Luftqualität 2021

Messresultate des Nationalen Beobachtungsnetzes für Luftfremdstoffe (NABEL)

Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Bundesamt für Umwelt BAFU

Empa
Materials Science and Technology

Luftqualität 2021

Messresultate des Nationalen Beobachtungsnetzes für Luftfremdstoffe (NABEL)

Herausgegeben vom Bundesamt für Umwelt BAFU
und der Eidgenössischen Materialprüfungs- und Forschungsanstalt Empa
Bern, 2022

Impressum

Herausgeber
Bundesamt für Umwelt (BAFU)
Das BAFU ist ein Amt des Eidg. Departementes für Umwelt,
Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK).
Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Empa)

Auskunfts- und Kontaktstelle
Bundesamt für Umwelt
Abteilung Luftreinhaltung und Chemikalien
3003 Bern
Telefon 058 463 01 65
luftreinhaltung@bafu.admin.ch | *www.bafu.admin.ch*

Zitierung
BAFU (Hrsg.) 2022: Luftqualität 2021. Messresultate des
Nationalen Beobachtungsnetzes für Luftfremdstoffe (NABEL).
Bundesamt für Umwelt, Bern, Umwelt-Zustand Nr. 2227: 29 S.

Gestaltung
Funke Lettershop AG

Titelbild
Neue NABEL-Messstation Dübendorf
© Empa

PDF-Download
www.bafu.admin.ch/uz-2227-d
Eine gedruckte Fassung kann nicht bestellt werden.

Diese Publikation ist auch in französischer Sprache verfügbar.
Die Originalsprache ist Deutsch.

© BAFU 2022

Inhaltsverzeichnis

Abstracts		**5**
Vorwort		**6**
1	**Luftbelastung in der Schweiz 2021**	**7**
1.1	Vergleich mit Immissionsgrenzwerten	7
1.2	Räumliche Verteilung der Luftbelastung	8
2	**Luftbelastung an den NABEL-Stationen 2021**	**10**
2.1	Vergleich mit Immissionsgrenzwerten	10
3	**Besonderheiten 2021**	**12**
4	**Entwicklung und Auswirkungen**	**14**
4.1	Entwicklung der Luftbelastung	14
4.2	Auswirkung der Luftbelastung	15
5	**Luftschadstoffe**	**16**
5.1	Feinstaub und seine Zusammensetzung	16
5.2	Ozon	18
5.3	Stickstoffverbindungen	20
5.4	Schadstoffe im Niederschlag	21
5.5	Weitere gasförmige Luftschadstoffe	22
5.6	Treibhausgase	23
6	**Ausblick**	**26**
Anhang		**28**

Abstracts

This report analyses the state of air quality and the extent of air pollution in Switzerland on the basis of data collected by the National Air Pollution Monitoring Network (NABEL) and by cantonal monitoring networks. In 2021, the ambient air quality standards for ozone were exceeded at all stations, those for particulate matter (PM10 and PM2.5) were partially exceeded south of the Alps. All other air quality standards were met at all NABEL stations. Air pollution concentration trends over the last 30 years show that the air quality in Switzerland has significantly improved.

Keywords:
air pollution control, air quality measurements, air pollutants and temporal evolution, assessment of air quality

Der Bericht dokumentiert anhand von Messresultaten des Nationalen Beobachtungsnetzes für Luftfremdstoffe (NABEL) und kantonaler Messungen den Zustand der Luft in der Schweiz. Für Ozon wurden im Jahr 2021 an allen NABEL-Stationen die Grenzwerte überschritten, auf der Alpensüdseite teilweise auch diejenigen für lungengängigen Feinstaub (PM10 und PM2.5). An allen NABEL-Stationen wurden die Grenzwerte für weitere Luftschadstoffe eingehalten. Die Entwicklung der Schadstoffkonzentrationen in den letzten 30 Jahren zeigt eine deutliche Verbesserung der Luftqualität in der Schweiz.

Stichwörter:
Luftreinhaltung, Immissionsmessungen, Luftschadstoffe und zeitliche Entwicklung, Beurteilung der Luftqualität

Le présent rapport analyse l'état de l'air en Suisse, sur la base des mesures des polluants atmosphériques enregistrées par les stations du réseau NABEL ainsi que des mesures cantonales. Pour 2021, les valeurs limites d'immission pour l'ozone ont été dépassées dans toutes les stations NABEL, celles des poussières fines partiellement dans le sud des Alpes. Les autres valeurs limites d'immission ont été respectées dans toutes les stations NABEL. L'évolution des concentrations de polluants au cours des 30 dernières années montre une nette amélioration de la qualité de l'air en Suisse.

Mots-clés :
protection de l'air, mesures des immissions, polluants atmosphériques et évolution temporelle, appréciation de la qualité de l'air

Il presente rapporto documenta lo stato dell'aria in Svizzera sulla base dei risultati di misurazioni effettuate dalla Rete nazionale d'osservazione degli inquinanti atmosferici (NABEL) e dai Cantoni. Per quanto concerne gli inquinanti atmosferici, nel 2021 i valori limite d'immissione per l'ozono sono stati superati presso tutte le stazioni NABEL, mentre quelli per le polveri fini (PM10 e PM2.5) sono stati superati in parte a sud delle Alpi. Presso le stazioni NABEL, gli altri valori limite d'immissione sono stati rispettati. L'evoluzione delle concentrazioni di inquinanti negli ultimi 30 anni mostra un netto miglioramento della qualità dell'aria in Svizzera.

Parole chiave:
lotta contro l'inquinamento atmosferico, misurazione delle immissioni, inquinati atmosferici e evoluzione temporale, valutazione della qualità dell'aria

Vorwort

Im Rückblick auf die letzten zwei Jahrzehnte kann festgestellt werden, dass die Qualität unserer Luft in dieser Zeitspanne nochmals deutlich besser geworden ist. Der erfreuliche Trend, der Mitte der 1980er-Jahre begonnen hat, hat sich fortgesetzt. Die Messungen des Nationalen Beobachtungsnetzes für Luftfremdstoffe (NABEL) belegen damit den Erfolg der bisherigen Luftreinhalte-Politik von Bund, Kantonen und Gemeinden. Die Mehrzahl der Grenzwerte zum Schutz der Gesundheit und der Umwelt werden heute eingehalten.

Trotzdem ist das gesetzlich verankerte Ziel einer sauberen Luft noch nicht erreicht. Es ist dabei an die gesundheitlichen Risiken durch die Belastung mit Ozon, Feinstaub, Stickstoffdioxid und kanzerogenen Luftschadstoffen, aber auch an die zu hohen Stickstoffeinträge in empfindliche Ökosysteme zu denken. Die im Jahr 2021 veröffentlichten Luftqualitätsrichtlinien der Weltgesundheitsorganisation zeigen, dass auch bei Belastungen unterhalb der aktuell in der Schweiz gültigen Immissionsgrenzwerte nachteilige Wirkungen auf die Gesundheit eintreten können.

Die Fortführung einer konsequenten Luftreinhalte-Politik mit Massnahmen zur Verminderung des Schadstoffausstosses (insbesondere von Ammoniak, Stickoxiden, flüchtigen organischen Verbindungen, lungengängigem Feinstaub sowie krebserregenden Stoffen) ist unabdingbar – zum Wohl unserer Gesundheit und Umwelt. Die Schweiz hat mit dem gesetzlich verankerten Vorsorgeprinzip in vorausschauender Weise ein Instrument geschaffen, welches erlaubt, aus technischen Fortschritten systematisch Nutzen zur Verbesserung der Luftqualität zu ziehen.

Denn schliesslich geht es um unser wichtigstes Lebensmittel: die Luft. Ein Mensch atmet pro Tag nämlich etwa 15 000 Liter oder umgerechnet gut 15 Kilogramm Luft ein. Grund genug, sich auch in Zukunft für eine saubere und gesunde Luft einzusetzen.

Martin Schiess
Leiter der Abteilung Luftreinhaltung und Chemikalien
Bundesamt für Umwelt (BAFU)

1 Luftbelastung in der Schweiz 2021

Die Luftqualität in der Schweiz wird durch lufthygienische Messungen des Bundes, der Kantone und einiger Städte ermittelt. Die Daten all dieser Messstationen können zur Beurteilung der Luftqualität herangezogen werden um einen gesamtschweizerischen Überblick zu erhalten.

1.1 Vergleich mit Immissionsgrenzwerten

Die Luftqualität in der Schweiz wird anhand der Immissionsgrenzwerte der Luftreinhalte-Verordnung beurteilt. Abb. 1 zeigt die Schadstoffkonzentrationen, wie sie an den Schweizer Messstationen von Bund, Kantonen und Städten gemessen wurden, im Vergleich zu den Immissionsgrenzwerten.

Beim Stickstoffdioxid wurde nur an verkehrsnahen Standorten der Jahresmittelgrenzwert überschritten und es trat nur eine Überschreitung des Tagesmittelgrenzwertes auf.

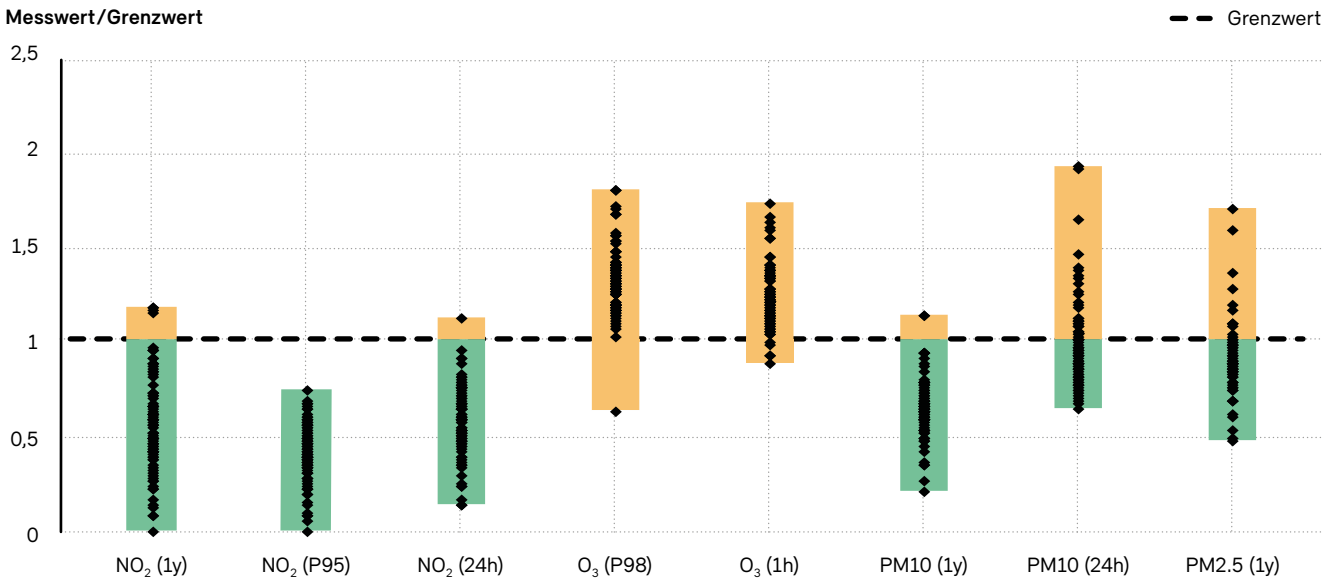
Beim Feinstaub PM10 hingegen wurde der Tagesmittelgrenzwert an vielen Standorten mehr als die erlaubten dreimal überschritten, wobei häufige Saharastaubereignisse dazu beitrugen. Der Jahresmittelwert für PM10 wurde an den meisten Standorten eingehalten, während er für PM2.5 an vielen Standorten überschritten wurde.

Die Grenzwerte für Ozon wurden an fast allen Standorten überschritten.

Die Immissionsgrenzwerte für die Jahresmittel von Schwefeldioxid, Staubniederschlag, Schwermetallen im Feinstaub und Schwermetalldeposition sowie auch für das Tagesmittel von Kohlenmonoxid wurden fast überall in der Schweiz eingehalten oder sogar deutlich unterschritten.

Abb. 1: Vergleich der gemessenen Luftbelastung mit den Immissionsgrenzwerten für das Jahr 2021

Quotient aus der im Jahr 2021 gemessenen Konzentration und dem jeweiligen Immissionsgrenzwert für Luftschadstoffe. Verwendet wurden Daten der Messstationen von Bund, Kantonen und Städten. Bei Tagesmittel- und Stundenmittelgrenzwerten ist eine Überschreitung (beim PM10 drei Überschreitungen) pro Jahr erlaubt. Deshalb wurde der zweithöchste, bzw. der vierthöchste Messwert zum Vergleich mit dem Grenzwert benutzt. Schadstoffe: Stickstoffdioxid (NO_2), Ozon (O_3), Feinstaub (PM10 und PM2.5). Kenngrössen: Perzentilwerte der Halbstundenmittel (P95, P98), Stundenmittel (1 h), Tagesmittel (24 h) und Jahresmittelwerte (1 y).



1.2 Räumliche Verteilung der Luftbelastung

Aus den gemessenen Schadstoffkonzentrationen und aus modellierten Schadstoffkarten kann die räumliche Verteilung der Luftschadstoffe interpoliert werden.

Stickstoffdioxid
Abb. 2 zeigt die räumliche Verteilung der Jahresmittel 2021 von Stickstoffdioxid. Die Grenzwerte für den Schadstoff Stickstoffdioxid wurden in den städtischen und vorstädtischen Gebieten nur noch an Hauptverkehrsstrassen überschritten. Abseits der Hauptverkehrsstrassen lagen die Konzentrationen von Stickstoffdioxid in der Regel unter dem Grenzwert. Im ländlichen Raum wurden die Immissionsgrenzwerte für Stickstoffdioxid, mit Ausnahme von Korridoren entlang der Autobahnen, eingehalten. Wegen der Mittelung über einzelne Zellen des Modellgitters können Spitzenwerte nahe bei Emissionsquellen, wie stark befahrenen Strassen, nicht adäquat dargestellt werden.

Feinstaub
Abb. 3 zeigt die räumliche Verteilung der Jahresmittel 2021 von Feinstaub (PM2.5). Die Konzentration von lungengängigem Feinstaub lag in den Städten gebietsweise über dem Immissionsgrenzwert und auf dem Land darunter. Die höchsten Konzentrationen wurden im Tessin gemessen. Der Stadt-Land-Gegensatz ist beim PM2.5 weniger stark ausgeprägt als beim Stickstoffdioxid. Zwei Ursachen sind dafür verantwortlich. Erstens besteht mehr als die Hälfte der PM2.5-Belastung aus sekundär gebildeten Feinstaubpartikeln (sekundären Aerosolen), die erst abseits der Quellen aus Vorläuferschadstoffen in der Atmosphäre gebildet werden, was zu einer homogenen räumlichen Verteilung führt. Solche sekundären Komponenten sind: Sulfat aus Schwefeldioxid, Nitrat aus Stickoxiden, Ammonium aus Ammoniak und organische Feinstaubkomponenten aus flüchtigen organischen Verbindungen. Als zweite Ursache ist der grossräumige Transport von Feinstaub zu nennen.

Ozon
Die Belastung durch den Schadstoff Ozon lag im Jahr 2021 während Sommersmoglagen in der ganzen Schweiz flächendeckend und zum Teil erheblich über den Grenzwerten. Für die Beurteilung der Ozonbelastung dient auch der 98-Perzentilwert der Halbstundenmittelwerte des ozonreichsten Sommermonats, für welchen ein Grenzwert von 100 µg/m^3 festgelegt ist. Er gibt an, welcher Ozonwert während 15 Stunden eines Monats überschritten wird. Dieser Grenzwert wurde im überwiegenden Teil der Schweiz deutlich überschritten. Entlang von Strassen wurden zum Teil niedrigere Ozonwerte gemessen, da das hier emittierte Stickstoffmonoxid das Ozon abbaut und dabei in Stickstoffdioxid umgewandelt wird. Die Stadtzentrums-Stationen mit den niedrigsten Ozonwerten sind aus diesem Grund gleichzeitig diejenigen Stationen mit den höchsten Stickstoffdioxidkonzentrationen.

Stickstoffverbindungen
Neben den Immissionsgrenzwerten der Luftreinhalte-Verordnung müssen in der Schweiz auch die kritischen Eintragsraten (Critical Loads) von Stickstoff in empfindliche Ökosysteme eingehalten werden. Die Parteien zur Genfer Konvention über die weiträumige grenzüberschreitende Luftverunreinigung der UNECE (United Nations Economic Commission for Europe) haben solche Critical Loads festgelegt, um Versauerung und Eutrophierung zu vermeiden. Um die Stickstoffeinträge zu bestimmen, werden Ammoniak und weitere Stickstoffverbindungen gemessen und die Stickstoffdeposition modelliert. Für einen Grossteil der naturnahen Ökosysteme in der Schweiz ist der Stickstoffeintrag weiterhin zu hoch. Dadurch wird die Biodiversität in diesen Gebieten gefährdet.

Abb. 2: Karte der Jahresmittel von Stickstoffdioxid für das Jahr 2021 (Grenzwert 30 µg/m³)

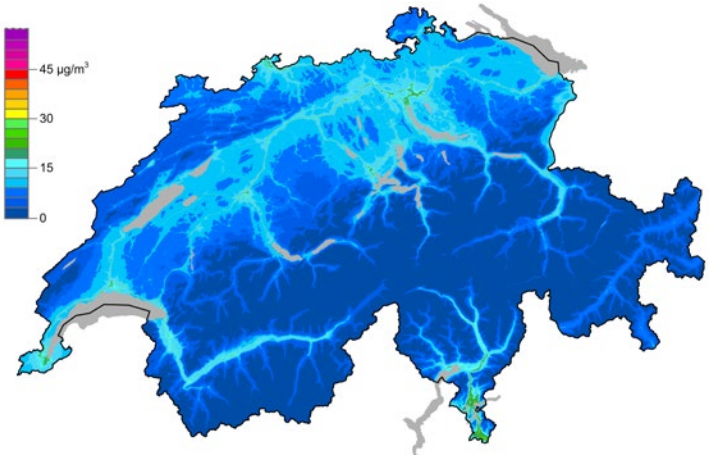
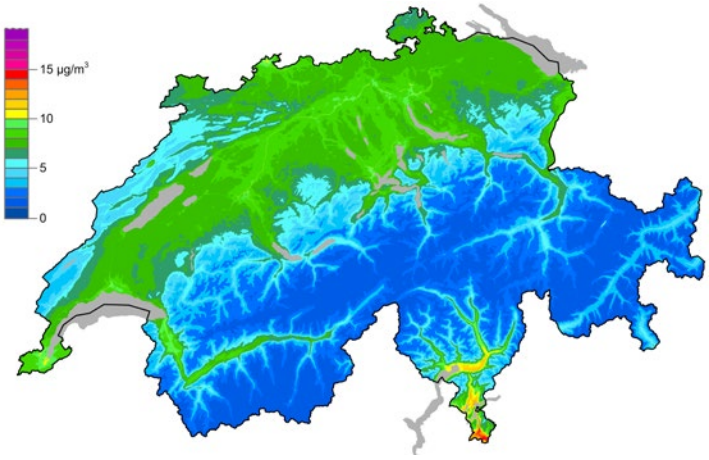


Abb. 3: Karte der Jahresmittel von Feinstaub (PM2.5) für das Jahr 2021 (Grenzwert 10 µg/m³)



2 Luftbelastung an den NABEL-Stationen 2021

Das Nationale Beobachtungsnetz für Luftfremdstoffe (NABEL) misst die Luftverschmutzung an 16 Standorten in der Schweiz. Die Stationen messen die Belastung an typischen Standorten wie Strassen im Stadtzentrum, Wohngebiet oder ländlichen Gebieten. Eine detailliertere Beschreibung der NABEL-Stationen findet sich im Anhang.

2.1 Vergleich mit Immissionsgrenzwerten

Ein Vergleich ausgewählter NABEL-Messwerte des Jahres 2021 mit den Immissionsgrenzwerten der Luftreinhalte-Verordnung ist in Tabelle 1 dargestellt. Wie bei der Zusammenstellung aller Schweizer Messstationen sind auch an den NABEL-Stationen die Grenzwertüberschreitungen von Ozon und Feinstaub ersichtlich. Keine der NABEL-Stationen ist in unmittelbarer Nähe einer grossen Industrieanlage platziert, sodass keine hohen Belastungen durch Schwefeldioxid oder Schwermetalle gemessen werden, wie sie an einzelnen kantonalen Messstationen gefunden werden.

An allen Stationen des NABEL wurden die Ozongrenzwerte überschritten, wobei die höchsten Ozonbelastungen im Tessin, an den Stationen Lugano und Magadino, gemessen wurden. Im Tessin wurde auch der höchste Stundenmittelwert von 191 µg/m^3 registriert, während auf der Alpennordseite der Spitzenwert bei 174 µg/m^3 lag. Der Jahresmittelgrenzwert für PM2.5 wurde an zwei Standorten des NABEL überschritten. Der Tagesmittelgrenzwert für PM10 wurde an acht NABEL-Standorten überschritten, wobei häufige Saharastaubereignisse dazu beitrugen. Die übrigen Grenzwerte der Luftreinhalte-Verordnung für weitere Schadstoffe wurden an allen NABEL Stationen eingehalten. So lagen die gemessenen Werte von Schwefeldioxid, Kohlenmonoxid und Schwermetallen deutlich unter den Immissionsgrenzwerten.

Tab. 1: Messwerte an den NABEL-Stationen für das Jahr 2021

Schadstoffe: Schwefeldioxid (SO_2), Stickstoffdioxid (NO_2), Ozon (O_3), Feinstaub (PM10 und PM2.5).

Statistische Kenngrössen: Jahresmittelwert (JMW), Anzahl Tagesmittel über dem Immissionsgrenzwert (d > IGW), Anzahl Stundenmittel über dem Immissionsgrenzwert (h > IGW), maximales monatliches 98-Perzentil der Halbstundenmittel (P98).

Fett markiert sind Überschreitungen der Immissionsgrenzwerte.

Standorttyp	Station	SO_2 JMW µg/m³	NO_2 JMW µg/m³	NO_2 d>IGW	O_3 P98 µg/m³	O_3 h>IGW	PM10 JMW µg/m³	PM10 d>IGW	PM2.5 JMW µg/m³
Städtisch, verkehrsbelastet	BER	–	28	0	**120**	**23**	18	**4**	9,9
	LAU	–	26	0	**114**	**11**	14	**4**	9,1
Städtisch	LUG	1,7	22	0	**168**	**462**	16	**5**	**11,0**
	ZUE	0,6	21	0	**139**	**140**	13	3	9,0
Vorstädtisch	BAS	0,7	15	0	**146**	**134**	12	3	8,9
	DUE	0,4	19	0	**140**	**128**	13	3	8,6
Ländlich, Autobahn	HAE	0,5	26	0	**129**	**81**	14	3	9,3
	SIO	–	26	1	**118**	**18**	16	3	8,0
Ländlich, unterhalb 1000 m	MAG	1,2	14	0	**156**	**274**	16	**5**	**10,4**
	PAY	0,3	9,5	0	**135**	**114**	11	3	7,7
	TAE	–	9,2	0	**139**	**125**	11	3	7,6
	BRM	–	7,0	0	**148**	**224**	9,8	3	–
Ländlich, oberhalb 1000 m	CHA	–	4,0	0	**142**	**255**	7,1	**4**	–
	RIG	0,21	4,5	0	**148**	**186**	7,6	**5**	4,9
	DAV	–	2,7	0	**109**	0	5,5	**5**	–
Hochgebirge[1]	JUN	0,10	0,17	0	**104**	0	4,3	**4**	–
Immissionsgrenzwert		***30***	***30***	***1***	***100***	***1***	***20***	***3***	***10***

1 unvollständige Messreihe (im Mai mussten die Messungen wegen umfangreichen Renovationsarbeiten an der Messstation eingestellt werden)

3 Besonderheiten 2021

Die Messungen der Luftschadstoffe können durch kurzfristige lokale Emissionen stark beeinflusst werden oder auch durch spezielle meteorologische Situationen.

Gleissende Lichtfunken und farbige Sterne erhellen die Silvesternacht. Zur Feier des neuen Jahres werden Raketen, Vulkane, Kracher und viele andere Feuerwerkskörper abgebrannt. Dies hat sich zum Jahreswechsel 2021/2022 insbesondere in der Region Zürich in stark erhöhten Feinstaubwerten geäussert. An der NABEL-Station Dübendorf wurden kurzzeitig Werte von 300 Mikrogramm pro Kubikmeter Luft gemessen (Abb. 4). Erhöhte Feinstaubwerte wurden bis zum Vormittag des 2. Januar 2022 beobachtet. In anderen Regionen war der Einfluss von Feuerwerk weniger ausgeprägt.

Parallel zum Anstieg der Feinstaubwerte erhöhen sich auch die Konzentrationen vieler Elemente, von denen bekannt ist, dass sie in Feuerwerkskörpern enthalten sind. Dies dokumentiert ein vorübergehend in Dübendorf eingesetztes Messgerät, das die Konzentration von Metallen und andern Elementen in Stundenauflösung messen kann (Abb. 5). Gegen Mitternacht steigen die in Schwarzpulver enthaltenen Elemente Kalium (K) und Schwefel (S) stark an, ebenso das Element Chlor (Cl), welches aus den als Oxidationsmittel eingesetzten Perchloraten stammt. Aluminium (Al) und Titan (Ti) als Brennstoffe führen zu silberhell leuchtenden Funken. Auch Metalle, die für die Farben verantwortlich sind, finden sich in der Luft: Barium (Ba) für grüne Lichteffekte, Strontium (Sr) für rote und Kupfer (Cu) für blaue.

Die Verhältnisse dieser Elemente zueinander entsprechend der Grössenordnung, wie sie aus den Gehalten von Feuerwerk bekannt sind. Bei den besonders bedenklichen Metallen Quecksilber, Cadmium und Blei ist kein Anstieg erkennbar. Selbst die höchsten Stundenmittel für Arsen und Nickel liegen im Bereich des Zielwertes der EU, der für das Jahresmittel gilt, oder darunter. Für die Schweiz existieren keine diesbezüglichen Grenzwerte.

Mit den Feuerwerksaktivitäten stiegen an Neujahr 2022 die Feinstaubkonzentrationen von PM10 an einigen Messstationen in der Schweiz auf über 50 Mikrogramm pro Kubikmeter Luft an (Abb. 6). Dieser Wert darf höchstens

Abb. 4: Verlauf der Feinstaubwerte über den Jahreswechsel an drei NABEL-Stationen

Dargestellt sind die 10-min-Mittelwerte von PM10 in Mikrogramm pro Kubikmeter Luft vom Silvester 2021, bis zum 2. Januar 2022 für die NABEL-Stationen Basel-Binningen, Dübendorf-Empa und Lausanne-César-Roux.

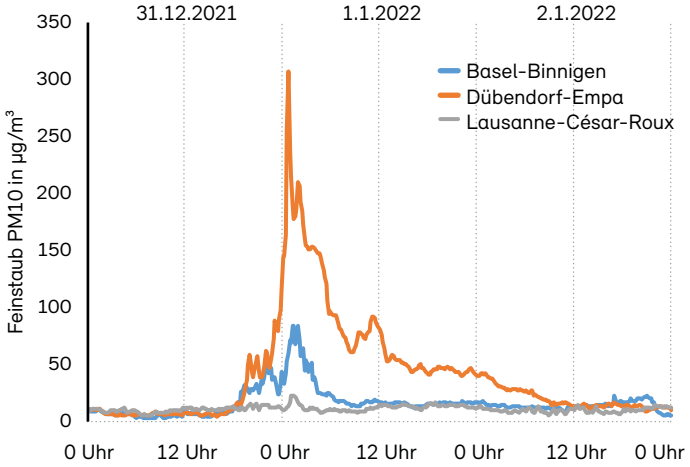
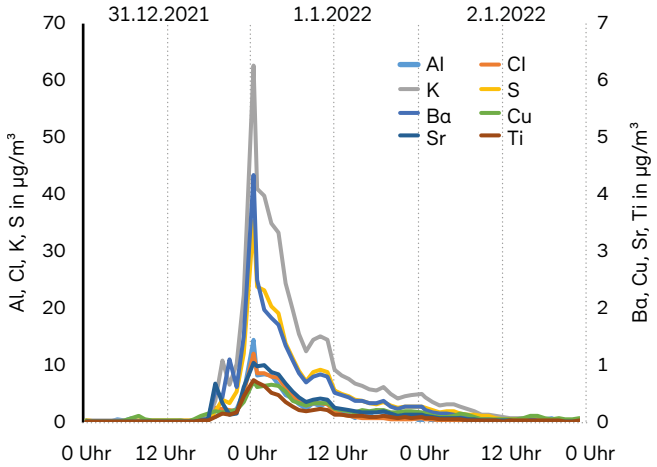


Abb. 5: Konzentrationsverlauf typischer Feuerwerkselemente über den Jahreswechsel 2021-2022 an der NABEL-Station Dübendorf

Dargestellt sind die 1-h-Mittelwerte der Elemente Aluminium (Al), Chlor (Cl), Kalium (K) und Schwefel (S) auf der linken Achse und von Barium (Ba), Kupfer (Cu), Strontium (Sr) und Titan (Ti) auf der rechten Achse in Mikrogramm pro Kubikmeter Luft.



an drei Tagen pro Jahr überschritten werden. Zu den hohen Werten dürfte auch eine starke winterliche Inversion beigetragen haben. 2021 lagen die Feinstaubwerte an Neujahr auf tiefem Niveau, es wurden schweizweit keine Tagesmittelwerte über 50 Mikrogramm pro Kubikmeter Luft registriert. Typischerweise beeinflussen die «Feuerwerkstage» in der Schweiz die PM10-Feinstaubbelastung im Jahresmittel um ca. 1–2 % bezogen auf den Immissionsgrenzwert von 20 Mikrogramm pro Kubikmeter Luft.

Abb. 6: Feinstaubbelastung (Tagesmittelwert) an Neujahr 2022

Dargestellt sind die 24-Stunden-Mittelwerte, wie sie durch räumliche Interpolation der Messwerte des NABEL, der kantonalen und städtischen Messstationen für die Schweiz modelliert wurden.

4 Entwicklung und Auswirkungen

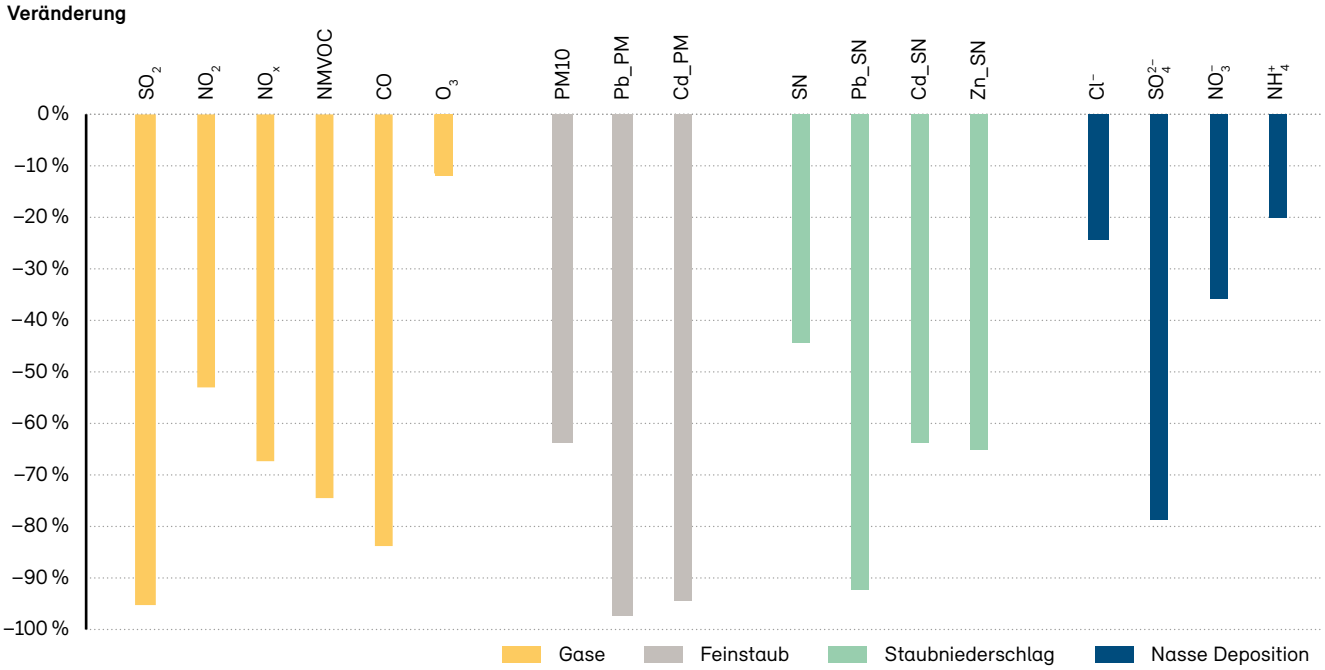
An den Messstationen des NABEL wird seit mehreren Jahrzehnten die Belastung durch Luftschadstoffe verfolgt. Für die meisten Schadstoffe konnte eine deutliche Abnahme der Belastung beobachtet werden. Da Luftschadstoffe die Gesundheit des Menschen, aber auch die Vegetation und Materialien schädigen können, ist die Verbesserung der Luftqualität äusserst positiv zu werten.

4.1 Entwicklung der Luftbelastung

Eine Übersicht über die mittlere Veränderung der Luftbelastung an den NABEL-Stationen seit dem Jahr 1988 gibt Abb. 7. Bei allen Schadstoffen ist eine Abnahme der Luftbelastung sichtbar. Bei den direkt emittierten Gasen wie Schwefeldioxid, Stickoxiden, flüchtigen organischen Verbindungen und Kohlenmonoxid ist eine markante Abnahme der Konzentrationen über die letzten Jahrzehnte sichtbar. In der Atmosphäre durch chemische Prozesse gebildete Substanzen wie Stickstoffdioxid und Ozon haben weniger stark abgenommen als ihre Vorläufersubstanzen. Dies kann durch die komplexen Zusammenhänge der Atmosphärenchemie erklärt werden. Bei Ozon sind zwar die allerhöchsten Werte zurückgegangen, nicht aber die mittlere Belastung. Wie Abb. 7 zeigt, haben die Konzentrationen von Feinstaub und darin enthaltenen Schwermetallen seit Ende der 1980er-Jahre ebenfalls deutlich abgenommen. Heute ist rund fünfzigmal weniger Blei im Feinstaub enthalten als vor dreissig Jahren. Die Deposition von Staub und die Deposition von Schwermetallen sind ebenfalls rückläufig. Der Sulfatgehalt im Niederschlag ging ebenfalls deutlich zurück, während die Abnahme der reaktiven Stickstoffverbindungen Nitrat und Ammonium deutlich geringer war.

Abb. 7: Veränderung der Luftbelastung von 1988 bis 2021

Die Messdaten der NABEL-Stationen (ohne Davos und Jungfraujoch) mit durchgehenden Messreihen wurden gemittelt und die Abnahme durch Anpassen eines exponentiellen Modells bestimmt. Schadstoffe: Schwefeldioxid (SO_2), Kohlenmonoxid (CO), Stickstoffdioxid (NO_2), Stickoxide (NO_x), flüchtige organische Verbindungen ohne Methan (NMVOC), Kohlenmonoxid (CO), Ozon (O_3), Feinstaub (PM10), Blei im PM10 (Pb_PM), Cadmium im PM10 (Cd_PM), Staubniederschlag (SN), Blei im SN (Pb_SN), Cadmium im SN (Cd_SN), Chlorid im Niederschlag (Cl^-), Sulfat im Niederschlag (SO_4^{2-}), Nitrat (NO_3^-) im Niederschlag, Ammonium im Niederschlag (NH_4^+).



4.2 Auswirkung der Luftbelastung

Die Luftverschmutzung ist eine nachweisliche Ursache für Krankheiten und vorzeitige Todesfälle. Luftschadstoffe können beim Menschen auch bei den in der Schweiz auftretenden Konzentrationen gesundheitsschädigende Wirkungen hervorrufen. Je nach Schadstoff sind einzelne Organe stärker betroffen. Erhöhte Schadstoffbelastungen bewirken eine Verkürzung der Lebenserwartung aufgrund von Herz-Kreislauf- und Atemwegserkrankungen einschliesslich Lungenkrebs. Erfreulicherweise schätzen Studien aus den USA, dass die Reduktion der Feinstaubbelastung in den 80er- und 90er-Jahren zu rund 15 % der dort beobachteten Erhöhung der Lebenserwartung beigetragen hat.

Feinstaub wirkt sich direkt auf die Atemwege aus. Feinstaubpartikel mit einem Durchmesser von 10 µm gelangen bis in die Bronchien, feinere Partikel bis in die tiefsten Atemwege, die Alveolen. Dort können die Schadstoffe entzündliche Reaktionen hervorrufen, die sich durch Husten und Auswurf äussern. Wissenschaftliche Studien zeigen zudem, dass Feinstaub ein wichtiger Risikofaktor für kardiovaskuläre Erkrankungen ist.

Stickstoffdioxid führt zu Entzündungserscheinungen in den Atemwegen und verstärkt die Reizwirkung von Allergenen. Nimmt die Stickstoffdioxid-Belastung der Aussenluft kurzfristig zu, werden in dieser Zeit die Sterbefälle und Spitaleintritte wegen Atemwegserkrankungen häufiger und es treten mehr Herzrhythmusstörungen auf.

Beim Ozon stehen akute Wirkungen im Vordergrund. Es sind dies – je nach Konzentration und Dauer der Belastung – Reizungen von Augen, Nase, Hals und tieferen Atemwegen, Enge und Druck auf der Brust sowie Husten. Ferner werden die Lungenfunktion und die körperliche Leistungsfähigkeit herabgesetzt und die Sterblichkeitsrate steigt.

Russ, Benzol, polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) sowie Cadmium, Blei und Asbest zählen zu den krebserregenden Luftschadstoffen. Diese sind für den Menschen bereits in kleinsten Mengen schädlich – eine unschädliche Schwellenkonzentration gibt es nicht. In Städten und Ballungsgebieten tragen Dieselrusspartikel am meisten zum luftschadstoffbedingten Krebsrisiko bei.

Die schweizerischen Studien SAPALDIA und SCARPOL haben gezeigt, dass sich die Gesundheit von Erwachsenen und Kindern rasch verbessert, wenn der Schadstoffgehalt der Luft abnimmt. Massnahmen zur Verbesserung der Luftqualität haben also einen messbaren positiven Einfluss auf die Gesundheit der Bevölkerung.

Zusätzlich trägt die Luftverschmutzung zur Schwächung und zur Destabilisierung empfindlicher Ökosysteme bei. Die sommerliche Ozonbelastung führt periodisch zu sichtbaren Schäden an den Blättern von Laubbäumen, Sträuchern und Kulturpflanzen und kann das Wachstum und die Vitalität empfindlicher Pflanzenarten beeinträchtigen. Gemäss einer Studie der Agroscope liegen die durchschnittlichen Ernteausfälle für Weizen in der Schweiz bei rund 3 %, können aber je nach Standort und Jahr auch mehr als 10 % betragen. Stickstoffhaltige Luftschadstoffe (Stickoxide und Ammoniak) bewirken eine erhöhte Stickstoffdeposition, die zur Überdüngung empfindlicher Ökosysteme und der Bodenversauerung beiträgt. Dies beeinträchtigt den Nährstoffhaushalt und das Wachstum von Pflanzen und führt zu einer Verarmung der Artenvielfalt. In ursprünglich nährstoffarmen Ökosystemen wie z. B. artenreiche Naturwiesen und Trockenrasen, alpine Heiden sowie Hoch- und Flachmoore führt die hohe Stickstoffverfügbarkeit zur Verdrängung von typischen Pflanzenarten.

Gebäudeschäden werden vor allem durch Säuren (gebildet aus Schwefeldioxid und Stickstoffdioxid) verursacht. Russ führt zu einer Verschmutzung von Oberflächen. Diese Schadstoffe haben in der Schweiz in den letzten Jahrzehnten stark abgenommen. Organische Materialien wie Farbstoffe, Lacke, Gummi, Kunststoffe oder Textilfasern können durch Photooxidantien wie Ozon angegriffen und ausgebleicht werden. Durch die Luftverschmutzung können auch Kulturdenkmäler beschädigt werden.

5 Luftschadstoffe

5.1 Feinstaub und seine Zusammensetzung

Feinstaub: PM10 und PM2.5
Partikelförmige Schadstoffe in der Atmosphäre kommen in sehr unterschiedlicher Grösse vor. TSP bezeichnet den gesamten luftgetragenen Staub, PM10 die Partikel kleiner als 10 Mikrometer und PM2.5 die Partikel kleiner als 2,5 Mikrometer. Aus lufthygienischer Sicht interessiert insbesondere der lungengängige Feinstaub, daneben wird aber auch der grobkörnige Sedimentstaub als Staubniederschlag gemessen. Die Zusammensetzung der Stäube ist sehr variabel. Sie können zahlreiche anorganische (z. B. Schwermetalle, Sulfat, Nitrat) und organische Verbindungen (z. B. polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe) enthalten. Zu den Stäuben zählen auch Russpartikel, die vorwiegend aus Kohlenstoff bestehen.

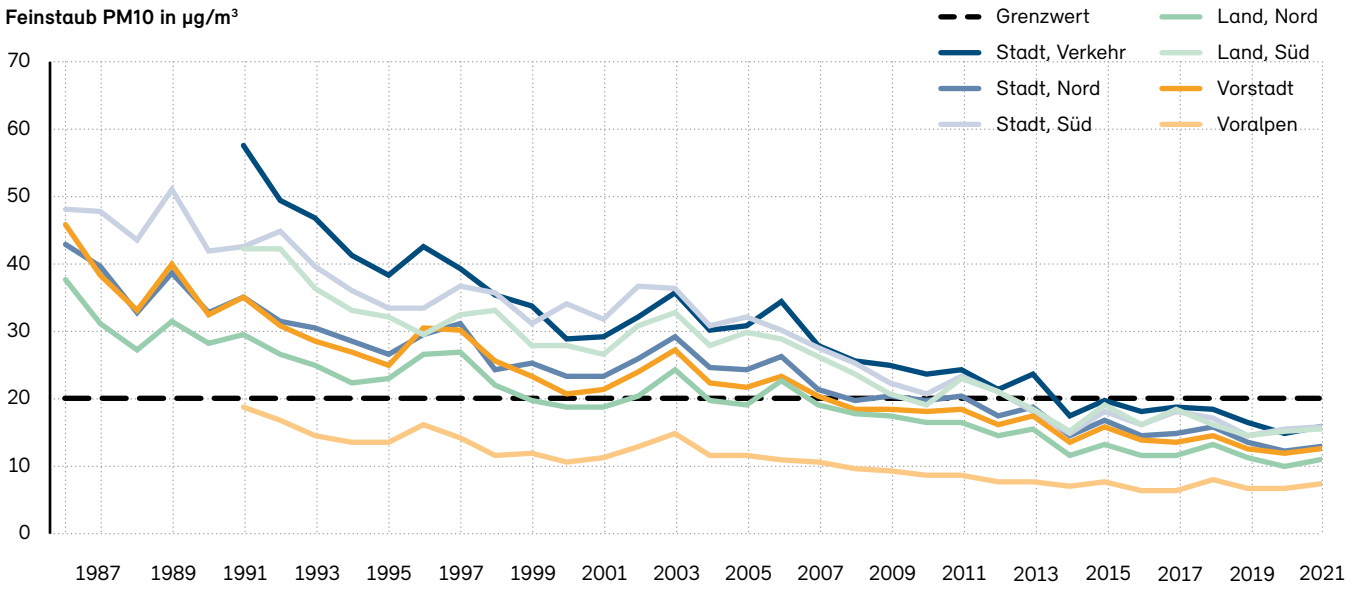
Feine schwebefähige Staubpartikel, einschliesslich des lungengängigen Anteils, werden als Feinstaub (PM10) gemessen. Feinstaub besteht aus primären, direkt als Teilchen emittierten Anteilen und aus sekundären Bestandteilen, welche sich erst in der Luft durch chemische und physikalische Prozesse aus gasförmigen Vorläufersubstanzen bilden.

In der Abb. 8 sind die PM10-Jahresmittelwerte dargestellt. Seit 1991 ist die PM10-Belastung zurückgegangen. Dieser Rückgang ist einerseits auf die Reduktion der sekundären Partikel (insbesondere Sulfat) und andererseits auf die Reduktion der primären Partikelemissionen zurückzuführen. In einzelnen Jahren, wie 2003 und 2006, führten häufige Inversionslagen auf der Alpennordseite zu einer erhöhten PM10-Belastung im Winter.

In Abb. 9 sind die PM2.5-Jahresmittelwerte dargestellt. Seit 1998 hat die Belastung durch PM2.5 um etwa 50 % abgenommen und liegt heute auf der Alpennordseite unter 10 µg/m³. Abb. 10 zeigt den Anteil von PM2.5 am PM10. An den meisten Standorten liegt dieser bei rund 70 %. In städtischen Strassenschluchten mit hohem Verkehrsaufkommen ist der PM2.5 Anteil geringer, da dort viele gröbere Partikel aus Abrieb und Aufwirbelung zur Feinstaubbelastung beitragen, ebenso im trockenen Wallis, wo der Anteil von grobem Mineralstaub erhöht ist.

Abb. 8: Jahresmittel von Feinstaub (PM10)

Die an den einzelnen Stationen des NABEL gemessenen Konzentrationen sind in Gruppen mit ähnlicher Luftbelastung zusammengefasst. Die Werte vor 1997 wurden aus TSP-Messungen berechnet.



Bestandteile von PM10

Feinstaub, wie er in der Aussenluft über der Schweiz gemessen wird, besteht aus einer Vielzahl unterschiedlicher chemischer Komponenten. Als besonders gefährlich für die menschliche Gesundheit eingestuft werden unter anderem Schwermetalle, Russ und gewisse polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe wie das Benzo(a)-pyren.

Russ

Abb. 11 zeigt eine sehr deutliche Abnahme der Russbelastung über die letzten Jahre. Entlang von stark befahrenen Strassen ist die Russbelastung deutlich grösser als im städtischen oder vorstädtischen Hintergrund. Dort bildet der Russ auch einen grösseren Anteil (über 6 %) an der Massenkonzentration PM2.5 als an den anderen Standorten, wo der Anteil rund 5 % beträgt.

Abb. 9: Jahresmittel von Feinstaub (PM2.5)

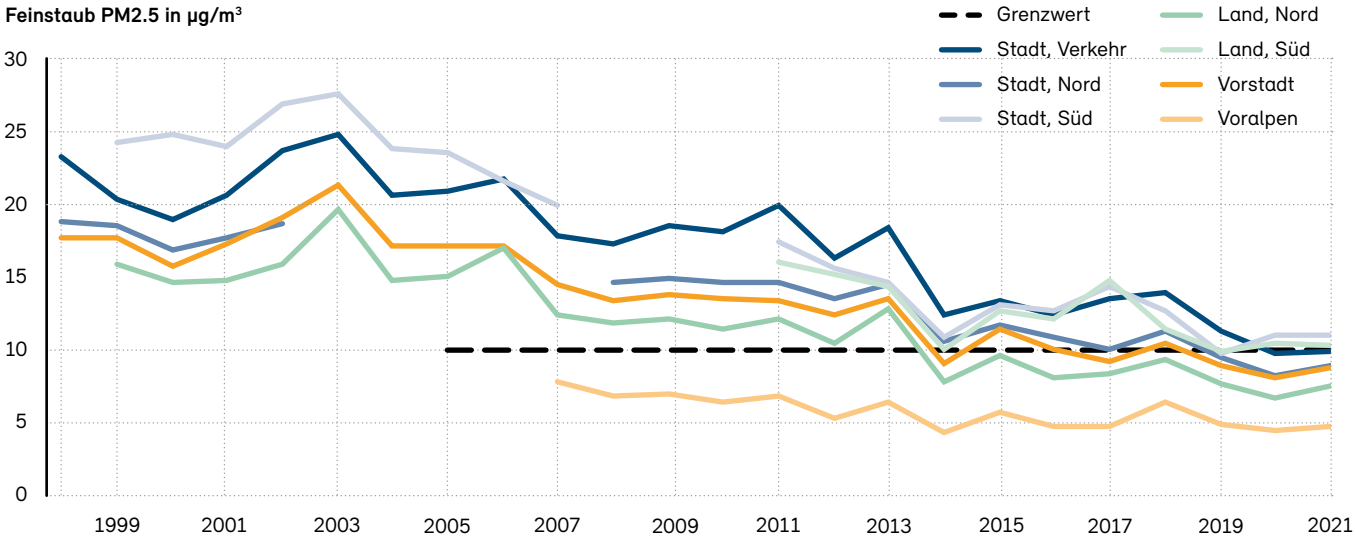
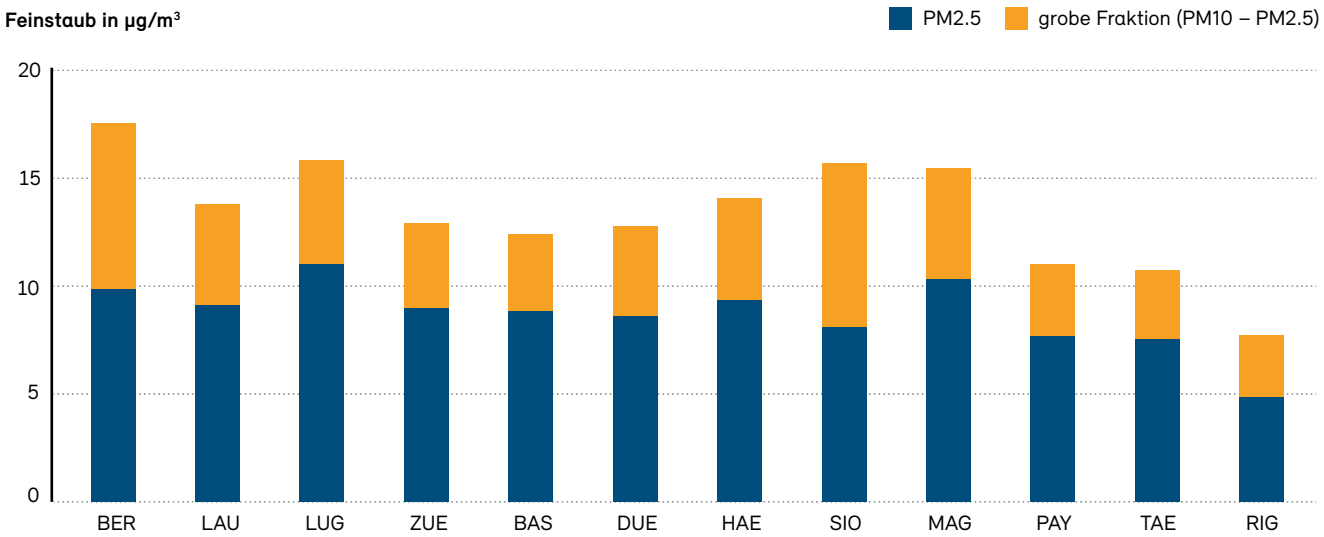


Abb. 10: Konzentrationen von PM2.5 und grober Fraktion im Jahr 2021

An zwölf NABEL-Stationen wird auch die Feinstaubfraktion PM2.5 gemessen. Weitere Angaben zu den einzelnen Stationen finden sich in Tabelle 2 im Anhang.



Benzo(a)pyren
Im NABEL-Messnetz hat die Konzentration von Benzo(a)-pyren seit Messbeginn im Jahr 2006 abgenommen. An allen untersuchten NABEL-Standorten lag die Belastung in den letzten Jahren unter dem europäischen Zielwert von 1 ng/m³. Die höchsten Konzentrationen von Benzo(a)-pyren wurden im ländlichen Gebiet der Alpensüdseite in Magadino-Cadenazzo mit 0,48 ng/m³ gemessen. Höhere Konzentrationen wurden an kantonalen Messstationen in Dörfern mit vielen Holzheizungen gemessen.

Schwermetallgehalt
Der Schwermetallgehalt im Feinstaub PM10 lag an allen NABEL-Standorten unter dem Immissionsgrenzwert. Ebenso sind die Immissionsgrenzwerte für die Gesamtdeposition der Schwermetalle an NABEL-Standorten seit Jahren eingehalten.

Ultrafeine Partikel
Eingeatmete ultrafeine Partikel (kleiner als 0,1 Mikrometer) können bis in das Lungengewebe eindringen, die Luft-Blut-Schranke überqueren, in den Blutkreislauf gelangen und Entzündungsreaktionen auslösen. An ausgewählten NABEL-Standorten wird seit 2005 die Anzahlkonzentration von ultrafeinen Partikeln gemessen (Abb. 12). Wie bei der Konzentration von PM10 (Abb. 8) und Stickstoffdioxid (Abb. 15) wurden die höchsten Werte in Verkehrsnähe gemessen, mit starken Schwankungen von Jahr zu Jahr.

5.2 Ozon

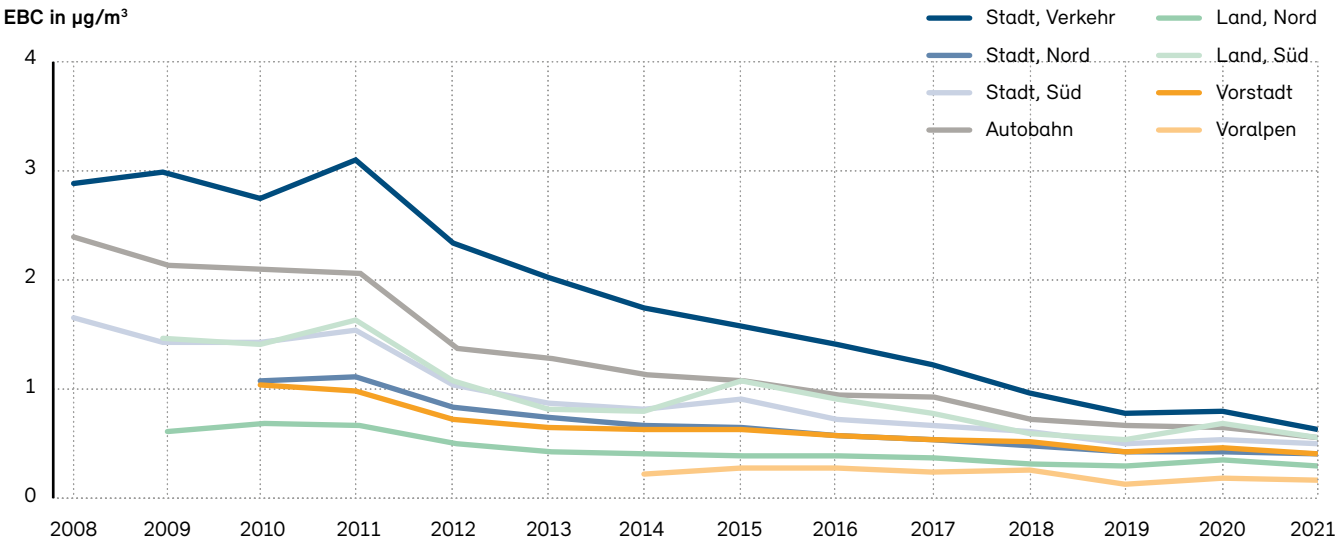
Ozon, ein farbloses Gas von etwas stechendem Geruch und geringer Löslichkeit in Wasser, ist eines der wichtigsten Spurengase in der Erdatmosphäre. Es spielt bei drei wichtigen Umweltproblemen eine zentrale Rolle: dem Sommersmog, dem Ozonloch und dem Treibhauseffekt.

Im Sommer kommt es zu übermässigen Konzentrationen von bodennahem Ozon. Das anthropogene Ozon in der Grundschicht der Atmosphäre entstammt nicht direkten Schadstoffquellen. Es wird erst in der Atmosphäre durch photochemische Reaktionen aus Stickoxiden und flüchtigen organischen Verbindungen gebildet. Die hohen Konzentrationen von bodennahem Ozon werden deshalb vor allem durch die anthropogenen Emissionen von Stickoxiden und flüchtigen organischen Verbindungen verursacht.

Ozon ist eines der stärksten Oxidationsmittel. Aus dieser Eigenschaft resultiert eine hohe Aggressivität gegen menschliche, tierische und pflanzliche Gewebe sowie Materialien. Es greift beim Menschen vor allem Atemwege und Lungengewebe an.

Unter dem Stichwort «Ozonloch» wird der Abbau der Ozonschicht in den höheren Schichten der Atmosphäre (Stratosphäre: 10 – 50 km über der Erdoberfläche) diskutiert. Diese Ozonschicht schützt den Menschen und

Abb. 11: Jahresmittel von Russ (EBC = equivalent black carbon)



die Ökosysteme vor zu intensiver UV-Strahlung und wird durch die immer noch vorhandenen sehr langlebigen halogenierten organischen Verbindungen (z. B. FCKW) gefährdet.

Ozon absorbiert neben UV-Strahlung auch Infrarotstrahlung und wirkt deshalb in der Stratosphäre und in der Troposphäre als klimarelevantes Spurengas mit relativ kurzer Lebensdauer. Abb. 13 zeigt die Entwicklung der bodennahen Ozonbelastung anhand des maximalen monatlichen 98-Perzentilwertes.

In der ganzen Schweiz wurde der dafür festgelegte Immissionsgrenzwert von 100 µg/m³ immer noch deutlich überschritten, obwohl die Belastung durch Ozon über die letzten Jahrzehnte abgenommen hat. Ozon zeigt einen typischen Jahresgang, der sich grundlegend von den meisten anderen Schadstoffen unterscheidet. Die Darstellung der monatlichen 98-Perzentilwerte (Abb. 14) zeigt, dass die höchsten Werte im Sommer auftreten, da starke Sonneneinstrahlung die Ozonbildung begünstigt.

Abb. 12: Jahresmittel der Partikelanzahlkonzentration

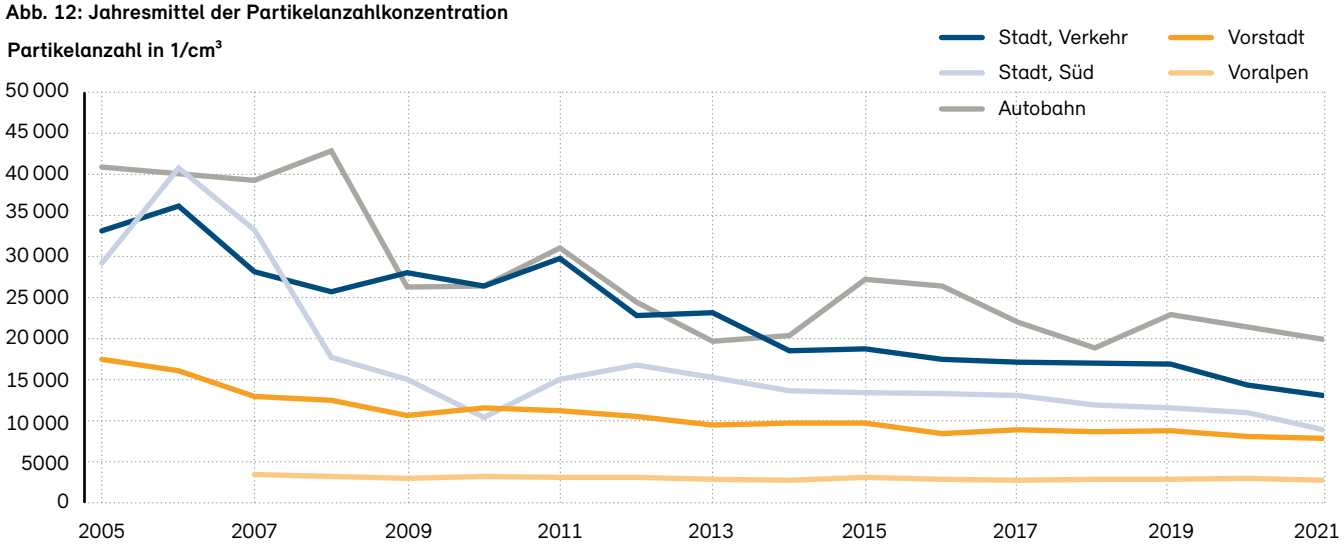
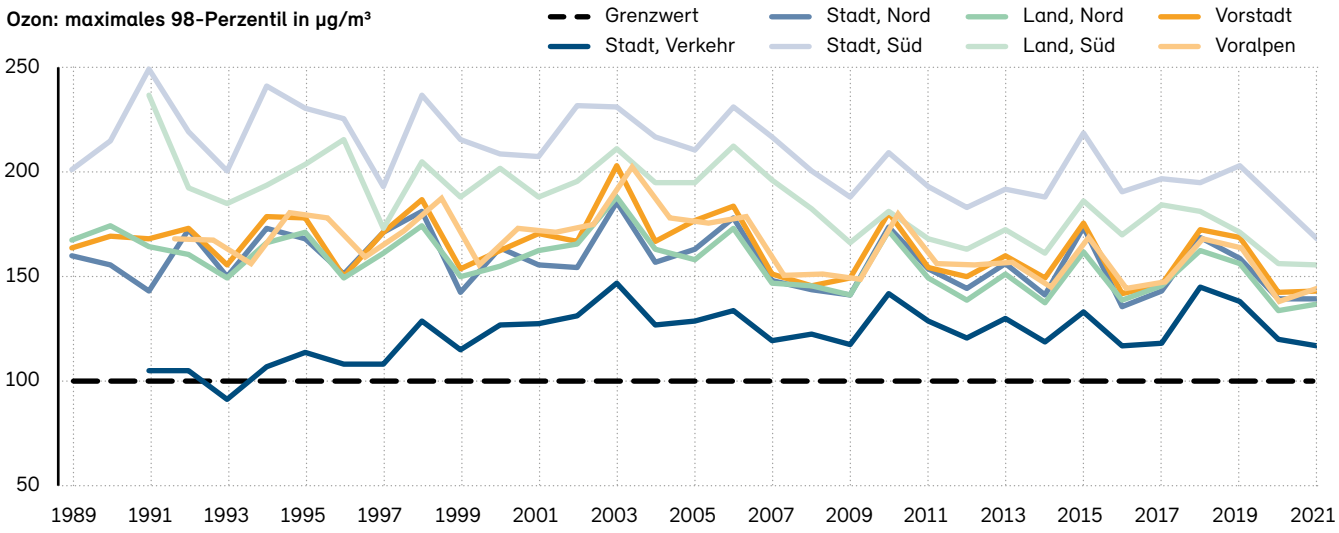


Abb. 13: Maximales monatliches 98-Perzentil der Halbstundenmittel von Ozon



5.3 Stickstoffverbindungen

Die aus lufthygienischer Sicht wichtigsten Stickstoffverbindungen in der Atmosphäre sind die beiden Verbindungen Stickstoffmonoxid und Stickstoffdioxid. Die Summe beider Substanzen wird als Stickoxide bezeichnet. Stickstoffmonoxid ist ein farb- und geruchloses Gas. Stickstoffdioxid ist ein rötlichbraunes, in höheren Konzentrationen stechend riechendes Reizgas. Aus den Stickoxiden bildet sich auch Nitrat, welches zur Feinstaubbelastung beiträgt.

Die Stickoxid-Emissionen entstehen beim Verbrennen fossiler Brenn- und Treibstoffe, insbesondere bei hohen Verbrennungstemperaturen, aus dem atmosphärischen Stickstoff und Sauerstoff, sowie bei der Verbrennung von Biomasse aus dem darin enthaltenen Stickstoff. Die Stickoxide werden zu einem grossen Teil als Stickstoffmonoxid emittiert, welches in der Folge in der Atmosphäre relativ rasch in das giftigere Stickstoffdioxid umgewandelt wird.

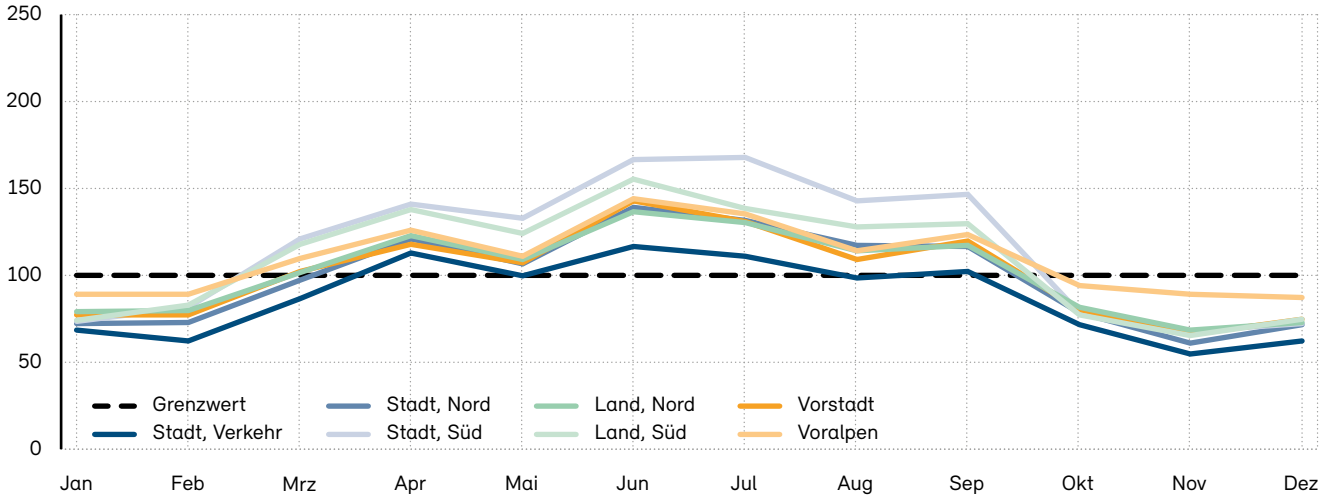
Für die negativen Auswirkungen auf Menschen ist insbesondere das Stickstoffdioxid verantwortlich. Es begünstigt zusammen mit anderen Reizgasen Atemwegserkrankungen. Darüber hinaus sind die Stickoxide wichtige Vorläufersubstanzen für die Bildung von bodennahem Ozon und Feinstaub. Zusammen mit Ammoniak tragen sie auch zur Überdüngung von Ökosystemen bei.

Stickstoffdioxid
Die Entwicklung der Belastung durch Stickstoffdioxid ist in Abb. 15 gezeigt. An allen Standorten hat die Konzentration von Stickstoffdioxid in den letzten Jahrzehnten abgenommen. Sowohl der Jahresmittelgrenzwert als auch der Tagesmittelgrenzwert wurde im Jahr 2021 an allen NABEL-Standorten eingehalten (Tab. 1).

Ammoniak
Ammoniak stammt zum grössten Teil aus der Tierhaltung der Landwirtschaft und wird an drei NABEL-Stationen mit hoher Zeitauflösung gemessen. An weiteren Standorten wird mit Passivsammlern die Ammoniakkonzentration bestimmt. Die Belastung durch Ammoniak war an allen drei Standorten hoch (Abb. 16) im Vergleich zu den im Rahmen der Konvention über weiträumige grenzüberschreitende Luftverunreinigung empfohlenen kritischen Konzentrationen (Jahresmittel, je nach Vegetationstyp 1 bis 3 µg/m³ Ammoniak). Die ausgeprägten Spitzen traten während Perioden mit Gülleausbringung auf.

Abb. 14: Monatliche 98-Perzentilwerte der Halbstundenmittel von Ozon im Jahr 2021

Ozon: monatliches 98-Perzentil in µg/m³



5.4 Schadstoffe im Niederschlag

Die in die Atmosphäre emittierten primären Schadstoffe wie auch die durch Umwandlung in der Atmosphäre entstandenen sekundären Schadstoffe werden durch verschiedene Eliminationsprozesse wieder aus der Atmosphäre entfernt. Ein wichtiger Eliminationsprozess ist die nasse Deposition. Schadstoffe gelangen jedoch auch durch trockene Deposition (Sedimentation von Partikeln, Deposition von Gasen) und Interzeption (Trägheitsabscheidung von Nebeltröpfchen und Partikeln an Pflanzenoberflächen) zum Boden. Die relative Bedeutung der verschiedenen Depositionsprozesse ist von vielen Faktoren abhängig, von der betrachteten Komponente, von meteorologischen, atmosphärenchemischen und topographischen Faktoren sowie der Oberflächenbeschaffenheit (z. B. Pflanzenbewuchs). Die Analyse des Regenwassers gibt Aufschluss über einen Teil des Eintrags an

Abb. 15: Jahresmittel von Stickstoffdioxid

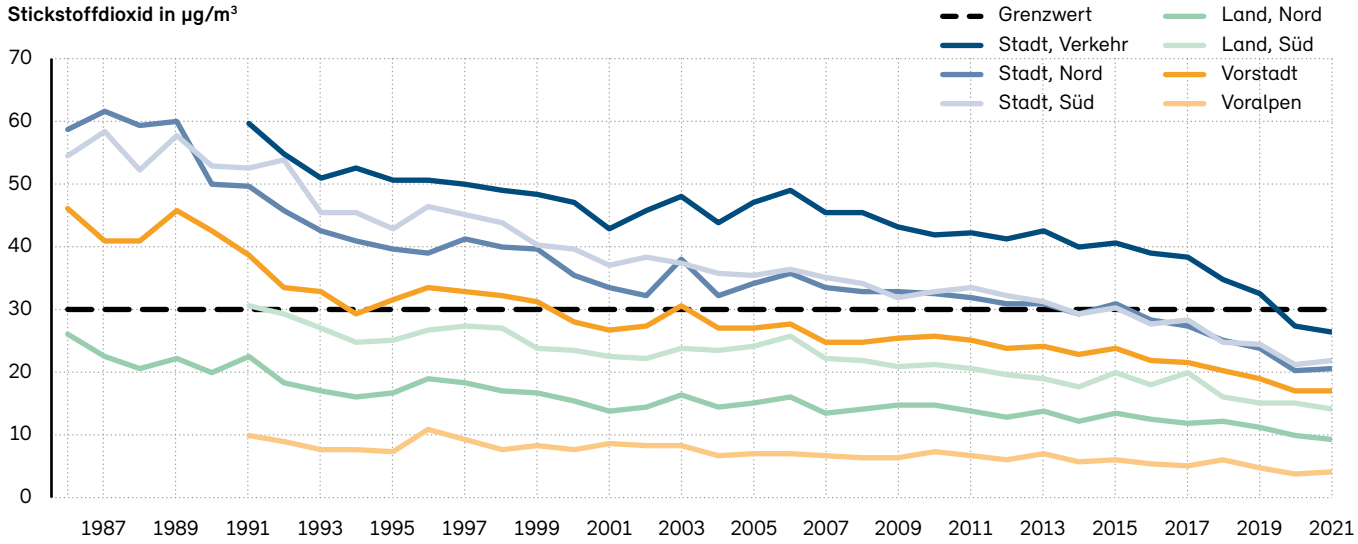
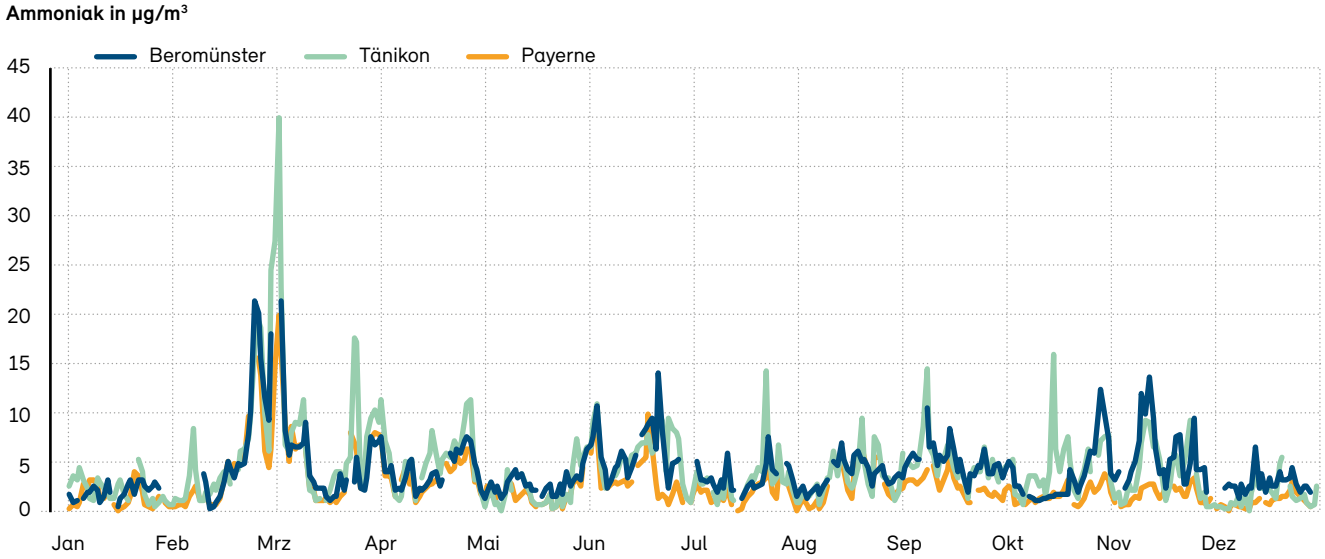


Abb. 16: Tagesmittel von Ammoniak im Jahr 2021

Ammoniak wird an drei ländlichen NABEL-Standorten kontinuierlich gemessen.



Schadstoffen, die von der Atmosphäre in den Boden und in die Gewässer gelangen. Dabei spielen einerseits der direkte und indirekte Säureeintrag für die Versauerung und andererseits der Stickstoffeintrag für die Eutrophierung empfindlicher Ökosysteme eine besonders wichtige Rolle.

Der pH-Wert ist ein Mass für die Wasserstoffionen-Konzentration (H^+) und gibt an, wie sauer der Regen ist. Je tiefer der Wert, desto saurer ist der Regen. Der pH-Wert ergibt sich durch das Zusammenwirken der vom Regen aufgenommenen säurebildenden und basischen Verbindungen. In den letzten Jahrzehnten hat der pH-Wert deutlich zugenommen und der Niederschlag ist heute weniger sauer als in den 1980er-Jahren (Abb. 17). Dies ist wesentlich durch den Rückgang der Sulfatfracht bedingt (Abb. 18), welcher den starken Rückgang der Schwefeldioxidbelastung wiederspiegelt. Die Jahresfrachten von reaktivem Stickstoff in der Form von Nitrat und Ammonium im Niederschlag haben in den letzten Jahrzehnten weniger stark und in der Form von Ammonium kaum abgenommen (Abb. 19 und 20).

5.5 Weitere gasförmige Luftschadstoffe

Schwefeldioxid

Schwefeldioxid ist ein farbloses, in höheren Konzentrationen stechend riechendes, gut wasserlösliches Reizgas. Es entsteht vor allem beim Verbrennen schwefelhaltiger Brenn- und Treibstoffe. Das Maximum der Schwefeldioxidemissionen wurde 1980 erreicht. Die Emissionen sind seither auf weniger als ein Zehntel des damaligen Maximalwertes zurückgegangen. Es ist eine wichtige Vorläufersubstanz für die Bildung von sauren Niederschlägen, da aus Schwefeldioxid in der Atmosphäre Sulfat gebildet werden kann. Die Konzentration von Schwefeldioxid hat in den letzten Jahrzehnten deutlich abgenommen (Abb. 21),

Abb. 17: Säuregehalt von Niederschlag (pH-Wert)

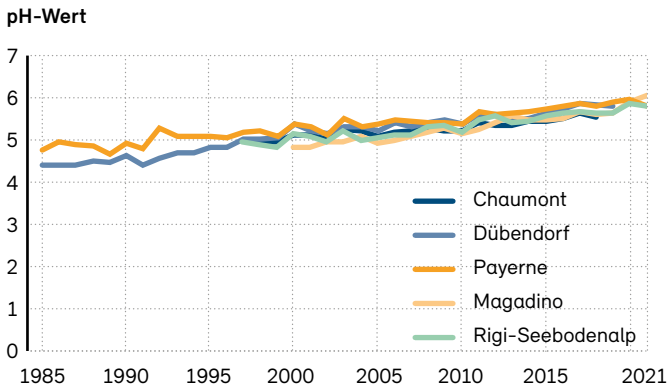


Abb. 18: Jahresfracht von Sulfat im Niederschlag

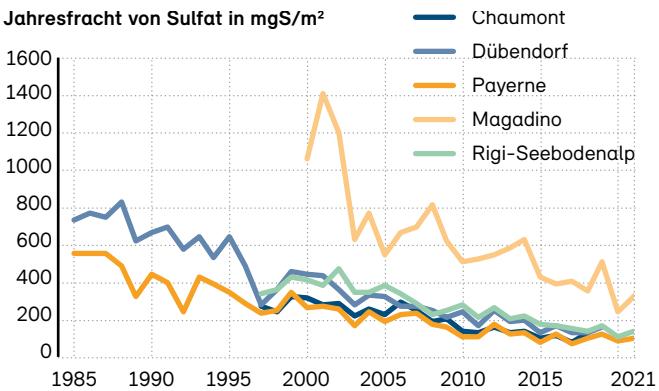


Abb. 19: Jahresfracht von Nitrat im Niederschlag

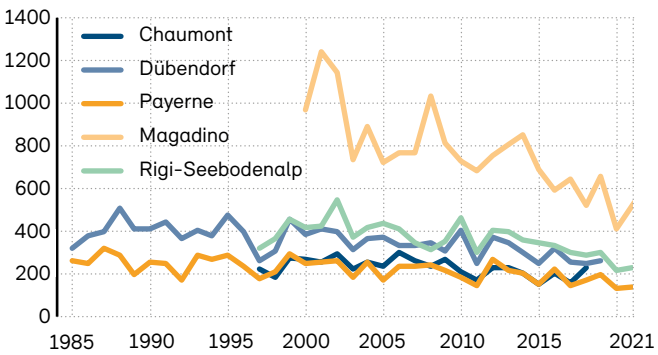
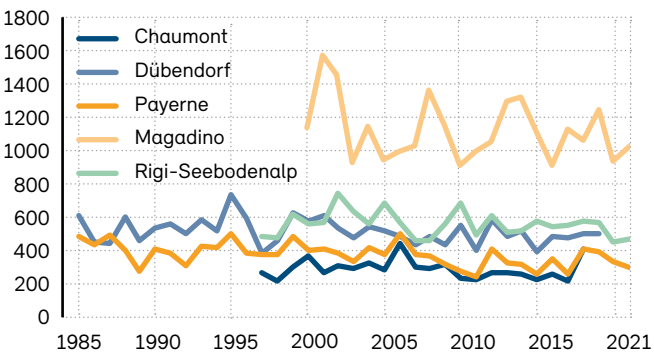


Abb. 20: Jahresfracht von Ammonium im Niederschlag



dies hauptsächlich durch die Reduktion des Schwefelgehaltes in Brenn- und Treibstoffen.

Kohlenmonoxid
Kohlenmonoxid ist ein farb- und geruchloses Gas, das bei praktisch allen Verbrennungsprozessen, insbesondere bei unvollständiger Verbrennung, entsteht. Das Maximum der Kohlenmonoxid Emissionen wurde Mitte der 70er-Jahre erreicht. Seither haben sich die Emissionen auf weniger als ein Drittel reduziert. Kohlenmonoxid ist – anders als Schwefeldioxid, Stickstoffdioxid und Ozon – kein Reizgas. Es verdrängt jedoch den Sauerstoff aus seiner Bindung mit dem roten Blutfarbstoff Hämoglobin und vermindert dadurch die Sauerstoff-Transportkapazität des Blutes. Die Belastung durch Kohlenmonoxid konnte durch Verbesserung der Verbrennungsvorgänge und durch Abgasnachbehandlung stark reduziert werden. Der Tagesgrenzwert von 8 mg/m^3 wird heute an allen NABEL-Standorten sehr gut eingehalten, liegen doch alle gemessenen Tagesmittel unter 1 mg/m^3.

Flüchtige organische Verbindungen VOC
Die Gruppe der flüchtigen organischen Verbindungen (sog. «VOC» = «volatile organic compounds») umfasst eine Vielzahl von Substanzen, die alle das Element Kohlenstoff enthalten. Die flüchtigen organischen Verbindungen sind zusammen mit den Stickoxiden wichtige Vorläufersubstanzen für die Ozonbildung. Das Ozonbildungspotenzial der einzelnen VOC variiert sehr stark, wobei die betrachtete Zeitskala eine wesentliche Rolle spielt. Verantwortlich für das Auftreten von relativ kurzfristigen Ozonspitzenwerten in der näheren Umgebung der Emissionsquellen sind in erster Linie die hochreaktiven VOC. Die schwach reaktiven VOC tragen dagegen zur Erhöhung der grossräumigen Ozon-Grundbelastung bei. Die Konzentrationen der flüchtigen Kohlenwasserstoffe haben seit Ende der 1980er-Jahre deutlich abgenommen (Abb. 22). Verschiedene VOC haben krebserregende Eigenschaften (z. B. Benzol), andere sind toxisch, wobei die Toxizität der einzelnen VOC sehr stark variiert. Die aromatischen Verbindungen Benzol, Toluol, Ethylbenzol und Xylol kommen im Motorenbenzin vor. Benzol ist insbesondere wegen seiner krebserzeugenden Wirkung in der Atemluft unerwünscht. Die an mehreren Standorten gemessenen Benzolkonzentrationen haben ebenfalls abgenommen und liegen heute im Jahresmittel zwischen 0,3 und 0,5 µg/m^3 und damit weit unter dem Richtwert der EU von 5 µg/m^3.

5.6 Treibhausgase

In der Forschungsstation Jungfraujoch werden durch das NABEL auch Treibhausgase gemessen. Aufgrund der Lage von 3580 m über Meer wird dort meist die europäische Hintergrundkonzentration von Spurengasen beobachtet. An einzelnen Tagen gelangt auch Luft aus tieferen Lagen aufs Jungfraujoch, was die Schätzung von schweizerischen und europäischen Emissionen erlaubt. Die am stärksten zu anthropogenen Klimaveränderungen beitragenden Treibhausgase sind Kohlendioxid, Methan

Abb. 21: Jahresmittel von Schwefeldioxid

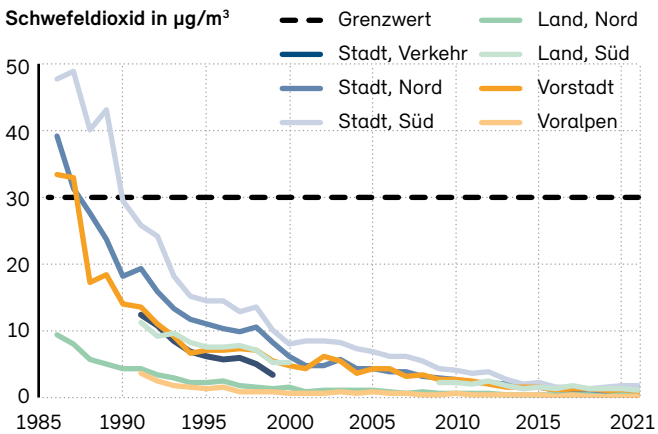
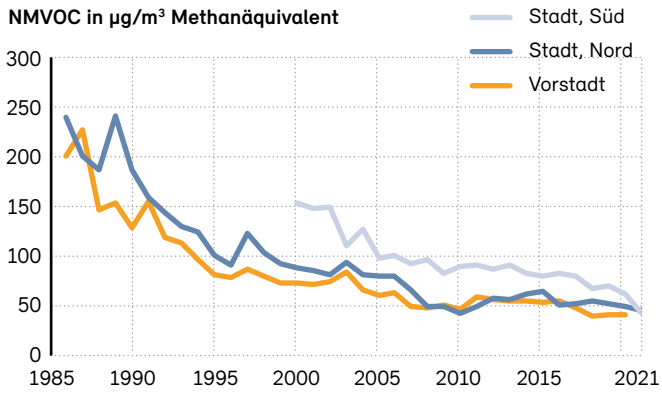


Abb. 22: Jahresmittel von flüchtigen organischen Verbindungen ohne Methan (NMVOC)



und Lachgas. Wegen der Langlebigkeit dieser Gase wird die auf dem Jungfraujoch gemessene Konzentration von Emissionen der ganzen Nordhemisphäre beeinflusst. Abb. 23 zeigt die Monatsmittel von Kohlendioxid und Lachgas seit Messbeginn, Abb. 24 die Monatsmittel von Methan. Die Konzentrationen aller drei Treibhausgase sind in den letzten Jahren angestiegen. Der beobachtete Anstieg stimmt mit dem Verhalten an anderen Hintergrundstationen der Nordhemisphäre überein.

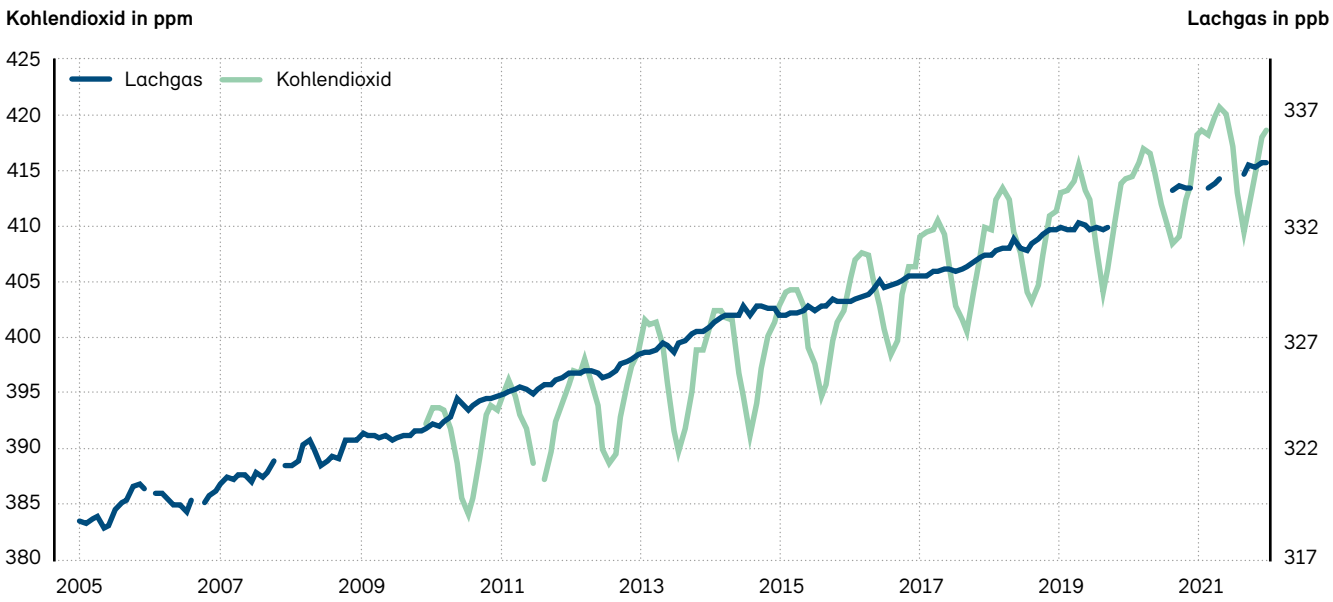
Die Konzentration von Kohlendioxid (CO_2) weist einen ausgeprägten Jahresgang auf, welcher im Wesentlichen die Aufnahme von Kohlendioxid durch die Vegetation im Sommerhalbjahr wiederspiegelt. Die Konzentration von Lachgas (Distickstoffmonoxid, N_2O) hat seit dem Messbeginn im Jahre 2005 beinahe fünf Prozent zugenommen. Lachgas wird aus stark gedüngten Böden und bei Verbrennungsvorgängen freigesetzt. Methan (CH_4) ist der Hauptbestandteil von Erdgas und wird bei der Nutzung von Lagerstätten fossiler Energieträger freigesetzt. Eine wichtige Quelle ist auch die Landwirtschaft, insbesondere die Tierhaltung. Der Methangehalt der Atmosphäre steigt weiterhin an. Methan ist nicht nur ein Treibhausgas, sondern trägt auch wesentlich zur Ozonbildung in den oberen Schichten der Troposphäre bei.

Andere Verbindungen, die im NABEL gemessen werden, haben ebenfalls eine Bedeutung im Rahmen von Klimabeeinflussung, z. B. Russ, Ozon oder Sulfat.

Auf dem Jungfraujoch werden auch halogenierte Verbindungen gemessen, die ebenfalls als Treibhausgase wirken. Die beiden in Abb. 25 gezeigten Substanzen F11 (CCl_3F) und 1,1,1-Trichlorethan (CH_3CCl_3) enthalten Chloratome und tragen zum Abbau der schützenden Ozonschicht in der oberen Atmosphäre bei. Deshalb sind sie durch das Montrealer Protokoll in Produktion und Anwendung weltweit eingeschränkt worden. Das in Schaumstoffen und Sprays eingesetzte F11 hat eine lange Lebensdauer und verbleibt jahrzehntelang in der Atmosphäre. Deshalb hat die Hintergrundkonzentration seit dem Jahr 2000 nur wenig abgenommen. Es werden keine ausgeprägten Konzentrationsspitzen gemessen, was darauf hindeutet, dass in Europa nur noch geringe Quellen von F11 vorhanden sind. Das als Lösungsmittel verwendete Trichlorethan ist gemäss dem Montrealer Protokoll ebenfalls in Produktion und Anwendung eingeschränkt. Wegen seiner kürzeren Lebenszeit in der Atmosphäre ist bereits ein deutlicher Rückgang der Konzentration seit dem Jahr 2000 zu beobachten.

Die Substanz F134a (CH_2FCF_3) wird als Kühlmittel für Klimaanlagen in Autos und für die Schäumung von

Abb. 23: Monatsmittel von Kohlendioxid und Lachgas auf dem Jungfraujoch



Kunststoffen (z. B. für Isoliermaterialien) eingesetzt. Sie darf gemäss internationalen Abkommen produziert und verwendet werden, muss aber in den Treibhausgasstatistiken gemäss dem Kyoto-Protokoll berücksichtigt werden. F134a ersetzt andere, mittlerweile verbotene Substanzen und zeigt einen deutlichen Anstieg in der Konzentration der Hintergrundluft (Abb. 25). Wenn Luft aus tieferen Lagen aus der Schweiz oder aus dem Ausland auf das Jungfraujoch hochsteigt, sind wesentlich erhöhte Konzentrationen von F134a zu beobachten. Seit einigen Jahren unterliegen F134a und andere klimawirksame langlebige fluorierte Kohlenwasserstoffe weltweit einem sogenannten «phase-down» innerhalb des Kigali Amendments zum Montrealer Protokoll. Deshalb sollten diese Substanzen in der Zukunft in der Atmosphäre wieder abnehmen.

Abb. 24: Monatsmittel von Methan auf dem Jungfraujoch

Methan in ppm

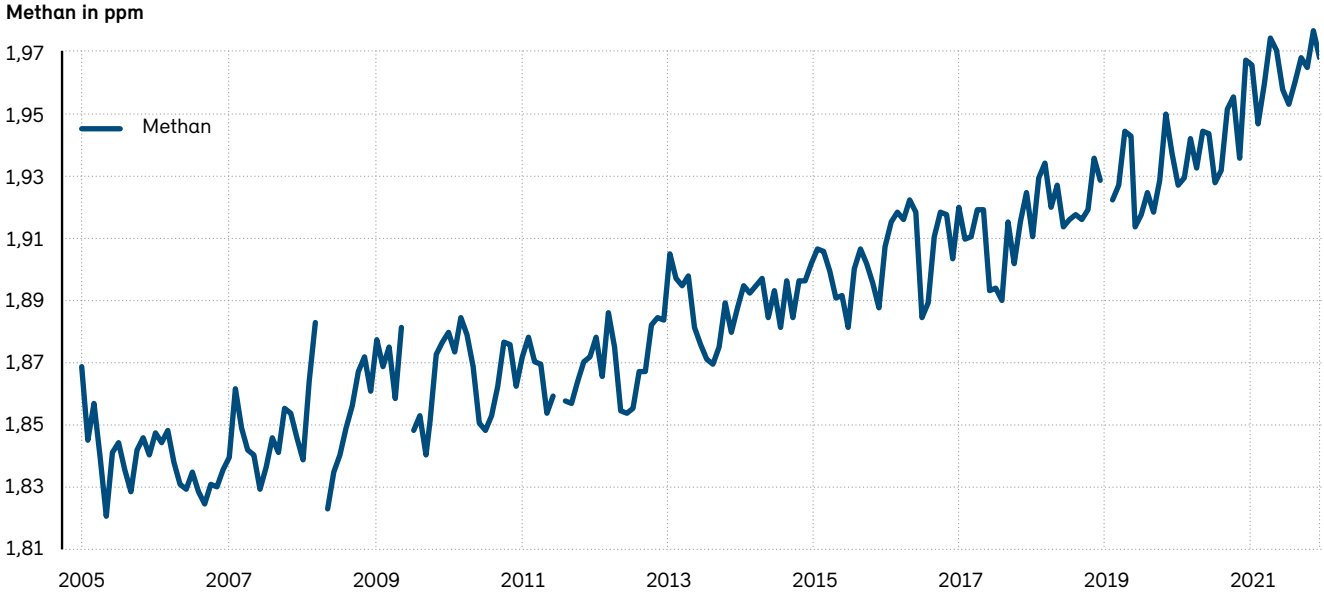
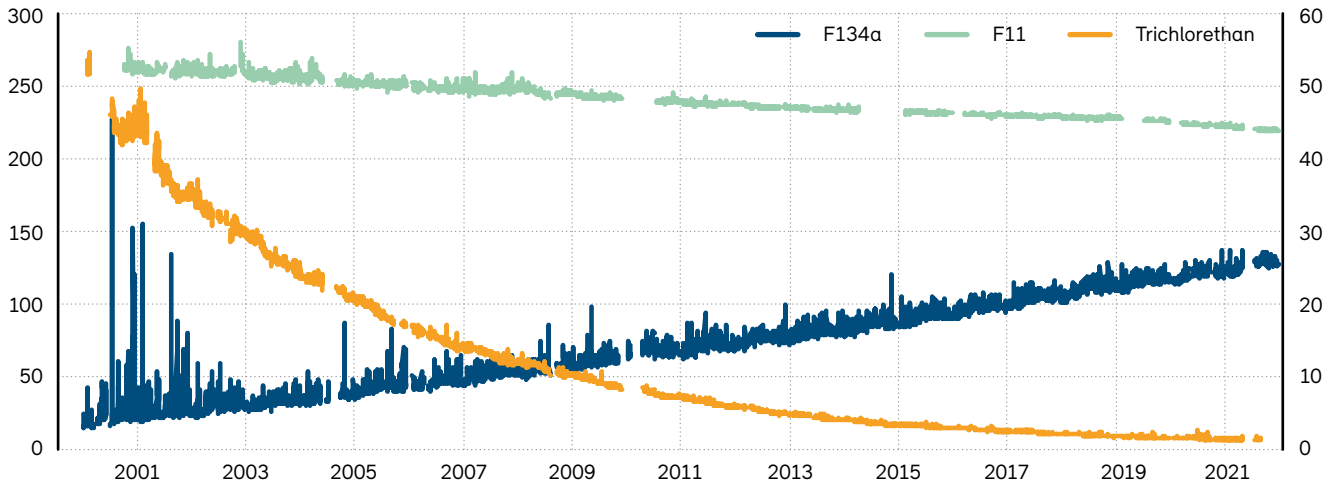


Abb. 25: Tagesmittel von halogenierten Verbindungen auf dem Jungfraujoch

Die erlaubten Substanzen wie F134a zeigen einen Anstieg der Konzentration auf dem Jungfraujoch, die Konzentrationen der verbotenen Substanzen wie F11 und Trichlorethan nehmen ab.

Substanzen F134a und F11 in ppt **Trichlorethan in ppt**



6 Ausblick

Die Luftbelastung in der Schweiz konnte seit Mitte der 1980er-Jahre deutlich verringert werden. Dies ist das Ergebnis von emissionsmindernden Massnahmen in der Schweiz und anderen Ländern Europas. Durch strengere Emissionsvorschriften bei stationären Anlagen und Fahrzeugen sowie auch durch ökonomische Anreize (z. B. die Lenkungsabgaben für VOC) konnte der Ausstoss von vielen Luftschadstoffen verringert werden. Parallel zu den Emissionsreduktionen sanken die Konzentrationen von Schadstoffen in der Atmosphäre (Abb. 26 bis 29). Die Abnahme der im NABEL gemessenen Konzentrationen bestätigt die Abnahme der Emissionen. Die Emissionen von primärem Feinstaub haben allerdings weniger stark abgenommen als die gemessenen Konzentrationen von PM10 (Abb. 29). Dies zeigt, dass ein wesentlicher Teil der Abnahme durch die Reduktion von gasförmigen Vorläufern des sekundären Feinstaubanteils verursacht wird.

Grosse Erfolge konnten bei den Luftschadstoffen Schwefeldioxid, Kohlenmonoxid und bei Schwermetallen wie Blei, Cadmium oder Zink erreicht werden. Für diese Schadstoffe liegen die gemessenen Konzentrationen in aller Regel deutlich unter den Immissionsgrenzwerten. Für die Schadstoffe Feinstaub PM10 und PM2.5 wurden die Grenzwerte im Jahr 2021 teilweise überschritten. Hingegen wurden die Grenzwerte für Ozon an allen 16 Messstationen des NABEL überschritten. Ebenfalls noch deutlich zu hoch sind die Stickstoff- und Säureeinträge in Ökosysteme. Das Ziel einer guten Luftqualität ist noch nicht erreicht – trotz der beachtlichen Erfolge der schweizerischen Luftreinhaltepolitik. Es sind deshalb weitere Emissionsreduktionen notwendig.

Die Verbesserung der Luftqualität ist eine komplexe Aufgabe. Sie muss in vielen Schritten erfolgen, da es keine einzelne Massnahme gibt, die die Probleme auf einen Schlag lösen könnte. Jede Massnahme, die zu einer Verminderung von Schadstoffemissionen führt, ist sinnvoll. Da Luftschadstoffe nicht an nationalen Grenzen halt machen, sind auch internationale Anstrengungen zur Emmissionsminderung notwendig. Einen weiteren grossen Schritt stellt das Protokoll zur Bekämpfung der Versauerung, der Eutrophierung und des bodennahen Ozons (Göteborger Protokoll) des UNECE-Übereinkommens über weiträumige grenzüberschreitende Luftverunreinigung dar. Dieses legt für die Parteien des Göteborger Protokolls in Europa und Nordamerika nationale Emissionsreduktionsziele für Stickoxide, Schwefeldioxid, Ammoniak, flüchtige organische Verbindungen und Feinstaub für das Jahr 2020 und die Folgejahre fest.

Die Messresultate des Nationalen Beobachtungsnetzes für Luftfremdstoffe (NABEL) belegen den Erfolg der bisherigen Luftreinhaltepolitik von Bund, Kantonen und Gemeinden. Der vorliegende, jährlich erscheinende Bericht mit seiner Beurteilung der Luftbelastung ist ein wichtiger Bestandteil der Erfolgskontrolle und zeigt die Notwendigkeit weiterer Luftreinhalte-Massnahmen klar auf.

Abb. 26: Entwicklung der im NABEL gemessenen Aussenluftkonzentration und der Emissionen von Schwefeldioxid

Die Emissionen 2021 stellen eine Prognose ohne Berücksichtigung möglicher Covid-19-Effekte dar.

Schwefeldioxid, Jahr 2000: 100 %

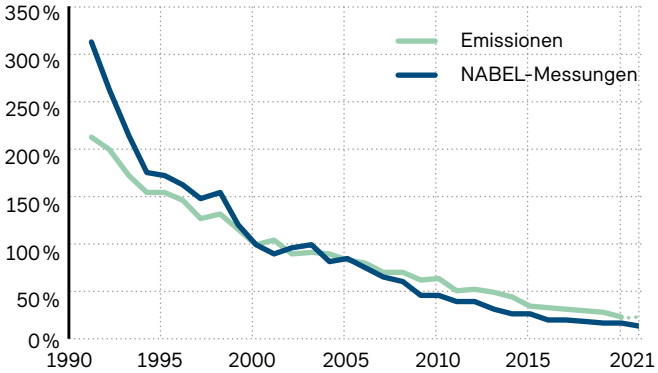


Abb. 27: Entwicklung der im NABEL gemessenen Aussenluftkonzentration und der Emissionen von Stickoxiden

Stickoxide bezeichnet die Summe von Stickstoffmonoxid und Stickstoffdioxid.

Stickoxide, Jahr 2000: 100 %

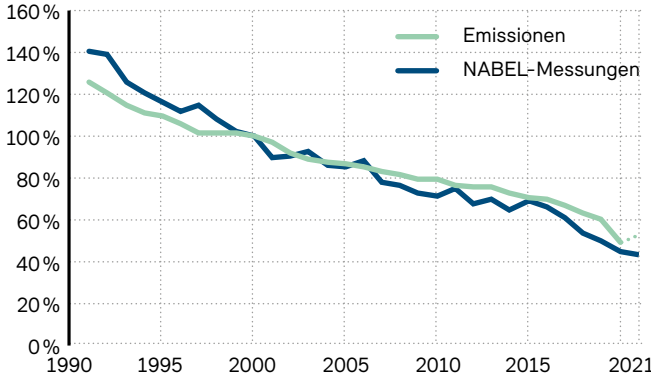


Abb. 28: Entwicklung der im NABEL gemessenen Aussenluftkonzentration und der Emissionen von NMVOC

NMVOC bezeichnet die flüchtigen organischen Verbindungen ohne Methan.

NMVOC, Jahr 2000: 100 %

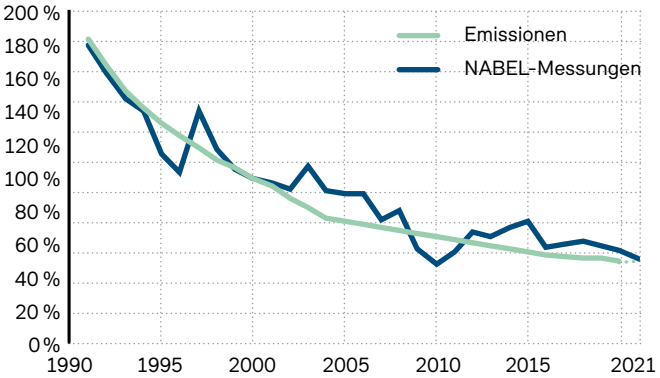
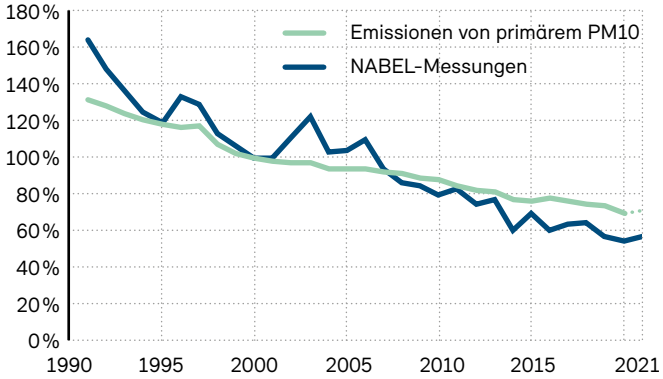


Abb. 29: Entwicklung der im NABEL gemessenen Aussenluftkonzentration und der Emissionen von PM10

Nur die Emissionen von primärem PM10 wurden berücksichtigt.

Feinstaub PM10, Jahr 2000: 100 %



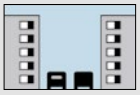
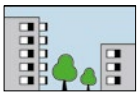
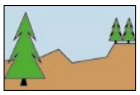
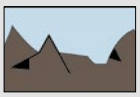
Anhang

Gemäss Artikel 39 Absatz 1 der Luftreinhalte-Verordnung (LRV) vom 16. Dezember 1985 führt das Bundesamt für Umwelt Erhebungen über die Luftverschmutzung im gesamtschweizerischen Rahmen durch. Das NABEL dient insbesondere der Erfüllung dieser gesetzlichen Aufgabe. Es ist somit ein wichtiges Vollzugsinstrument der LRV, indem es vor allem der Erfolgskontrolle über die gegen die Luftverschmutzung ergriffenen Massnahmen (Art. 44 des Umweltschutzgesetzes), sowie der Information der Bevölkerung (Art. 10e des Umweltschutzgesetzes) dient. Der Betrieb und die Wartung der Messsysteme, die Qualitätssicherung und die Datenkontrolle werden von der Eidg. Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Empa), Dübendorf, gemäss Art. 39 Abs. 2 LRV durchgeführt.

Das NABEL-Messnetz ist ein zentrales Element der Umweltbeobachtung in der Schweiz. Es wurde nach einem Bundesratsbeschluss im Jahre 1988 von acht auf sechzehn Stationen ausgebaut und deckt seither alle wichtigen Belastungssituationen in der Schweiz ab. Das NABEL ermöglicht unter anderem eine Erfolgskontrolle der in den vergangenen 35 Jahren umgesetzten Massnahmen zur Reduktion der Emissionen von Luftschadstoffen.

Die Messungen des NABEL umfassen die wichtigsten Luftschadstoffe, welche die menschliche Gesundheit oder die Umwelt schädigen können, seien sie gas- oder partikelförmig oder im Niederschlag enthalten. Primär werden jene Luftschadstoffe bestimmt, die in der schweizerischen Luftreinhalte-Verordnung geregelt sind, oder im Rahmen von internationalen Luftreinhalte-Abkommen erhoben werden müssen. Sie bilden daher das Grundmessprogramm des NABEL. Für weitergehende Fragestellungen wird dieses Programm durch zeitlich befristete Projekte

Tab. 2: Klassierung der NABEL-Stationen nach Standorttyp

	Standorttyp	Code	Station	Höhe über Meer
	Städtisch, verkehrsbelastet	BER LAU	Bern-Bollwerk Lausanne-César-Roux	536 m 530 m
	Städtisch	LUG ZUE	Lugano-Università Zürich-Kaserne	280 m 409 m
	Vorstädtisch	BAS DUE	Basel-Binningen Dübendorf-Empa	316 m 432 m
	Ländlich, Autobahn	HAE SIO	Härkingen-A1 Sion-Aéroport-A9	431 m 483 m
	Ländlich, unterhalb 1000 m	MAG PAY TAE BRM	Magadino-Cadenazzo Payerne Tänikon Beromünster	203 m 489 m 538 m 797 m
	Ländlich, oberhalb 1000 m	CHA RIG DAV	Chaumont Rigi-Seebodenalp Davos-Seehornwald	1136 m 1031 m 1637 m
	Hochgebirge	JUN	Jungfraujoch	3580 m

ergänzt. Beispielsweise werden auf dem Jungfraujoch im Projekt CLIMGAS-CH verschiedene Treibhausgase gemessen, um deren zeitliche Entwicklung zuverlässig bestimmen zu können.

Das NABEL evaluiert neue Messmethoden und stellt sein Wissen den Behörden und Betreibern von kantonalen und kommunalen Messnetzen zur Verfügung. Einige der NABEL-Stationen dienen als Referenz für die Messung der vertikalen Verteilung von Spurengasen mit Ballonsondierungen oder Satelliten. Das NABEL-Messnetz liefert zudem Referenzdaten zur Kalibration sowie zur Validierung von Ausbreitungsmodellen, welche die Bestimmung der flächenhaften Verteilung von Luftschadstoffen ermöglichen.

Gemeinsam mit kantonalen und städtischen Messnetzen gewährleisten die NABEL-Messwerte eine umfassende Information der schweizerischen Bevölkerung über die aktuelle Luftqualität, zum Beispiel über Internet und mit der Smartphone-Applikation airCHeck oder der MeteoSchweiz-App. Die NABEL-Jahresberichte ergänzen diese Informationsquellen und liefern Interpretationen und eine Übersicht über langfristige Veränderungen der Luftqualität.

Das NABEL-Messnetz erfüllt die Anforderungen aus dem Übereinkommen über weiträumige, grenzüberschreitende Luftverunreinigung (UNECE CLRTAP, EMEP Programm), der Mitgliedschaft in der Europäischen Umweltagentur (EEA), sowie dem Global Atmosphere Watch (GAW) Programm der Weltorganisation für Meteorologie (WMO).

Die Schadstoffbelastung in der Schweiz zeigt grosse räumliche Unterschiede, die in erster Linie von der Art des Standortes und den dort vorhandenen Emissionsquellen abhängen. Es ist daher sinnvoll, eine Klassierung der Messstationen nach Standorttypen vorzunehmen. Das NABEL-Messnetz erfasst die Luftschadstoffbelastung an solchen Standorttypen. Aufgrund einer Beurteilung der Stationsumgebung und der an den Stationen gemessenen Schadstoffbelastung ergibt sich oben erwähnte Einteilung der NABEL-Stationen nach Standorttypen.

Weiterführende Informationen im Internet
Ausführliche Informationen zu den Themen dieses Berichtes und zu Fragen der Luftreinhaltung sowie aktuelle und historische Daten sind im Internet zu finden unter: *www.bafu.admin.ch > Themen > Thema Luft*

Detaillierte Messergebnisse des NABEL 2021:
www.bafu.admin.ch > Themen > Thema Luft > Daten, Indikatoren und Karten > Luftbelastung > Historische Daten > Jahres- und Monatsberichte NABEL

Beschrieb des NABEL-Messnetzes:
www.bafu.admin.ch > Themen > Thema Luft > Daten, Indikatoren und Karten > Luftbelastung > Messnetz NABEL

Weitere Informationen zum NABEL-Messnetz:
www.empa.ch/web/s503/nabel

Ausführliche Informationen zum Thema Luftbelastung:
www.bafu.admin.ch > Themen > Thema Luft > Daten, Indikatoren und Karten > Luftbelastung

Messung von Klimagasen:
www.empa.ch/web/s503/climate-gases

Weitere Berichte zum NABEL:
www.bafu.admin.ch > Themen > Thema Luft > Daten, Indikatoren und Karten > Luftbelastung > Messnetz NABEL > Berichte

LRK Bericht Konzept betreffend lufthygienischen Massnahmen des Bundes, 11. September 2009, Bundesblatt Nr. 40, 2009, Seite 6585
www.admin.ch/ch/d/ff/2009/6585.pdf

Luftverschmutzung und Gesundheit:
Startseite > Themen > Thema Luft > Publikationen und Studien > Luftverschmutzung und Gesundheit

www.bafu.admin.ch > Themen > Thema Luft > Fachinformationen > Auswirkungen > auf die Gesundheit

www.bafu.admin.ch/uw-1425-d