tagesverlauf (Abbildung 38) von Russ aus fossilen- sowie aus Biomassebrennstoffen. Einen bedeutenden lokalen Einfluss, beispielsweise durch die Wohnsiedlung Erismannhof mit den dortigen Holzfeuerungen, konnte nicht beobachtet werden.

8

Luftbelastung an stark verkehrsbelasteten Standorten

In den letzten Jahren sank der Ausstoss von Luftschadstoffen aus allen Emittentengruppen deutlich. Da der Verkehr in der Stadt Zürich nach wie vor eine der grössten Quellen darstellt, profitieren vor allem die strassennahen Standorte von dieser Reduktion. In 8.1 wird die Entwicklung der lokalen NO_x-Immissionen an der Rosengartenstrasse im Verlauf der Jahre untersucht, während in 8.2 die Ergebnisse der Messung an der Manessestrasse aufgeführt werden, welche lufthygienisch ebenfalls sehr stark durch den Verkehr geprägt wird.

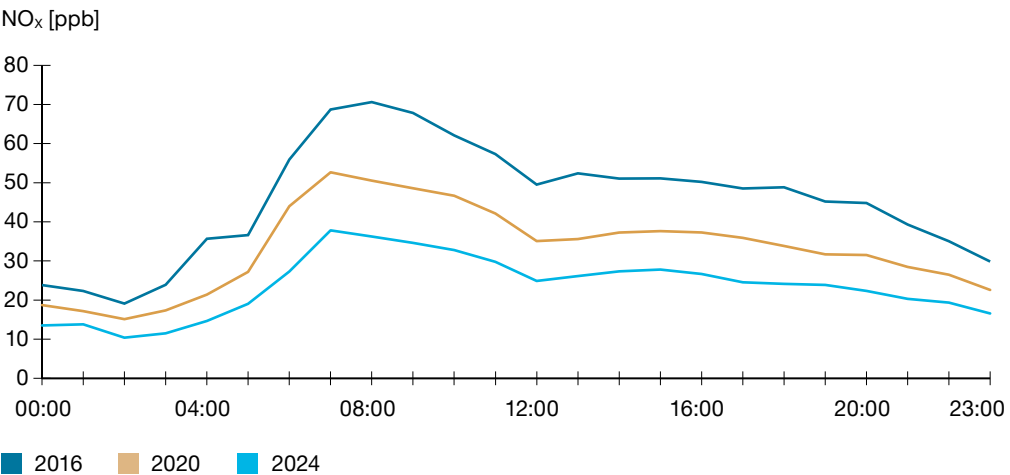
8.1 Lokale Stickoxidbelastung an der Rosengartenstrasse

Die Stickoxidemissionen in der Stadt Zürich verringerten sich in den letzten Jahren stark (Abbildung 5). Dies ist auch anhand von Immissionsmesswerten erkennbar. Durch die Differenzbildung der Belastungen von einem Strassenstandort und einem Hintergrundstandort, kann der lokale Schadstoffbeitrag näherungsweise abgeschätzt werden.

In der Abbildung 40 ist die Differenz der mittleren NO_x-Belastung zwischen der stark verkehrsexponierten Rosengartenstrasse und dem Hintergrundmessort Schulhaus Heubühl aufgeführt. Demnach wurde 2024 an der Rosengartenstrasse, gegenüber dem Jahr 2016, nur noch etwa die Hälfte der lokalen Stickoxid-Immissionen verzeichnet.

Abbildung 40: Vergleich der lokalen NO_x Belastung dreier verschiedener Jahre im Tagesverlauf.

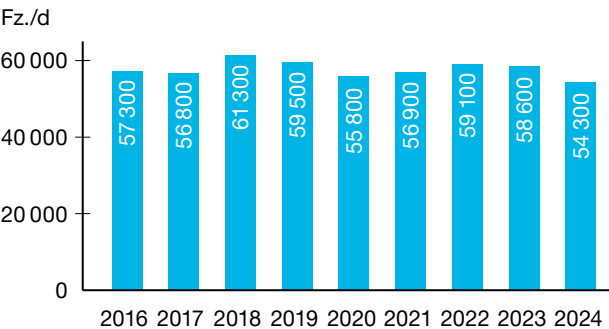
Lokale NO_x-Immissionen an der Rosengartenstrasse



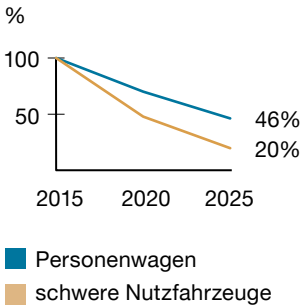
Da die Verkehrszahlen in den letzten neun Jahren praktisch stabil waren (Abbildung 41, links), muss der Rückgang der NO_x-Werte an der Rosengartenstrasse auf die verringerten Emissionen zurückzuführen sein. Im Strassenverkehr verringerten sich in dieser Zeit die Emissionsfaktoren der Personenwagen um die Hälfte und jene der schweren Nutzfahrzeuge um 80 Prozent (Abbildung 41, rechts) [44].

Abbildung 41: Verkehrsentwicklung an der Rosengartenstrasse (durchschnittlicher täglicher Verkehr, links) im Vergleich zu den Emissionsfaktoren von Personenwagen und schweren Nutzfahrzeugen während dieser Zeitperiode (rechts). Fz./d = Fahrzeuge pro Tag

Verkehrsaufkommen an der Rosengartenstrasse



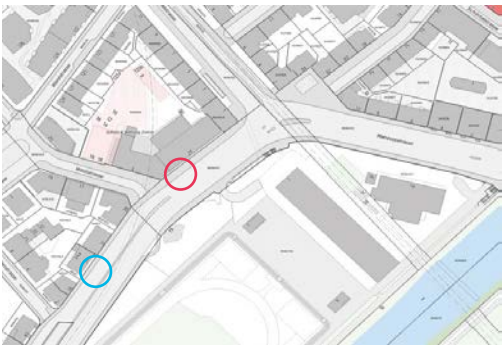
Emissionsfaktoren Schweizer Fahrzeugpark



8.2 Manessestrasse

Die Manessestrasse ist eine stark befahrene Ein- und Ausfallstrasse in Zürich. Sie bildet die Verlängerung des in die Stadt führenden Autobahnasts A3W. Zwei Messstandorte wurden 2024 an der Manessestrasse betrieben. An der Manessestrasse 20 (roter Kreis in Abbildung 42) wurde neben NO₂ auch Feinstaub PM2.5 und PM10 erfasst. Am Messstandort Manessestrasse 34 (blauer Kreis in Abbildung 42), direkt neben der Auffahrrampe zur Autobahn, erfassten Passivsammler die NO₂-Belastung. Diese beiden Orte werden seit Jahren durch das hohe Verkehrsaufkommen geprägt. Zudem befindet sich ein Grossteil der Fahrzeuge in einer Beschleunigungsphase in Richtung Autobahnauffahrt. Auch Stausituationen sind häufig.

In den letzten 10 Jahren verringerte sich der durchschnittliche tägliche Verkehr (DTV) um ca. 15 Prozent. Dementsprechend passierten im Jahr 2024 noch knapp 42000 Fahrzeuge diesen Strassenabschnitt (Abbildung 42).



Manessestrasse DTV

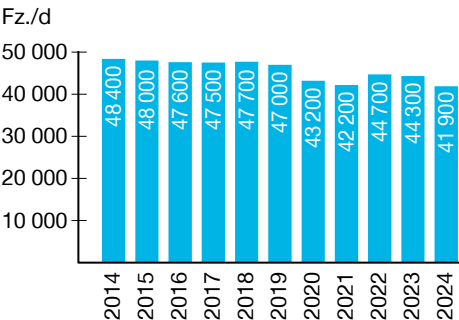
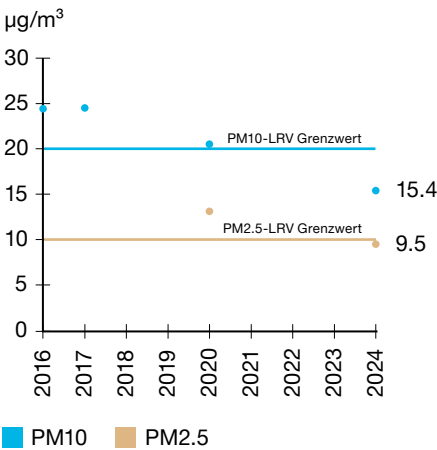


Abbildung 42: Lage der beiden Messstandorte Manessestrasse (Roter Kreis: Manessestr. 34, Blauer Kreis: Manessestr. 20). Rechte Seite: Durchschnittlicher Tagesverkehr (DTV) an der Manessestrasse der letzten elf Jahre.

Zum Rückgang des Verkehrsaufkommens kam zusätzlich die Emissionsreduktion der Fahrzeugflotte hinzu (Abbildung 41, rechts). Zusammen führte dies zu einer markanten Entlastung der Luftschadstoffsituation. Die Feinstaubbelastung sank erstmals, für PM10 deutlich und für PM2.5 knapp, unter die Langzeit-Grenzwerte der Luftreinhalte-Verordnung. Auch das NO₂-Jahresmittel verringerte sich an beiden Messstandorten in den letzten Jahren. Jedoch bewegten sie sich immer noch im Bereich des eineinhalbfachen LRV-Grenzwertes (Abbildung 43).

Feinstaubbelastung, Manessestrasse 20



NO₂-Belastung Manessestrasse

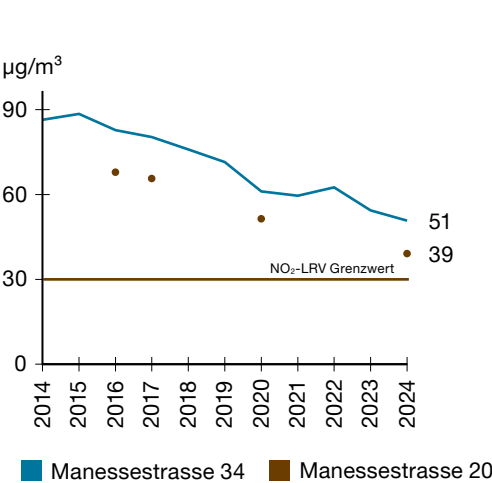


Abbildung 43: Entwicklung der NO₂- und Feinstaubbelastung an der Manessestrasse. (horizontale Linien: LRV-Grenzwerte)

Die lufthygienische Situation an stark verkehrsexponierten Standorten hat sich in den letzten Jahren markant gebessert. Die Feinstaubbelastungen an PM10 dürften an den allermeisten starkbelasteten Orten in der Stadt unterhalb der LRV-Grenzwerte liegen, während beim PM2.5 an sehr stark belasteten Orten immer noch Grenzwertüberschreitungen vorkommen. Die NO₂-Belastungen in der Stadt Zürich bewegen sich an stark verkehrsexponierten Orten immer noch über den gesetzlich verordneten Höchstwerten.

9

Ausblick: WHO Air Quality Guidelines

Durch die in der Vergangenheit laufend verschärften Massnahmen bei fast allen Verursachergruppen ist bei der Luftbelastung erfreulicherweise ein anhaltend sinkender Trend erkennbar. Trotzdem reichen die Massnahmen bis jetzt nicht aus, um die Schadstoffkonzentrationen an allen Orten unter die Grenzwerte der LRV zu senken. Neuere Forschungsergebnisse rücken zudem vermehrt auch gesundheitliche Auswirkungen unterhalb dieser Grenzwerte in den Fokus.

Neue WHO-Richtlinien: Gesundheitliche Auswirkungen unterhalb der LRV-Grenzwerte

Im September 2021 hat die WHO neue Empfehlungen «Air Quality Guidelines» oder AQGs) zur Luftqualität veröffentlicht [1]. Die Richtwerte für die sechs wichtigsten Luftschadstoffe (PM10, PM2.5, Ozon, NO₂, CO und SO₂) wurden darin gegenüber den bisherigen WHO-Empfehlungen teilweise stark nach unten korrigiert. Diese Anpassungen basieren auf der gesicherten Erkenntnis, dass auch Schadstoffkonzentrationen unter den aktuellen Empfehlungen zu wesentlichen, negativen Gesundheitsauswirkungen führen. Dazu beigetragen haben die Resultate aus grossen Langzeitstudien, welche in Regionen mit tiefer Luftbelastung, unter anderen auch in der Schweiz, durchgeführt wurden. Möglich wurden solche Studien jedoch nur dadurch, dass auch durch die jahrzehntelange Luftreinhaltepolitik, Gebiete mit solch niedrigen Konzentrationen überhaupt entstehen konnten. Zusätzlich zu den gesenkten Richtwerten empfiehlt die WHO die Integration bestimmter Feinstaubparameter (Russ, Ultrafeine Partikel) in die Messnetze, da deren Gesundheitsrisiken Anlass zur Sorge geben.

Tabelle 5: Vergleich der LRV-Grenzwerte für Feinstaub und Stickstoffdioxid mit den WHO Empfehlungen von 2005 und 2021 zur Luftqualität [1], [7], [45].

Schadstoff	Messwert	LRV-Grenzwert (µg/m ³)	WHO Air Quality Guidelines (µg/m ³)	
			Bisher (2005)	Neu (2021)
PM10	Jahresmittelwert	20	20	15
	Tageswert	50	50	45
PM2.5	Jahresmittelwert	10	10	5
	Tageswert	–	25	15
NO ₂	Jahresmittelwert	30	40	10
	Tageswert	80	–	25

Die WHO Air Quality Guidelines sind Empfehlungen, die auf rein gesundheitlichen Aspekten basieren und zum Ziel haben, die Bevölkerung vor schädlichen Einwirkungen von Luftschadstoffen zu schützen. Im Gegensatz zu den LRV-Grenzwerten, welche zum Teil noch aus den 1980er-Jahren stammen, sind sie nicht Teil der Schweizer Gesetzgebung.

Durch ihre breite Abstützung auf grosse Langzeitstudien und die Mitarbeit von international anerkannten Experten, sind die Richtlinien jedoch eine wichtige Grundlage für nationale Gremien und politische Entscheidungsträger. Die Eidgenössische Kommission für Lufthygiene (EKL) beurteilte die neuen Empfehlungen der WHO und übergab ihren Bericht 2023 dem Bundesrat. Die EKL empfiehlt darin eine Anpassung der LRV für die Schadstoffe SO₂, NO₂, CO, O₃, PM10 und PM2.5 unter der Berücksichtigung der WHO-Richtwerte [2].

Die LRV hat sich in der Vergangenheit an diesen Richtlinien orientiert. So wurde 2018 der bisherige PM2.5 Richtwert der WHO, als neuer Immissionsgrenzwert übernommen. Für NO₂ wurde in der LRV sogar ein tieferer Wert gesetzt, als ihn die WHO-Empfehlung aus dem Jahr 2005 (Tabelle 5) empfahl.

Die neuen WHO-Richtlinien bedeuten jedoch deutliche Verschärfungen: Beim Feinstaub PM10 würden die Grenzwerte um ein Viertel sinken, wobei grosse Teile des Stadtgebietes diese Anforderungen bereits erfüllen. Grössere Herausforderungen entstehen jedoch für PM2.5 und NO₂. Für PM2.5 bedeutet es eine Halbierung des LRV-Grenzwertes, sodass die Belastung mit dem besonders lungengängigen Feinstaub PM2.5, gemäss den neuen Empfehlungen der WHO im ganzen Stadtgebiet zu hoch ist (Abbildung 44).

Für NO₂ wird eine Drittelung des bestehenden Grenzwertes notwendig, wodurch annähernd das ganze bewohnte Stadtgebiet von zu hohen Konzentrationen betroffen ist (Abbildung 44). Im Jahr 2024 lagen nur erhöhte, periphere Lagen unter dem neuen NO₂-Richtwert der WHO.

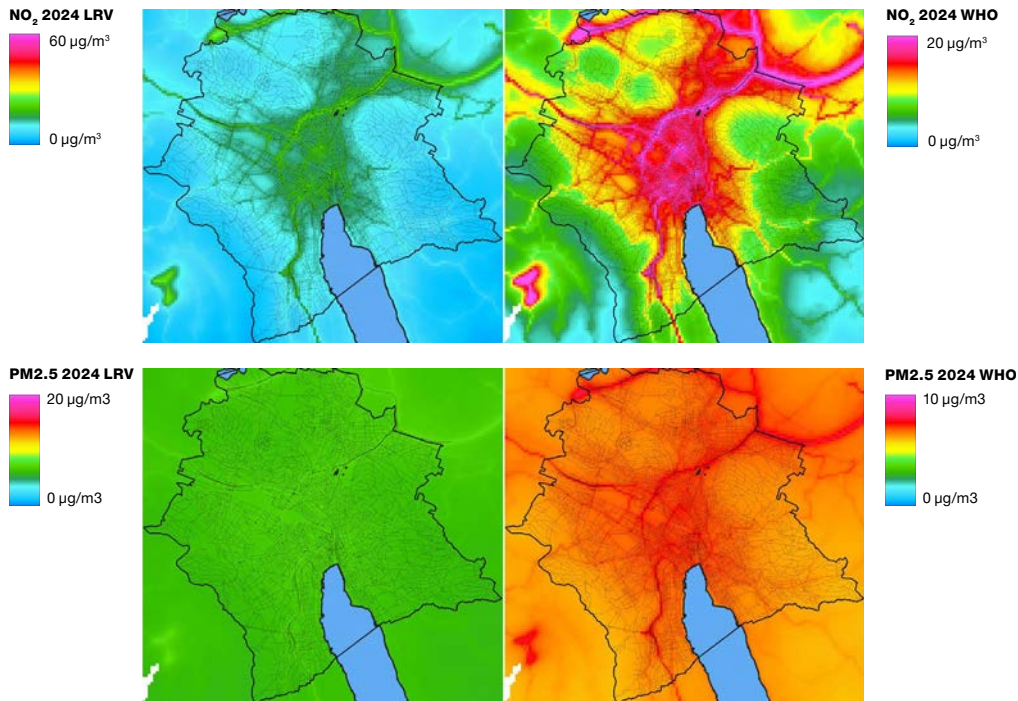


Abbildung 44: Belastungen der Luftschadstoffe NO₂ und PM_{2.5} von 2024 nach zwei verschiedenen Kriterien bewertet. Links nach den geltenden LRV-Grenzwerten, rechts nach den WHO-Richtlinien von 2021. Gelb = Belastung in Höhe des Grenzwertes (Quelle: Immissionsmodellierung UGZ)⁹.

Klimawandel und Luftschadstoffe

Der fortschreitende Klimawandel ist eine der grossen Herausforderungen unserer Gesellschaft. Die Stadt Zürich hat sich mit Netto-Null die Klimaneutralität bis 2040 zum Ziel gesetzt [46]. Luftschadstoffe und Klima beeinflussen einander in vielfältiger Weise. So können Luftschadstoffe, wie Ozon oder Russ, wärmende Effekte besitzen, während andere wie SO₂ kühlend auf das Klima einwirken [47], [48].

Die Wechselwirkungen zwischen diesen Luftschadstoffen und dem Klima sind jedoch sehr komplex und über verschiedene Rückkopplungen miteinander verbunden. Die Prognose, welchen Einfluss die Reduktion oder Zunahme der Emissionen eines bestimmten Schadstoffes auf das Klima hat, ist dadurch zurzeit noch mit grossen Unsicherheiten verbunden [48], [49].

Luftschadstoffe und Klimagase stammen oft aus denselben Quellen. Viele Massnahmen zum Klimaschutz, wie z. B. die energetische Sanierung von Gebäuden oder eine Reduktion des motorisierten Strassenverkehrs, wirken sich auch positiv auf die Luftqualität aus. So kann eine Förderung des Fuss- und Veloverkehrs oder auch ein geringeres Pendleraufkommen die Emissionen von Luftschadstoffen verringern. Wie stark der Einfluss von Verhaltensänderungen auf die Luftqualität sein kann, zeigt beispielhaft die tiefere Belastung mit Stickoxiden im Jahr 2020 durch coronabedingten Lockdown und Homeoffice-Pflicht [42].

Nicht immer aber gehen Luftqualität und Klimaschutz automatisch Hand-in-Hand. So emittieren Holzheizungen als erneuerbare Wärmequelle weit mehr Feinstaub als fossile Gas- oder Ölfeuerungen [50] und auch Elektro-Autos produzieren Feinstaub. Die Herausforderung, aber auch die Chance für die Zukunft besteht darin, bei der Umsetzung von Massnahmen die Synergien zwischen Luftqualität und Klimaneutralität bestmöglich zu nutzen.

⁹ Die Karte basiert auf Modellberechnungen. Die Auflösung der Karte beträgt 100m und kann daher lokale Spitzenbelastungen nicht korrekt abbilden.

10

Literatur

- [1] World Health Organization (WHO), WHO global air quality guidelines. Particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide, Geneva, 2021
- [2] Eidgenössische Kommission für Lufthygiene (EKL), Die neuen WHO-Luftqualitätsrichtwerte 2021 und ihre Bedeutung für die Schweizer Luftreinhalte-Verordnung, Bern, 2023
- [3] Joss Meltem Kutlar, Castro Alberto, Rösli Martin, Swiss Tropical and Public Health Institute, Quantifizierung des Gesundheitsnutzens der neuen Luftqualitätsleitlinien der Weltgesundheitsorganisation in der Schweiz, Bern, 2023
- [4] Bundesamt für Umwelt (BAFU), Auswirkungen der Luftverschmutzung auf die Gesundheit, [bafu.admin.ch/de/auswirkungen-der-luftverschmutzung-auf-die-gesundheit](https://www.bafu.admin.ch/de/auswirkungen-der-luftverschmutzung-auf-die-gesundheit), 2025
- [5] econcept, Luftschadstoffbedingte Gesundheitskosten in der Stadt Zürich, 2022
- [6] Schweiz. Eidgenossenschaft, Bundesgesetz über den Umweltschutz (Umweltschutzgesetz USG), vom 7. Oktober 1983 (Stand am 1. April 2025), 814.01, EDMZ, Bern, 1983
- [7] Schweiz. Eidgenossenschaft, Luftreinhalte-Verordnung (LRV), vom 16. Dezember 1985 (Stand am 1. September 2025), SR 814.318.142.1, EDMZ, Bern, 2025
- [8] Umwelt- und Gesundheitsschutz Zürich, Emissionskataster für Luftschadstoffe der Stadt Zürich, 2023, stadt-zuerich.ch/geodaten/download/Emissionskataster_Luftschadstoffe_und_Treibhausgase
- [9] Dr. Daniela Dyntar, Dr. Regula Rapp und Meltem Kutlar Joss, Dokumentationsstelle Luft und Gesundheit LUDOK am Schweizerischen Tropen- und Public Health Institut, Gesundheitliche Wirkungen der NO₂-Belastung auf den Menschen Basel, 2015
- [10] Peijue Huangfu und Richard Atkinson, Longterm exposure to NO₂ and O₃ and allcause and respiratory mortality: A systematic review and metaanalysis, Environment International, **144**, 105998, 2020, [sciencedirect.com/science/article/pii/S016041202031953X](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S016041202031953X)
- [11] Bundesamt für Statistik, Strassenfahrzeuge im Jahr 2024: Neue Inverkehrsetzungen und Gesamtbestand, 2025
- [12] MeteoSchweiz, Stratosphäre und Stratopause, meteoschweiz.admin.ch/wetter/wetter-und-klima-von-a-bis-z/stratosphaere-und-stratopause.html, 2025
- [13] Bundesamt für Umwelt (BAFU), Sommersmog und Ozon: Grundlagen, Bern, 2025
- [14] Deutscher Wetterdienst DWD, Bodennahes Ozon, dwd.de/DE/forschung/atmosphaerenbeob/zusammensetzung_atmosphaere/spurengase/inh_nav/o3_node.html, 2024
- [15] Akademien der Wissenschaften Schweiz, Ozon und Sommersmog: Klimawandel gefährdet heutige Erfolge – Swiss Academies Factsheets 11, 5, 2016
- [16] Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie MeteoSchweiz, Klimabulletin Sommer 2023, Zürich, 2023
- [17] Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie MeteoSchweiz, Klimabulletin Sommer 2024, Zürich, 2024
- [18] Kenneth T. Whitby und William E. Clark, Electrical Aerosol Particle Counting and Size Distribution Measuring System for the 0.015 to 1 µm Size Range, Tellus, **18**, 573–586, 1966
- [19] Eidgenössische Kommission für Lufthygiene (EKL), Feinstaub in der Schweiz – Status-Bericht der Eidg. Kommission für Lufthygiene (EKL), Bern, 2007
- [20] Flemming R. Cassee et al., White Paper – Ambient ultrafine particles: evidence for policy makers, 2019
- [21] Prashant Kumar et al., Ultrafine particles in cities, Environment International, **66**, 1–10, 2014
- [22] Hyouk-Soo Kwon et al., Ultrafine particles: unique physicochemical properties relevant to health and disease, Experimental & Molecular Medicine, **52**, 318–328, 2020
- [23] Bundesamt für Umwelt (BAFU), Feinstaub (PM₁₀, PM_{2.5}), [bafu.admin.ch/de/feinstaub](https://www.bafu.admin.ch/de/feinstaub), 2024
- [24] Bundesamt für Umwelt (BAFU), Die unsichtbare Gefahr, die Umwelt – natürliche Ressourcen in der Schweiz, **1**, 2021
- [25] Cercl’Air, Messung der Partikelanzahlkonzentration und grössenverteilung – Aussenluftqualität, **Cercl’Air Empfehlung Nr. 28**, Herisau, 2010

- [26] Eidgenössische Kommission für Lufthygiene (EKL), Feinstaub in der Schweiz 2013 – Statusbericht der Eidgenössischen Kommission für Lufthygiene, Bern, 2014, ekl.admin.ch/inhalte/ekl-dateien/themen/Feinstaub_in_der_Schweiz_2013.pdf
- [27] W. Birmili et al., Vorkommen und Quellen ultrafeiner Partikel im Innenraum und in der Außenluft – Aktueller Kenntnisstand, Gefahrstoffe – Reinhaltung der Luft, **80**, (01–02), 33–43, 2020
- [28] Bundesamt für Gesundheit (BAG), Faktenblatt polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK), Bern, 2020
- [29] P. Leuenberger et al., Etude suisse sur la pollution de l'air et les maladies respiratoires chez l'adulte (SAPALDIA), Schweiz. Med. Wochenschr., **128**, 150–161, 1998
- [30] BUWAL, Schwebestaub – Messung und gesundheitliche Bewertung, Schriftreihe Umwelt, Bd. Nr. 270, BUWAL, 1996
- [31] C. Braun-Fahrlander und L. Grize, SCARPOL, Bericht über drei aufeinanderfolgende Untersuchungen von 6–7-jährigen Kindern in den SCARPOL-Studienorten während der Schuljahre 1992/93, 1995–1997 und 1998/99, Basel, 2001
- [32] D.E Schraufnagel, The health effects of ultrafine particles, Experimental & Molecular Medicine, **52**, 311–317, 2020
- [33] Simone Ohlwein et al., Health effects of ultrafine particles: a systematic literature review update of epidemiological evidence, International Journal of Public Health, **64**, (4), 547–559, 2019
- [34] Stadt Zürich, Masterplan Umwelt der Stadt Zürich 2017–2020, Zürich, 2016
- [35] Liza Selley, Brake dust exposure exacerbates inflammation and transiently compromises phagocytosis in macrophages, Metallomics, **12**, 371–386, 2020
- [36] K. Daellenbach, Sources of particulate-matter air pollution and its oxidative potential in Europe, (587 (7834)), 414–419, 2020
- [37] Dang Sheng Su, Klein, aber gefährlich – Rußpartikel moderner Dieselmotoren sind vermutlich gesundheitsschädlicher als die Rußteilchen aus älteren Motoren, mpg.de/563231/pressemitteilung20080208, 2008
- [38] Touring Club der Schweiz (TCS), Partikelfilter Wo stehen wir in Bezug auf Partikelfilter in Dieselfahrzeuge und Benzinfahrzeuge?, 23.09.2021, tcs.ch/de/testberichte-ratgeber/ratgeber/umwelt-mobilitaet/partikelfilter.php, 2021
- [39] Bundesamt für Umwelt (BAFU), Weniger Russ aus Dieselmotoren – Erfolge der Schweiz bei der Emissionsreduktion, UD-1057-D, Bern, 2012
- [40] Bundesamt für Strassen (ASTRA) Bundesamt für Umwelt (BAFU), Partikelanzahl-Messung bei Dieselfahrzeugen, 2024
- [41] Rainer Klose, Partikel Alarm für Benzin – Russpartikel aus Direkteinspritzern, 23.05.2027, Empa, empa.ch/web/s604/standard-article-view-page/-/asset_publisher/IqGNyH2TDWyn/content/russpartikel-aus-benzinern/pop_up?_101_INSTANCE_IqGNyH2TDWyn_viewMode=print&_101_INSTANCE_IqGNyH2TDWyn_language=de_DE, 2017
- [42] Siegfried B. Scheller M., Gillich E., von Allmen Th., Rederlechner N., Umwelt- und Gesundheitsschutz Zürich (UGZ), Luftbilanz 2020, Zürich, 2021
- [43] Eidgenössische Kommission für Lufthygiene (EKL) und BUWAL, Benzol in der Schweiz, Schriftenreihe Umwelt, Bd. 350, Bern, 2003
- [44] Bundesamt für Umwelt (BAFU), Handbuch Emissionsfaktoren des Strassenverkehrs (HBEFA 4.2), 2022
- [45] World Health Organization (WHO), Air Quality Guidelines – Global Update 2005, Kopenhagen, 2006
- [46] Umwelt- und Gesundheitsschutz Zürich (UGZ), Klimaschutzplan, Zürich, 2024
- [47] IPCC, Climate Change 2023, Synthesis Report, 2024
- [48] IPPC Task Force on National Greenhouse Gas Inventories, Expert Meeting on Short-Lived Climate Forcers (SLCF), 2018, ipcc.ch/site/assets/uploads/2019/02/1805_Expert_Meeting_on_SLCF_Report.pdf
- [49] Deutsches Klima Konsortium (DKK), Haben Verbesserungen der Luftqualität einen Einfluss auf den Klimawandel?, 17.12.2021
- [50] Bundesamt für Umwelt (BAFU), Faktenblatt Emissionsfaktoren Feuerungen, 2024
- [51] CEN, Messverfahren zur Bestimmung der Konzentration von Stickstoffdioxid und Stickstoffmonoxid mit Chemilumineszenz – Luftqualität, **EN 14211**, Brüssel, 2012

- [52] Umwelt- und Gesundheitsschutz Zürich (UGZ) Fachbereich Labor, NO₂-Passivsammlermessungen mit Passivsammlern des Palmes-Typs, **SOP SOP UGZ FB LA / SOP_004 V. 2.4**, 2013
- [53] CEN, Messverfahren zur Bestimmung der Konzentration von Kohlenmonoxid mit nicht-dispersiver Infrarot-Fotometrie – Luftqualität, DIN EN 14626, Berlin, 2012
- [54] CEN, Messverfahren zur Bestimmung der Konzentration von Schwefeldioxid mit Ultraviolett-Fluoreszenz – Luftqualität, **DIN EN 14212**, Brüssel, 2012
- [55] VDI, Bestimmung der Partikelanzahlkonzentration und Anzahlgrößenverteilung; Kondensationspartikelzähler (CPC), 2008
- [56] CEN, Gravimetrisches Standardmessverfahren für die Bestimmung der PM₁₀- oder PM_{2.5}-Massenkonzentration des Schwebstaubes – Aussenluft, **DIN EN 12341**, Brüssel, 2014
- [57] CEN, Automatische Messeinrichtungen zur Bestimmung der Staubkonzentration (PM₁₀, PM_{2.5}) – Aussenluft, **Entwurf DIN EN 16450**, Brüssel, 2015
- [58] CEN, Leitfaden zur Messung von auf Filtern abgeschiedenem elementarem Kohlenstoff (EC) und organisch gebundenem Kohlenstoff (OC) – Aussenluftqualität, **DIN CEN/TR 16243**, Berlin, 2011
- [59] CEN, Leitfaden zur Messung von Anionen und Cationen in PM_{2.5} – Aussenluft, **DIN CEN/TR 16269 – DIN SPEC 33965**, Berlin, 2011
- [60] CEN, Messverfahren zur Bestimmung der Konzentration von Ozon mit Ultraviolett-Photometrie – Luftqualität, **DIN EN 14625**, Berlin, 2012
- [61] CEN, Passivsammler zur Bestimmung der Konzentration von Gasen und Dämpfen – Anforderungen und Prüfverfahren – Teil 2: Spezifische Anforderungen und Prüfmethoden – Aussenluftqualität, **EN 13528-2**, Brüssel, 2002
- [62] CEN, Passivsammler zur Bestimmung der Konzentration von Gasen und Dämpfen – Anforderungen und Prüfverfahren – Teil 1: Allgemeine Anforderungen – Aussenluftqualität, **EN 13528-1**, Brüssel, 2002
- [63] CEN, Passivsammler zur Bestimmung der Konzentration von Gasen und Dämpfen – Teil 3: Anleitung zur Auswahl, Anwendung und Handhabung – Aussenluftqualität, **EN 13528-3**, Berlin, 2004
- [64] Cercl’Air, Stickstoffdioxidmessung mit Passivsammlern – Aussenluftqualität, Cercl’Air **Empfehlung Nr. 25**, Herisau, 2004
- [65] Eurachem/CITAC, Quantifying Uncertainty in Analytical Measurement (QUAM), 2003
- [66] Jürg Brunner, Umwelt- und Gesundheitsschutz Zürich (UGZ), Messunsicherheit eines Stickstoffdioxid-Jahresmittelwerts aus Passivsammlermessungen mit Passivsammlern des Palmes-Typs – Teil II: Anwendung: Bestimmung der Messunsicherheit der UGZ-Passivsammler für Stickstoffdioxid, Zürich, 2008
- [67] Ch. Hüglin, Feistaubmessung (PM₁₀ und PM_{2.5}) mit dem Fidas 200 der Firma Palas im NABEL, 28.10, empa.ch/documents/56101/246436/Fidas_200_NABEL.pdf/93790947-135a-4575-a718-370316f506c5, 2016

Anhang

Anhang

A1 Immissions-Grenzwerte der LRV

Schadstoff	Immissions-grenzwert	Statistische Definition
Schwefeldioxid SO ₂	30 µg/m ³ 100 µg/m ³ 100 µg/m ³	Jahresmittelwert (arithmetischer Mittelwert) 95 % der ½-h-Mittelwerte eines Jahres ≤ 100 µg/m ³ 24-h-Mittelwert; darf höchstens einmal pro Jahr überschritten werden
Stickstoffdioxid NO ₂	30 µg/m ³ 100 µg/m ³ 80 µg/m ³	Jahresmittelwert (arithmetischer Mittelwert) 95 % der ½-h-Mittelwerte eines Jahres ≤ 100 µg/m ³ 24-h-Mittelwert; darf höchstens einmal pro Jahr überschritten werden
Kohlenmonoxid CO	8 mg/m ³	24-h-Mittelwert; darf höchstens einmal pro Jahr überschritten werden
Ozon O ₃	100 µg/m ³ 120 µg/m ³	98 % der ½-h-Mittelwerte eines Monats ≤ 100 µg/m ³ 1-h-Mittelwert; darf höchstens einmal pro Jahr überschritten werden
Schwebestaub ¹⁰ PM10	20 µg/m ³ 50 µg/m ³	Jahresmittelwert (arithmetischer Mittelwert) 24-h-Mittelwert; darf höchstens dreimal pro Jahr überschritten werden
PM2.5	10 µg/m ³	Jahresmittelwert (arithmetischer Mittelwert)
Blei (Pb) im Schwebestaub PM10	500 µg/m ³	Jahresmittelwert (arithmetischer Mittelwert)
Cadmium (Cd) im Schwebestaub PM10	1.5 ng/m ³	Jahresmittelwert (arithmetischer Mittelwert)
Staubniederschlag insgesamt	200 mg/(m ² ·Tag)	Jahresmittelwert (arithmetischer Mittelwert)
Blei (Pb) im Staubniederschlag	100 µg/(m ² ·Tag)	Jahresmittelwert (arithmetischer Mittelwert)
Cadmium (Cd) im Staubniederschlag	2 µg/(m ² ·Tag)	Jahresmittelwert (arithmetischer Mittelwert)
Zink (Zn) im Staubniederschlag	400 µg/(m ² ·Tag)	Jahresmittelwert (arithmetischer Mittelwert)
Thallium (Tl) im Staubniederschlag	2 µg/(m ² ·Tag)	Jahresmittelwert (arithmetischer Mittelwert)
Hinweis: mg = Milligramm: 1 mg = 0.001 g µg = Mikrogramm: 1 µg = 0.001 mg ng = Nanogramm: 1 ng = 0.001 µg Das Zeichen «≤» bedeutet «kleiner oder gleich».		

Die Immissionsgrenzwerte für Luftschadstoffe sind gemäss Artikel 14 des schweizerischen Umweltschutzgesetzes [6] so festzulegen, dass ein umfassender Schutz des Menschen und der Umwelt dauerhaft gewährleistet ist. Sie berücksichtigen nicht nur die gesundheitlichen Auswirkungen auf besonders empfindliche Personengruppen, sondern auch die Wirkungen auf Tiere, Pflanzen, Böden und ganze Ökosysteme. Diese wirkungsorientierten Schwellen sind so festgelegt, dass nach dem aktuellen Stand der Wissenschaft keine negativen Effekte auf die Schutzobjekte zu erwarten sind.

¹⁰ Feindisperse Schwebestoffe mit einem aerodynamischen Durchmesser von weniger als 10 µm (PM10) bzw. 2.5 µm (PM2.5).

Bei den Immissionsgrenzwerten der LRV handelt es sich nicht um Alarmwerte. Alarmwerte sind erheblich höher angesetzt als die Grenzwerte der LRV und greifen, sobald die Allgemeinbevölkerung durch eine akute gesundheitliche Gefahr bedroht wird. In solchen Krisensituationen treten Sofortmassnahmen wie Teil-Fahrverbote und/oder Betriebs-schliessungen in Kraft. Alarmwerte bieten denn auch keinen dauerhaften Schutz des Menschen und seiner Umwelt, wie dies im Umweltschutzgesetz vorgesehen ist.

Die LRV kennt keine Immissions-Grenzwerte für krebserregende Stoffe (z. B. Benzol oder Dieselruss). Da sie bereits in kleinsten Mengen schädlich sind, müsste als Wirkungsschwelle ein unrealistischer «Nullwert» gefordert werden. Es gilt jedoch ein allgemeines Minimierungsgebot. Ausserdem werden die Emissionen einer Vielzahl von Stoffen mit begründetem Verdacht auf eine krebserzeugende Wirkung in der LRV begrenzt.

A2 **Messorte und erfasste Luftschadstoffparameter 2024**

An den nicht aufgeführten Messstandorten kamen ausschliesslich NO₂-Passivsammler im Einsatz.

Tabelle 6: Messstandorte der Messkampagne 2024, ihre Klassierung und die gemessenen Parameter.

Messort		38	29	28	30	47	22	5
		Stampfenbachstrasse	Schimmelstrasse	Rosengartenstrasse	Schulhaus Heubeeribüel	Bullingerhof	Manessestrasse 20	Bellevue
Koordinaten	x	2683148	2681943	2682097	2685137	2685479	2682051	2683580
	y	1249020	1247245	1249942	1248473	1251608	1247040	1246772
Klassierung	Verkehrseinfluss	mässig	stark	stark	gering	gering	stark	stark
	Siedlungseinfluss	stark	stark	stark	mässig	mässig	stark	mässig
Parameter	NO _x	x	x	x	x	x		
	NO ₂	x ^{a)}	x ^{a)}	x ^{a)}	x ^{a)}	x ^{a)}	x ^{a)}	x ^{b)}
	O ₃	x	x	x	x	x		
	CO	x						
	SO ₂	x						
	VOC	x ^{b)}	x ^{b)}	x ^{b)}	x ^{b)}			x ^{b)}
	PN	x	x	x				
	PM10	x	x	x	x	x	x	
	PM2.5	x	x	x	x	x	x	
	Russ	x	x	x	x	x ^{c)}	x	
	Metalle	x	x	x	x	x	x	
	Salze	x	x	x	x	x	x	
	Staub-N	x	x					

a) Chemilumineszenz
b) Passivsammler resp. GC-MS auf Passivsammler
c) High Volume Sampler (HVS) + Aethalometer

A3 Eingesetzte Messverfahren

Tabelle 7: Eingesetzte Messverfahren und Messgeräte, sowie die berücksichtigten Normen.

Messparameter	Messverfahren/-gerät	Methode
NO _x	Chemilumineszenz	CEN 14211 [51]
NO ₂	Chemilumineszenz	CEN 14211 [51]
	Passivsammler Typ Palmes	UGZ Methode [52]
Ozon	Ultraviolett-Fotometrie	CEN 1462 [60]
CO	nicht-dispersive Infrarot-Fotometrie	CEN 14626 [53]
SO ₂	Ultraviolett-Fluoreszenz	CEN 14212 [54]
VOC	GC-MS auf Passivsammler 3M	UGZ-Methode
Partikelanzahl (PA)	CPC	VDI 3867 Blatt 2 [55]
PM10	High Volume Sampler (HVS) und Gravimetrische Bestimmung	CEN 12341 [56]
	FIDAS	CEN 16540 [57]
PM2.5	High Volume Sampler (HVS) und Gravimetrische Bestimmung	CEN 12341 [56]
	FIDAS	CEN 16540 [57]
Russ	Thermooptische Transmission (TOT / EUSAAR-2) ¹¹	CEN/TR 16243 [58]
Metalle	ICP/MS und F-AAS (Fe)	Verfahren Labor Niutec, Winterthur
Salze	Ionenchromatografie (IC)	CEN/TR 16269 [59]
Staub-Niederschlag	Probenahme: Bergerhoff	Probenahme: VDI 4320
	Analytik: G-AAS	Blatt 2 Analytik: Verfahren Labor Niutec, Winterthur

¹¹ Tägliche Probenahme mittels HighVolume Sampler auf Quarzfaser- oder Glasfaserfilter. Russbestimmung auf Quarz-faserfiltern mittels Thermooptische Transmission (Referenzverfahren).

A4 NO₂-Messungen im Detail

A4.1 NO₂-Messwerte 2020 und 2024

Tabelle 8: Messstandorte der NO₂-Passivsammler der Messkampagne 2024, ihre Klassierung und die Jahresmittelwerte von 2020 und 2024.

Messort-Nr.	Messort	Verkehrseinfluss	Siedlungseinfluss	Jahresmittelwert 2020 NO ₂ (µg/m ³)	Jahresmittelwert 2024 NO ₂ (µg/m ³)
1	Adolf Jöhr Weg	gering	gering	11.3	8.5
2	Bellerivestrasse 145	stark	mässig	25.5	21.4
3	Bellerivestrasse 17	stark	stark	26.4	21.1
4	Bellerivestrasse 253	stark	mässig	27.4	23.5
5	Bellevue	stark	mässig	38.9	30.5
6	Bionstrasse	gering	mässig	13.7	11.3
7	Birchstrasse 579	gering	mässig	16.3	13
8	Bullingerhof 5	gering	mässig	18.2	14.1
9	Eichbühlstrasse 43	gering	stark	17.5	14.4
10	Forchstrasse 145	stark	stark	18.3	13.9
11	Franklinplatz	gering	stark	24.4	18.7
12	Friedhof Sihlfeld	gering	mässig	13.7	11
13	Gerhardstrasse	gering	stark	21.2	17.5
14	Gratweg	gering	gering	6.2	5.6
15	Hardhof	gering	mässig	16.3	12.6
16	Im Ris	gering	gering	7.8	6.2
17	In Böden 123	gering	stark	17	15.9
18	Josefstrasse 175	gering	stark	17.6	13.6
19	Kaserne	gering	stark	18.2	14.9
20	Kirchbühlweg	gering	mässig	15.4	12.8
21	Limmatquai 18	gering	stark	19.4	17.4
22	Manessestrasse 20	stark	stark	51.4	39.2
23	Manessestrasse 34	stark	stark	61	50.8
24	Meientalstrasse	gering	mässig	13.6	11.3
25	Oerliker Park	gering	mässig	22.3	16

26	Paradeplatz	gering	stark	18.9	15.5
27	Rosengartenstrasse Einfahrt	stark	stark	45.7	34.4
28	Rosengartenstrasse Sonde	stark	stark	38.7	30.4
29	Schimmelstrasse	stark	stark	30	24.9
30	Schulhaus Heubeeribüel	gering	mässig	10.4	8.6
31	Schulhaus Hirzenbach	gering	mässig	14.4	11.7
32	Schulhaus Nordstrasse	gering	stark	25	20
33	Schulhaus Saatlen	gering	mässig	17.8	13.3
34	Schulhaus Seefeld	gering	stark	14.5	12.2
35	Schulhaus Vogtsrain	gering	stark	14.6	12.4
36	Schweighofstrasse 367	gering	mässig	17.3	13.6
37	Seebahnstrasse 229	stark	mässig	38	34.7
38	Stampfenbachstrasse	mässig	stark	21.7	18.3
39	Steinbrüchelstrasse 44	gering	stark	11.2	8.8
40	Strandbad Mythenquai	gering	mässig	18.6	14.7
41	Turbinenplatz	gering	stark	18.4	15.1
42	Utoquai 49	stark	stark	34.4	25.7
43	Utoquai 50	stark	stark	28.3	23.7
44	Wachtelstrasse	gering	mässig	15.5	12
45	Wasserwerkstrasse 18	stark	stark	–	37
46	Wegackerstrasse 2	gering	mässig	11.6	9.4

A4.2 NO₂-Tagesgrenzwertüberschrteitungen

Gemäss LRV wäre höchstens eine Überschreitung des Tagesmittelwertes von 80 µg/m³ tolerierbar. Seit 2021 wurden jedoch in der Stadt Zürich keine Tagesgrenzwertüberschreitungen von NO₂ mehr verzeichnet.

Anzahl NO₂-Überschreitungen Tagesgrenzwert

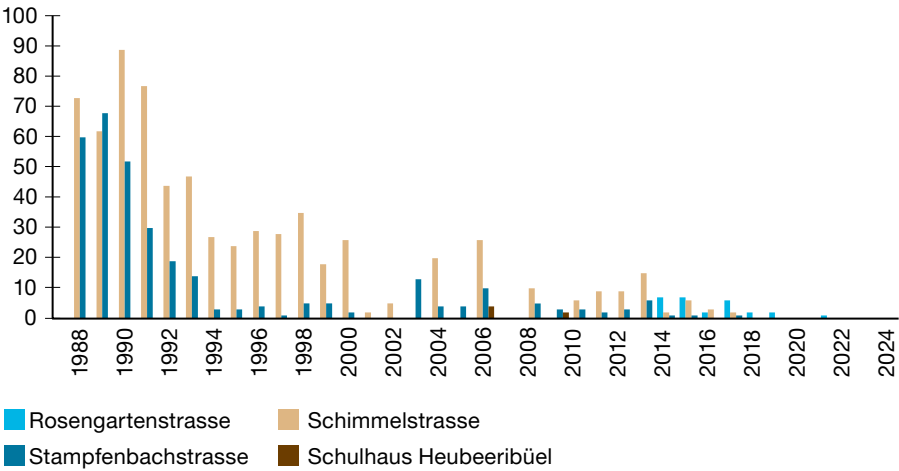
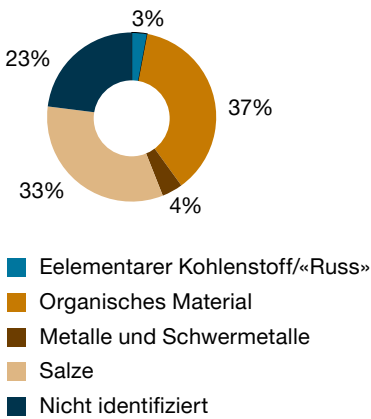


Abbildung 45: Entwicklung der Stickstoffdioxid-Kurzzeitbelastung (Anzahl Überschreitungen des Tagesgrenzwertes).

A5 Zusammensetzung PM10

Abbildung 46 zeigt die Feinstaubzusammensetzung PM10 der restlichen vier Stadtzürcher Standorte, welche im Jahr 2024 beprobt wurden. Die Zusammensetzung der Standorte Rosengartenstrasse und Schulhaus Heubeeribüel befinden sich im Abschnitt 6.4.4.7, Abbildung 28.

Stampfenbachstrasse PM10
(12 µg/m³)



Schimmelstrasse PM10
(12 µg/m³)

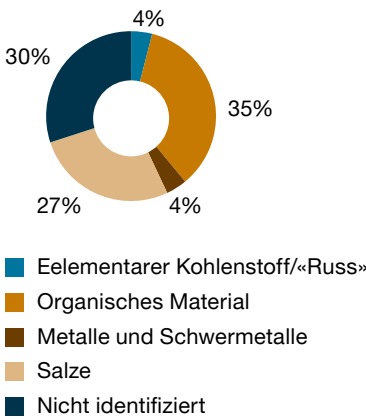
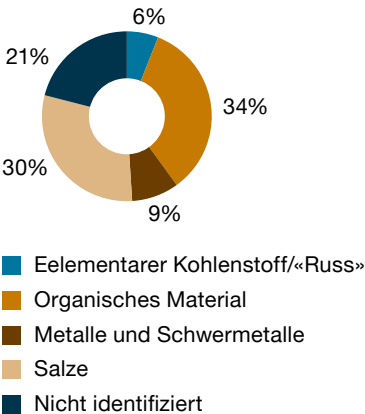
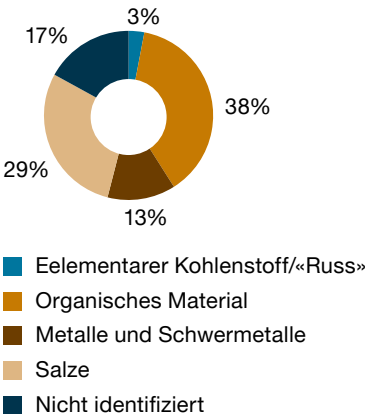


Abbildung 46: Feinstaubzusammensetzung (PM10) an den restlichen vier Stadtzürcher Messstationen 2024. Der Jahresmittelwert der PM10-Belastung ist in Klammern dargestellt.

Manessestrasse PM10
(15 µg/m³)



Bullingerhof PM10
(11 µg/m³)



A6 Schwermetallgehalte im Staubbiederschlag

In der LRV sind Grenzwerte für die Schwermetalle Blei, Cadmium und Zink definiert (Anhang A1). Die folgenden drei Abbildungen zeigen die Konzentrationsverläufe der letzten 30 Jahre.

Abbildung 47: Jahresmittelwert vom Bleigehalt im Staubbiederschlag. Rote Linie: Grenzwert LRV.

Bleigehalt im Staubbiederschlag

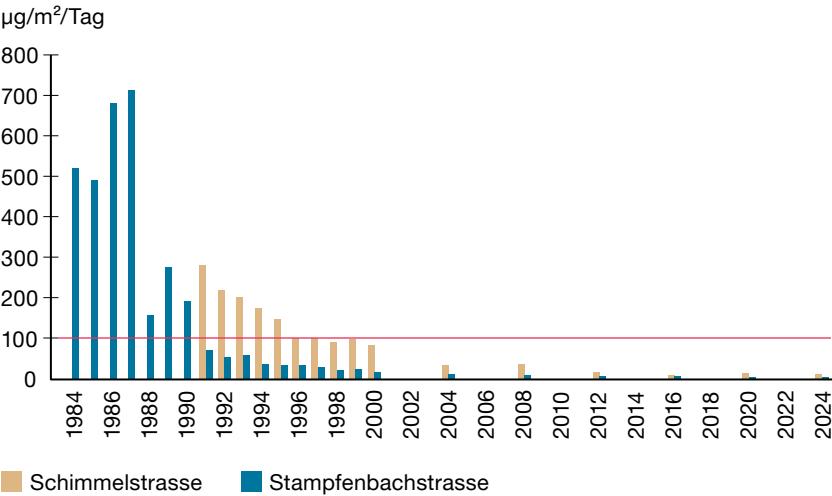
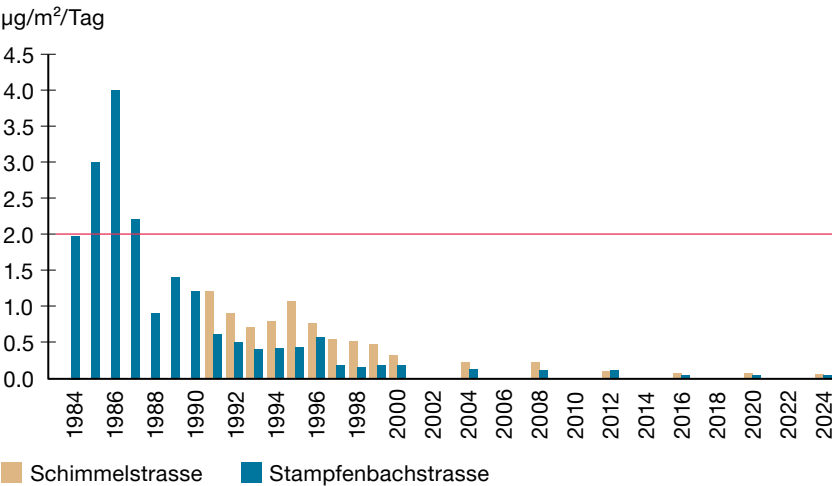


Abbildung 48: Jahresmittelwert vom Cadmiumgehalt im Staubbiederschlag. Rote Linie: Grenzwert LRV.

Cadmiumgehalt im Staubbiederschlag



Zinkgehalt im Staubniederschlag

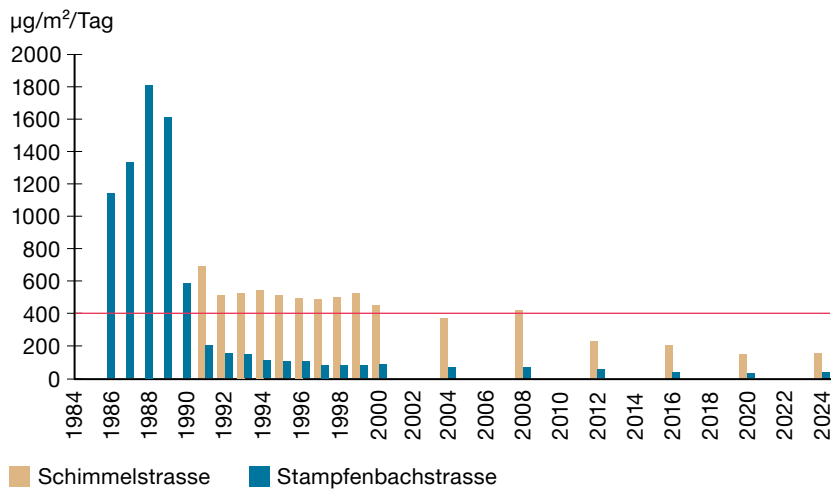


Abbildung 49: Jahresmittelwert vom Zinkgehalt im Staubniederschlag. Rote Linie: Grenzwert LRV.

A7 Messunsicherheiten

A7.1 Ozon-Messungen

Die erweiterte Messunsicherheit ($k=2$) für einen Ozon-Stundenwert gemäss CEN 14625 [60] beträgt $4.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ in Höhe des Grenzwertes ($120 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

Messunsicherheit Ozon Stundenwert

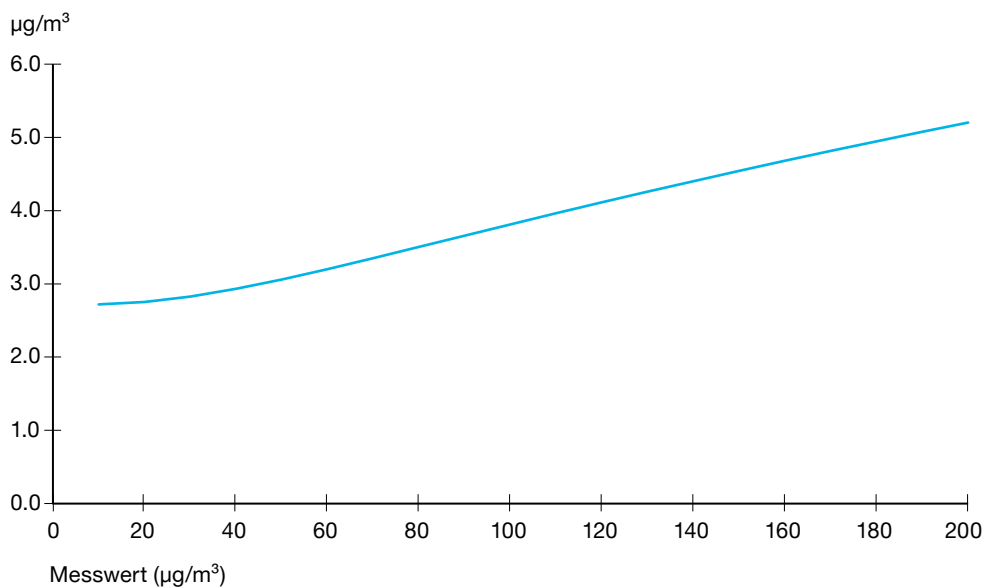


Abbildung 50: Kombinierte erweiterte Messunsicherheit ($k=2$) der Ozonmessung (Stundenmittelwert) in Abhängigkeit vom Messwert. (Grenzwert LRV: $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$)

A7.2 Stickstoffdioxid-Messungen

Die erweiterte Messunsicherheit ($k=2$) eines NO_2 -Tagesmittelwerts beim Grenzwert ($80 \mu\text{g}/\text{m}^3$) beträgt $4.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$, diejenige des Jahresmittelwerts beim Grenzwert ($30 \mu\text{g}/\text{m}^3$) beträgt $2.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Abbildung 51: Kombinierte erweiterte Messunsicherheit ($k=2$) der Stickstoffdioxid-Messung (Tagesmittelwert) in Abhängigkeit vom Messwert. (Grenzwert LRV: $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$)

Messunsicherheit NO_2 Tageswert

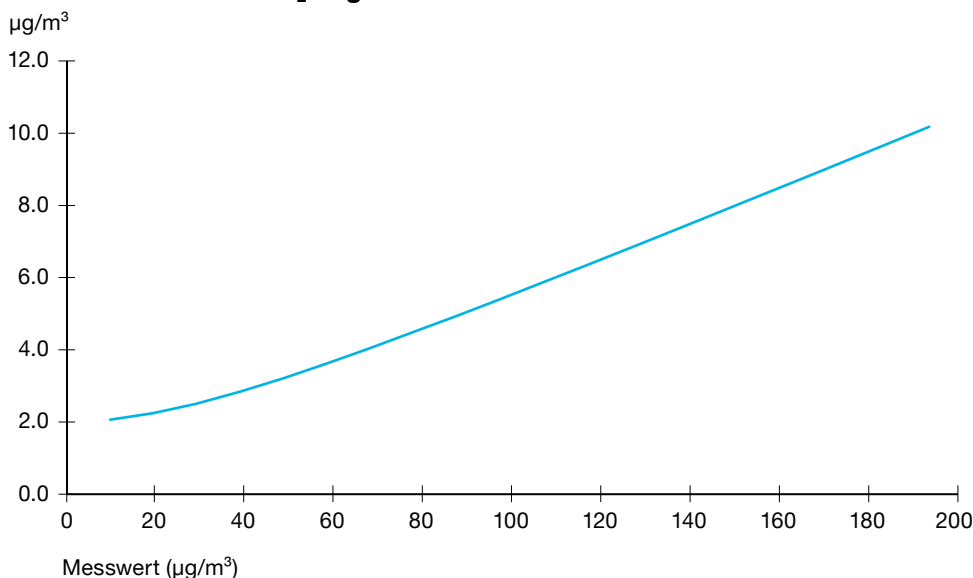
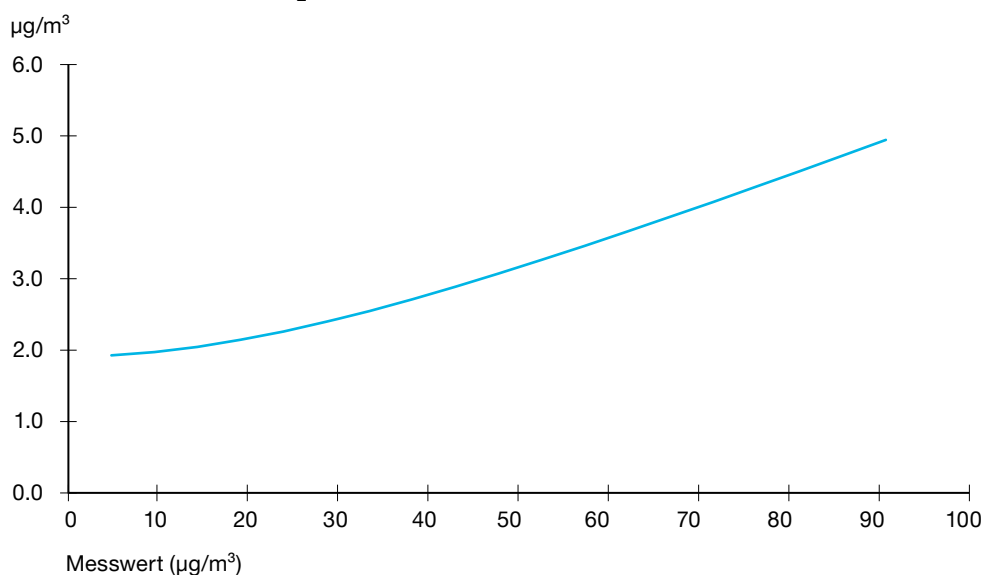


Abbildung 52: Kombinierte erweiterte Messunsicherheit ($k=2$) der Stickstoffdioxid-Messung (Jahresmittelwert) in Abhängigkeit vom Messwert. (Grenzwert LRV: $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$)

Messunsicherheit NO_2 Jahreswert



Die Stickstoffdioxid-Messungen mit Passivsammlern im UGZ basieren auf den entsprechenden Normen und Empfehlungen [61], [62], [63], [64]. Für die Jahresmittelwerte wurde die Messunsicherheit gemäss [65] bestimmt. Es resultiert eine kombinierte erweiterte Messunsicherheit ($k=2$) in Höhe des Grenzwerts von rund 5 % [66].

A7.3 Feinstaub PM10 und PM2.5

Die Feinstaubwerte PM10 und PM2.5 werden mittels kontinuierlich messender FIDAS-Messgeräte gemäss der Norm CEN 16540 [57] bestimmt und auf das Referenzverfahren (High Volume Sampler und Gravimetrie, CEN 12341 [56]) bezogen. Für nach diesem Verfahren korrigierte FIDAS Werte kann die erweiterten Messunsicherheit ($k=2$, 95 %) auf ca. $0.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ für den Jahresmittelwert geschätzt werden [67].

A7.4 Russ (TOT/EUSAAR)

Die Messunsicherheit wurde gemäss der Richtlinie [65] bestimmt. Die berechnete erweiterte Messunsicherheit ($k=2$) für den Russ-Jahresmittelwert 2020 liegt bei allen Messstationen $<5\%$.

A7.5 VOC

Die Messunsicherheit des Verfahrens wurde bis jetzt nicht spezifisch bestimmt. Aufgrund von Vergleichsmessungen kann von einer maximalen Messunsicherheit für den Benzol Jahresmittelwert von ca. 20 % ausgegangen werden.

A7.6 Metallanalytik, Ionen (Salze), Ultrafeine Partikel

Die Messunsicherheit der Verfahren wurde bis zum aktuellen Zeitpunkt nicht bestimmt.

