

Luftqualität 2019

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 2019

Messresultate des Nationalen Beobachtungsnetzes für Luftfremdstoffe (NABEL)

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 058 462 93 12

luftreinhaltung@bafu.admin.ch | www.bafu.admin.ch

Zitierung

BAFU (Hrsg.) 2020: Luftqualität 2019. Messresultate des
Nationalen Beobachtungsnetzes für Luftfremdstoffe (NABEL).

Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt-Zustand Nr. 2020: 28 S.

Gestaltung

Cavelti AG, Marken. Digital und gedruckt, Gossau

Titelbild

NABEL-Messstation Payerne, © Empa

PDF-Download

www.bafu.admin.ch/uz-2020-d

Eine gedruckte Fassung kann nicht bestellt werden.

Diese Publikation ist auch in französischer Sprache verfügbar.

Die Originalsprache ist Deutsch.

© BAFU 2020

Inhaltsverzeichnis

Abstracts	5
------------------	----------

Vorwort	6
----------------	----------

1	Luftbelastung in der Schweiz 2019	7
1.1	Vergleich mit Immissionsgrenzwerten	7
1.2	Räumliche Verteilung der Luftbelastung	8

2	Luftbelastung an den NABEL-Stationen 2019	10
2.1	Vergleich mit Immissionsgrenzwerten	10

3	Besonderheiten 2019	12
----------	----------------------------	-----------

4	Entwicklung und Auswirkungen	13
4.1	Entwicklung der Luftbelastung	13
4.2	Auswirkung der Luftbelastung	14

5	Luftschadstoffe	15
5.1	Feinstaub und seine Zusammensetzung	15
5.2	Ozon	17
5.3	Stickstoffverbindungen	19
5.4	Schadstoffe im Niederschlag	20
5.5	Weitere gasförmige Luftschadstoffe	21
5.6	Treibhausgase	23

6	Ausblick	25
----------	-----------------	-----------

Anhang	27
---------------	-----------

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 local monitoring networks. In 2019, the ambient air quality standards for ozone were exceeded at all stations, those for particulate matter (PM10 and PM2.5) and nitrogen dioxide were partially exceeded at traffic sites. All other air quality standards were no more exceeded at all NABEL stations. The air quality in Switzerland has significantly improved over the last 30 years.

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 2019 an allen NABEL-Stationen die Grenzwerte überschritten, für lungengängigem Feinstaub (PM10 und PM2.5) und Stickstoffdioxid wurden die Immissionsgrenzwerte strassennah teilweise überschritten. 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.

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 2019, les valeurs limites d'immission pour l'ozone ont été dépassées dans toutes les stations NABEL, les poussières fines (PM10 et PM2,5) et le dioxyde d'azote ont été partiellement dépassées sur les sites proches du trafic routier. 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.

Sulla base dei risultati di misurazioni effettuate dalla Rete nazionale d'osservazione degli inquinanti atmosferici (NABEL) e dai Cantoni, il presente rapporto documenta lo stato dell'aria in Svizzera. Per quanto concerne gli inquinanti atmosferici, nel 2019 sono stati superati i valori limite d'immissione di ozono presso le stazione NABEL, polveri fini (PM10 e PM2.5) e diossido di azoto sono in parte superati a prossima traffico stazione. 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.

Keywords:

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

Stichwörter:

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

Mots-clés :

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

Parole chiave:

lotta contro l'inquinamento atmosferico, misurazione delle immissioni, inquinanti atmosferici e evoluzione temporale, valutazione della qualità dell'aria

Vorwort

Die Qualität unserer Luft ist seit 1985 deutlich besser geworden. 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 zu hohe Belastung mit Ozon, Feinstaub, Stickstoffdioxid und kanzerogenen Luftschadstoffen, aber auch an die zu hohen Stickstoffeinträge in empfindliche Ökosysteme zu denken. Die Fortführung einer konsequenten Luftreinhalte-Politik ist unabdingbar, um auch die verbleibenden übermässigen Immissionen nachhaltig zu beseitigen.

An mehreren Standorten des NABEL werden neben den Schadstoffen mit einem Immissionsgrenzwert auch Grössen wie Partikelanzahl, Russ und flüchtige organische Verbindungen gemessen, um die Wirksamkeit von Massnahmen zur Emissionsminderung zu verfolgen und den Stand der Belastung durch diese Schadstoffe zu erheben.

Diese Messungen bestätigen, dass weitere Massnahmen zur Verminderung der Schadstoffemissionen nötig sind. Insbesondere der Ausstoss von Ammoniak, Stickoxiden, flüchtigen organischen Verbindungen, lungengängigem Feinstaub sowie krebserregenden Stoffen (z. B. Dieselruss, Benzo(a)pyren oder Benzol) muss noch weiter gesenkt werden. Die technischen Möglichkeiten zur Emissionsminderung sollen bei allen Quellen ausgeschöpft werden.

Wie wertvoll ein stabiles, langfristiges Messnetz für Luftschadstoffe ist, zeigt sich auch bei besonderen Ereignissen wie dem heissen Sommer im Jahr 2003, den langen Inversionsphasen im Winter 2006 oder aktuell der Coronavirus-Pandemie im 2020. Nur so können die Auswirkungen und Folgen auf die Luftqualität in den verschiedenen Regionen der Schweiz auch in solchen extremen Situationen vertieft analysiert und bewertet werden.

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 2019

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 traten nur vereinzelte Überschreitungen des Tagesmittelgrenzwertes auf.

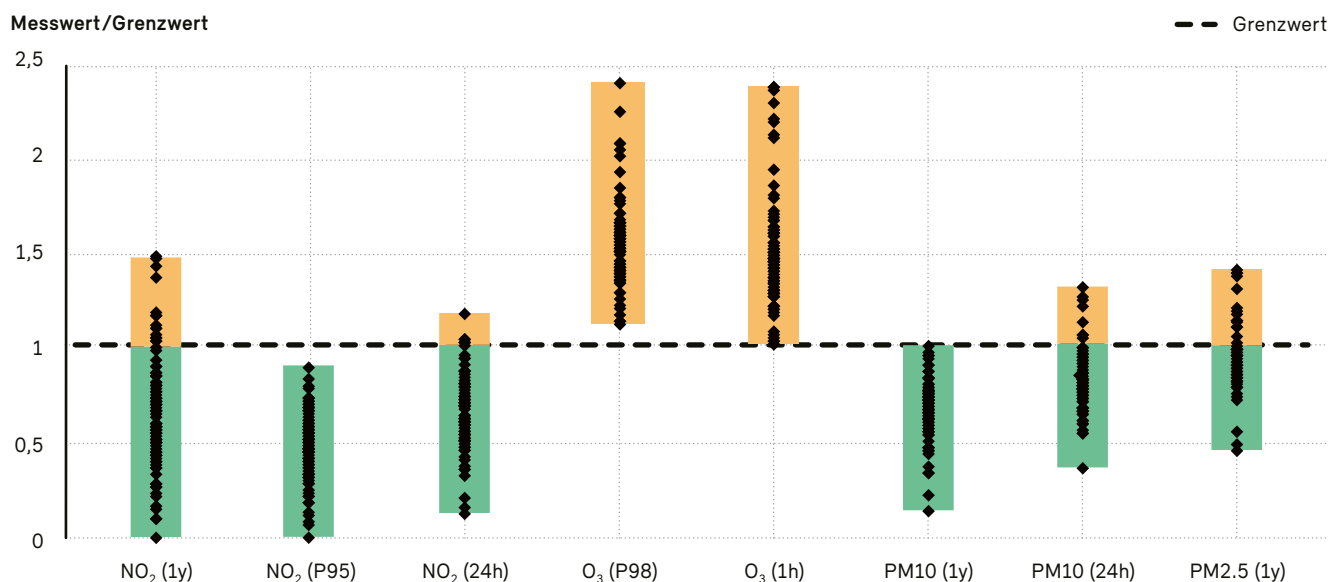
Beim Feinstaub PM10 hingegen wurde der Tagesmittelgrenzwert an vielen Standorten mehr als die erlaubten dreimal überschritten. Der Jahresmittelwert für PM10 wurde an allen Standorten eingehalten, während er für PM2.5 an vielen Standorten überschritten wurde.

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 2019

Quotient aus der im Jahr 2019 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 (NO₂), Ozon (O₃), Feinstaub (PM10 und PM2.5). Kenngrößen: Perzentilwerte der Halbstundenmittel (P95, P98), Stundenmittel (1h), Tagesmittel (24h) und Jahresmittelwerte (1y).



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 2019 von Stickstoffdioxid. Wegen der Mittelung über einzelne Zellen des Modellgitters können Spitzenwerte nahe bei Emissionsquellen, wie stark befahrenen Strassen, nicht dargestellt werden. 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.

Feinstaub

Abb. 3 zeigt die räumliche Verteilung der Jahresmittel 2019 von Feinstaub (PM₁₀). Die Konzentration von lungengängigem Feinstaub lag in den Städten im Bereich des Immissionsgrenzwerts und auf dem Land deutlich darunter. Die höchsten Konzentrationen wurden im Tessin gemessen. Der Stadt-Land Gegensatz ist beim PM₁₀ weniger stark ausgeprägt als beim Stickstoffdioxid. Zwei Ursachen sind dafür verantwortlich. Erstens besteht rund die Hälfte der PM₁₀-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 2019 während Sommersmoglagen in der ganzen Schweiz flächendeckend und zum Teil erheblich über den Grenzwerten (Abb. 4). Für die Beurteilung der Ozonbelastung dient auch der 98-Perzentilwert der Halbstundenmittel-

werte des ozonreichsten Sommermonats, für welchen ein Grenzwert von 100 µg/m³ 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 Stadtzentrum-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 noch zu hoch. Damit wird die Biodiversität in diesen Gebieten gefährdet.

Abb. 2: Karte der Jahresmittel von Stickstoffdioxid für das Jahr 2019 (Grenzwert $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$)

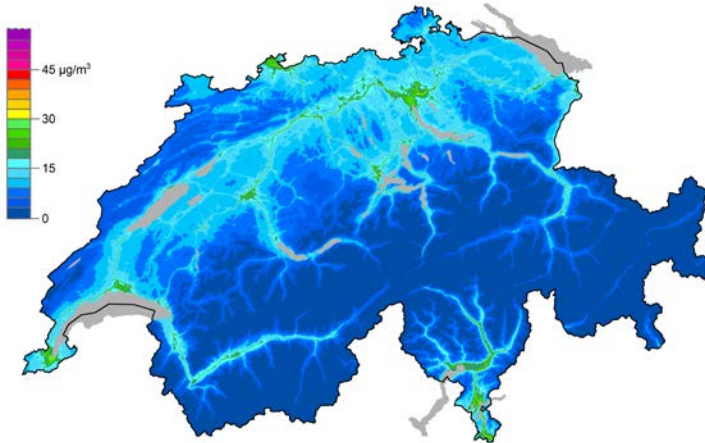


Abb. 3: Karte der Jahresmittel von Feinstaub (PM10) für das Jahr 2019 (Grenzwert $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$)

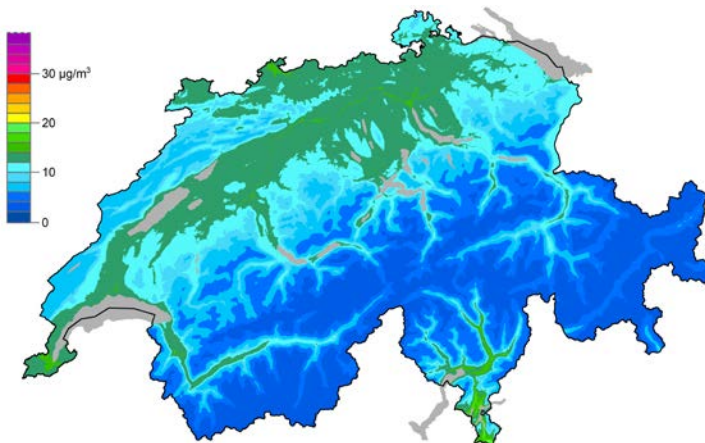
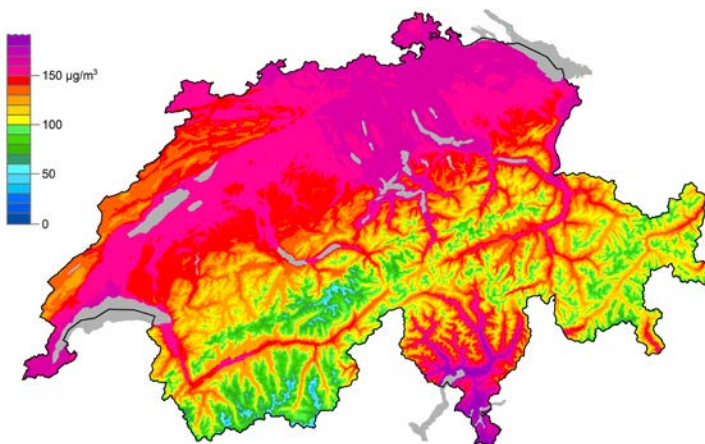


Abb. 4: Karte der höchsten monatlichen 98-Perzentilwerte von Ozon für das Jahr 2019 (Grenzwert $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$)



2 Luftbelastung an den NABEL-Stationen 2019

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 2019 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 Stickstoffdioxid, 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 Stundemittelwert von $264 \mu\text{g}/\text{m}^3$ registriert, während auf der Alpennordseite der Spitzenwert bei $206 \mu\text{g}/\text{m}^3$ lag. Der Jahresmittelgrenzwert für PM_{2.5} wurde noch an einem Standort des NABEL überschritten. Die Grenzwerte für Stickstoffdioxid wurden entlang von stark befahrenen städtischen Strassen und Autobahnen überschritten. 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 2019Schadstoffe: Schwefeldioxid (SO₂), Stickstoffdioxid (NO₂), Ozon (O₃), 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/m ³	NO ₂ JMW µg/m ³	NO ₂ d>IGW	O ₃ P98 µg/m ³	O ₃ h>IGW	PM10 JMW µg/m ³	PM10 d>IGW	PM2.5 JMW µg/m ³
Städtisch, verkehrsbelastet	BER	–	33	0	134	101	19	4	11,3
	LAU	–	32	0	142	79	14	0	9,2
Städtisch	LUG	1,6	25	0	203	652	14	1	9,8
	ZUE	0,8	24	0	159	308	14	0	9,5
Vorstädtisch	BAS	1,1	17	0	178	328	13	1	8,9
	DUE	0,8	22	0	160	330	13	0	9,0
Ländlich, Autobahn	HAE	0,6	32	0	157	182	14	0	9,7
	SIO	–	30	2	137	126	15	0	7,6
Ländlich, unterhalb 1000 m	MAG	1,3	15	0	171	449	15	3	9,9
	PAY	0,3	12	0	151	253	11	0	7,8
	TAE	–	11	0	162	282	11	0	7,8
	BRM	–	7,9	0	171	486	9,7	0	–
Ländlich, oberhalb 1000 m	CHA	–	5,0	0	163	634	6,5	0	–
	RIG	0,14	4,8	0	165	620	6,9	0	4,9
	DAV	–	2,9	0	121	22	4,1	0	–
Hochgebirge	JUN	0,04	0,2	0	112	3	2,5	0	–
Immissionsgrenzwert		30	30	1	100	1	20	3	10

3 Besonderheiten 2019

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

Gegen Ende Juni 2019 stieg an allen Messstationen des NABEL die Konzentration von Feinstaub (PM10) von einem Tag zum andern deutlich an. Ein solch rascher Anstieg kann lokal durch eine starke Feinstaubquelle in unmittelbarer Nähe einer Messstation verursacht werden, wie z.B. durch Bauarbeiten oder ein Feuer. Dass die Konzentration von PM10 aber an allen Messstationen des NABEL anstieg, deutet auf eine grossräumige Ursache hin. Insbesondere war die Zunahme der Feinstaubbelastung auch an ländlichen Standorten abseits von Verkehrswegen oder industriellen Anlagen zu beobachten (Abb. 5). Auf dem Jungfrauoch wurden bereits am 25. Juni 2019 hohe Werte von PM10 gemessen, an den tiefer im Mittelland gelegenen Stationen ab dem 26. Juni 2019. An diesen Tagen wiesen die Filter zudem eine markante, rötliche Färbung auf, was auf einen hohen Anteil von Gesteinsstaub hindeutet. Eine chemische Analyse des Feinstaubs

zeigt denn auch parallel zum Anstieg des PM10 eine Zunahme von Calcium, einem charakteristischen Bestandteil von Gesteinsabrieb, hier von Saharastaub (Abb. 5). An diesen Junitagen ist mit Saharastaub beladene Luft über die Alpen transportiert worden, was auch durch Analysen des europäischen Erdbeobachtungsprogramms Copernicus bestätigt wird (Abb. 6).

In der Sahara entstandener Staub kann durch den Wind weit verfrachtet werden. Er bleibt häufig weit über dem Boden und wird normalerweise nur an der hoch gelegene Station Jungfrauoch, auf rund 3500 m über Meer, gemessen. Gelegentlich aber sinkt die Luft nördlich der Alpen ab und transportiert den Saharastaub auch im Mittelland in Bodennähe. Häufiger wird der Hunderte bis Tausende Meter über Boden schwebende Saharastaub durch Regen ausgewaschen und bewirkt rötliche Niederschläge.

Seit einigen Jahren wird das Auftreten von Saharastaub auf dem Jungfrauoch durch optische Messungen verfolgt, wie auf der Homepage von MeteoSchweiz beschrieben.

Abb. 5: Konzentrationen von Feinstaub PM10 und Calcium als Indikator für Gesteinsabrieb, hier Saharastaub

Dargestellt sind die Tagesmittel an den ländlichen NABEL-Stationen Payerne und Rigi-Seebodenalp sowie an der hochalpinen Station Jungfrauoch. Die durchgezogenen Linien zeigen PM10 mit der linken Achse als Skala, die gestrichelten Linien zeigen Calcium mit der rechten Achse als Skala.

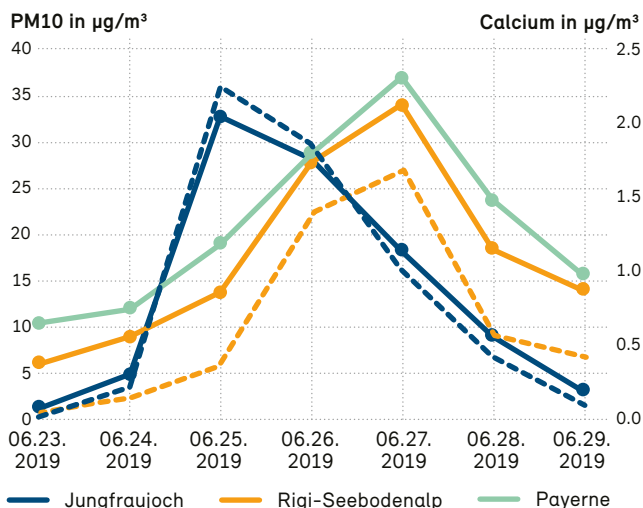
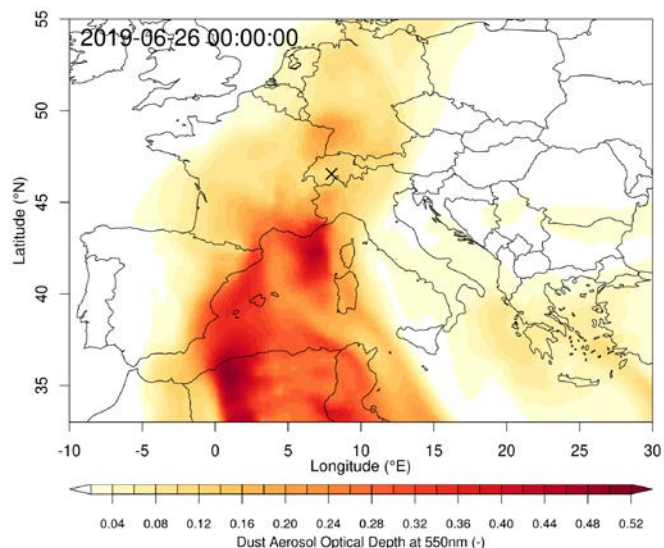


Abb. 6: Auswertungen des europäischen Erdbeobachtungsprogramms Copernicus zeigen den Transport von Saharastaub nach Mitteleuropa. Verteilung von Staubpartikeln über Nordafrika und weiten Teilen von Europa am 26.06.2019 dargestellt als Aerosol Optische Dichte (AOD). Die Verteilung der AOD basiert auf einer Kombination von Satellitendaten und Wettermodelldaten (Copernicus Atmospheric Monitoring Service, global NRT analysis, dust AOD).



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.

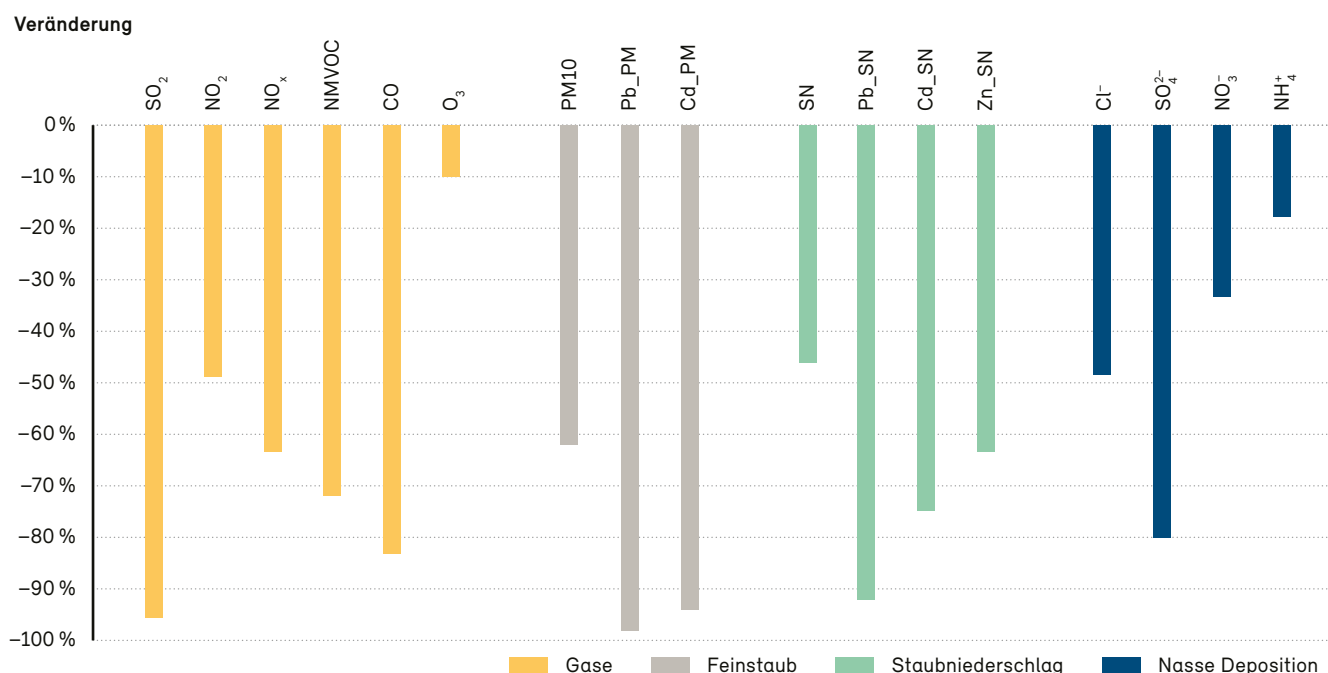
4.1 Entwicklung der Luftbelastung

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 Ab-

nahme 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 2019

Die Messdaten der NABEL-Stationen (ohne Davos und Jungfrauoch) 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_{PM10}), Cadmium im PM10 (Cd_{PM10}), Staubbiederschlag (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

Eine hohe Luftverschmutzung ist eine nachweisliche Ursache für Krankheiten und vorzeitige Todesfälle. Luftschadstoffe können beim Menschen auch in den in der Schweiz üblichen Konzentrationen sowohl akute wie auch chronische Wirkungen hervorrufen. Je nach Schadstoff sind einzelne Organe stärker betroffen: so die Atemwege durch Feinstaub PM10, Stickstoffdioxid, Ozon und Schwefeldioxid; das Herz-Kreislaufsystem durch die feineren Partikel PM2.5, ultrafeine Partikel, Stickstoffdioxid und Kohlenmonoxid; Nervensystem, Blut und Niere durch Blei; die Niere auch durch Cadmium.

PM10, PM2.5 und auch Russ haben sich als gute Indikatoren für das gesundheitlich relevante Schadstoffgemisch erwiesen. Je feiner die Partikel, desto tiefer können sie in die Lunge eindringen, das Reinigungssystem der Lunge schädigen und zu entzündlichen Reaktionen führen. Studien aus der USA zeigen, dass die Reduktion der Feinstaubbelastung (PM2.5) in den 80er- und 90er-Jahren zu rund 15 % der beobachteten Erhöhung der Lebenserwartung beigetragen haben könnte.

Stickstoffdioxid führt zu Entzündungserscheinungen in den Atemwegen und verstärkt die Reizwirkung von Allergenen. Nimmt kurzfristig die Stickstoffdioxid-Belastung der Aussenluft 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 Sterblichkeit erhöht.

Dieselerusspartikel, Benzol, polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) sowie Cadmium 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 Dieselerusspartikel am meisten zum luftschadstoffbedingten Krebsrisiko bei.

In einer Studie des Bundesamtes für Raumentwicklung (Ecoplan/Infras 2019: Externe Effekte des Verkehrs 2015), sind die Auswirkungen der Luftverschmutzung auf die menschliche Gesundheit in der Schweiz quantifiziert und als volkswirtschaftliche Kosten von gut 6 Milliarden Franken bewertet worden.

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 aktuellen 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. Neben den beobachteten direkten Wirkungen gasförmiger Luftschadstoffe, vor allem Ozon, tragen stickstoffhaltige Luftschadstoffe zur Bodenversauerung bei und bewirken eine grossflächige Überdüngung. 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 (aus Stickstoffdioxid und Schwefeldioxid), aber auch durch Ammoniak verursacht, die gasförmig, mit Staubpartikeln oder mit dem Regen transportiert werden. Russ führt zu einer Verschmutzung von Oberflächen. Organische Materialien wie Farbstoffe, Lacke, Gummi, Kunststoffe oder Textilfasern können durch Photooxidantien wie Ozon angegriffen, ausgebleicht und zerstört werden. Durch die Luftverschmutzung werden zudem Kulturdenkmäler unwiederbringlich zerstört.

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 Staubbiederschlag 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.

Als Ursache für die Staubbelastung in der Atmosphäre kommen sowohl motorisierter Verkehr, Feuerungen und Industrie, wie auch natürliche Quellen (z. B. Blütenstaub, vom Boden aufgewirbelter Staub) in Frage. Feinste schwerbefähige Staubpartikel, einschliesslich des lungengängigen Anteils, werden als Feinstaub (PM10) gemessen.

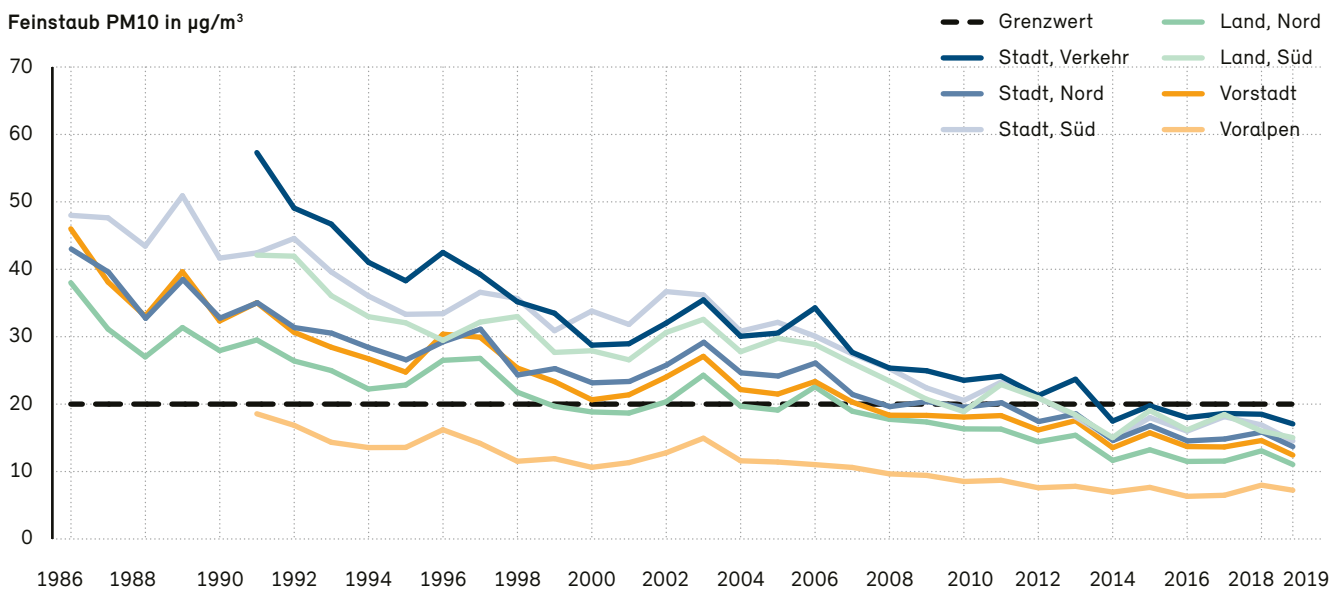
Feinstaub besteht aus primären, direkt als Teilchen emittierten Anteilen und aus sekundären Bestandteilen, welche sich erst in der Luft durch chemische und physikalische Prozesse aus gasförmigen Vorläufersubstanzen bilden.

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 Partikelemission 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 über 40% abgenommen und liegt heute in den Städten und Vorstädten unter $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Abb. 10 zeigt den Anteil von PM2.5 am PM10. An den meisten Standorten im Mittelland liegt dieser bei rund 75%. 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

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.



trockenen Wallis, wo der Anteil von grobem Mineralstaub erhöht ist.

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 polyzykli-

sche 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 (rund 8 %) an der

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

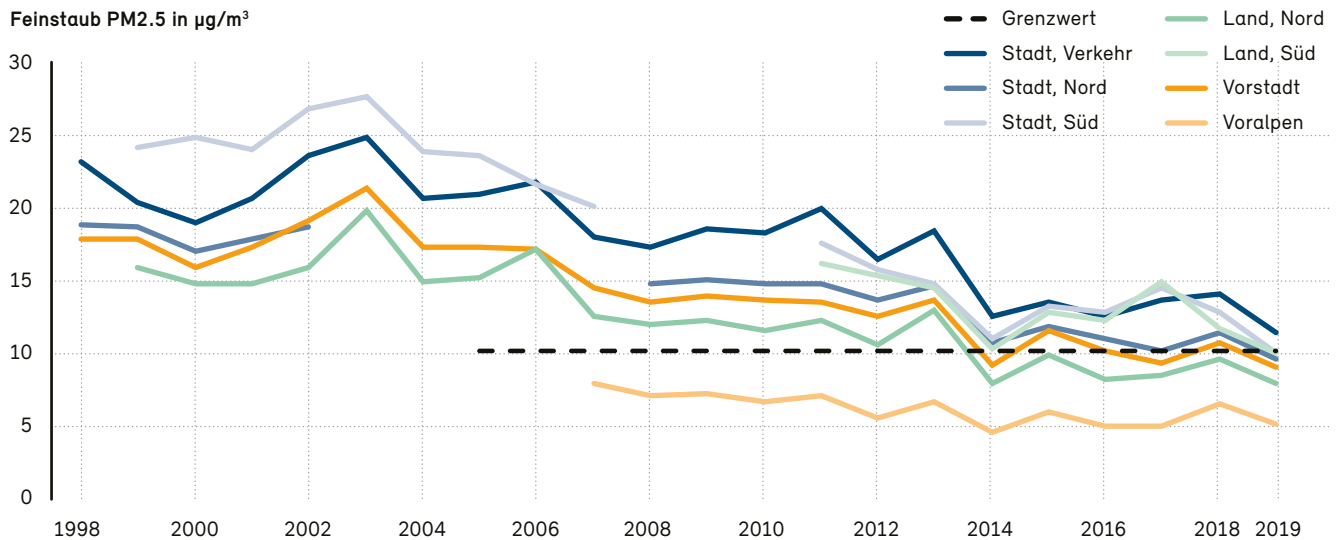
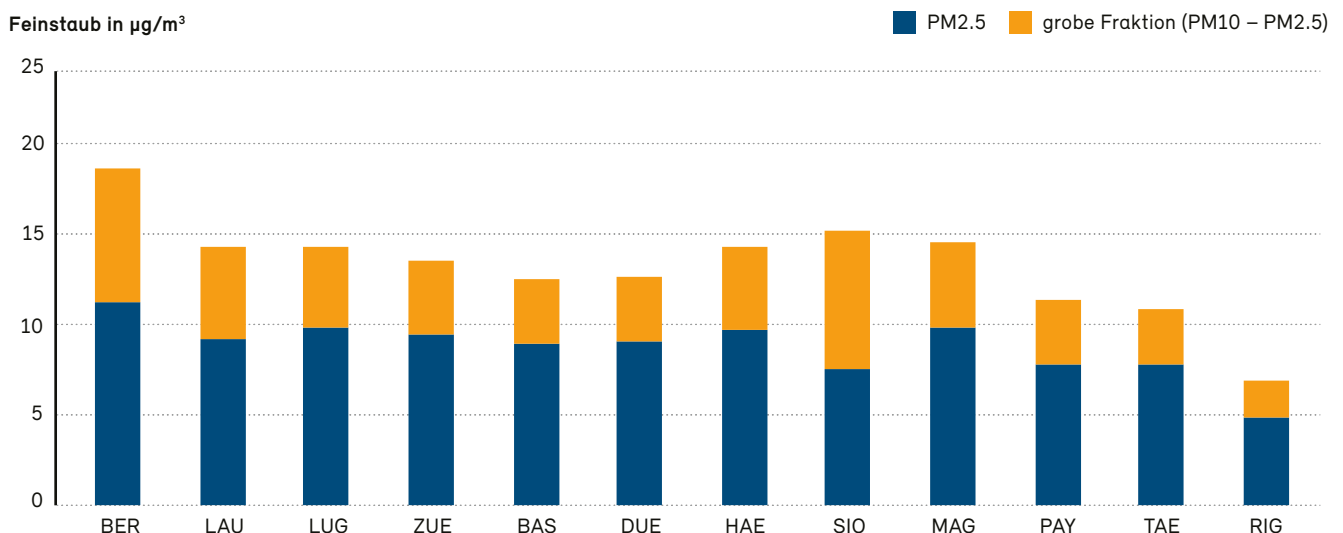


Abb. 10: Konzentrationen von PM2.5 und grober Fraktion im Jahr 2019

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



Massenkonzentration PM2.5 als an den anderen Standorten, wo der Anteil rund 5 % beträgt.

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 0,29 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 Gesamtd deposition 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

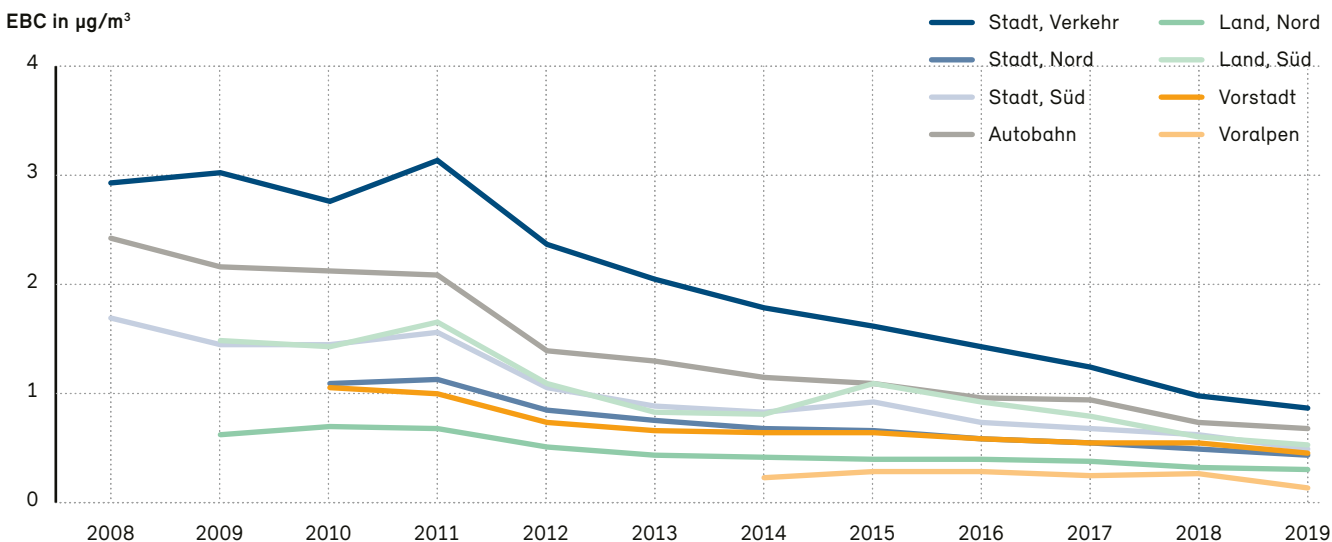
der Konzentration von PM10 (Abb. 8) und Stickstoffdioxid (Abb. 15) wurden die höchsten Werte in Verkehrsnähe gemessen, mit starken Schwankungen von Jahr zu Jahr.

5.2 Ozon

Ozon, ein farbloses Gas von etwas stechendem Geruch und geringer Löslichkeit in Wasser, ist eines der wichtigsten Spurengase in der Erdatmosphäre. In der Diskussion um die Umweltveränderungen durch den Menschen wird es im Zusammenhang mit drei verschiedenen Umweltproblemen erwähnt, dem Sommersmog, dem Ozonloch und dem Treibhauseffekt:

Im Sommer kommt es zu übermässigen Konzentrationen von bodennahem Ozon. Das bodennahe Ozon ist unerwünscht, da es wegen seiner Aggressivität und Giftigkeit den Menschen und die Umwelt direkt schädigen kann. 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.

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



Ozon ist eines der stärksten Oxidationsmittel und eines der stärksten Reizgase überhaupt. 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 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 fest-

Abb. 12: Jahresmittel der Partikelanzahlkonzentration

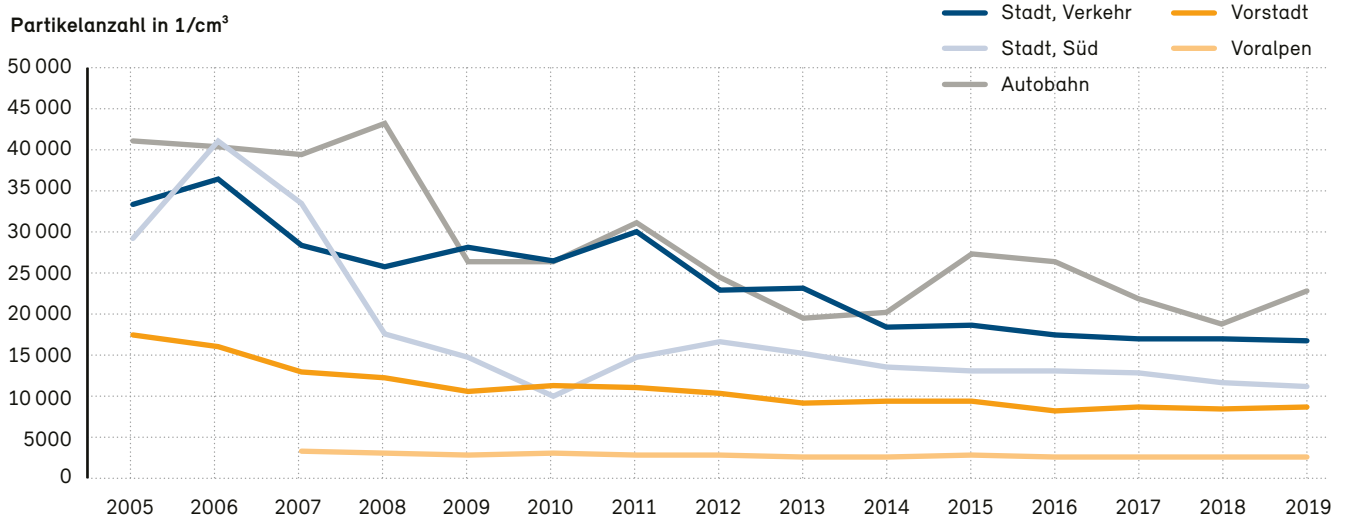
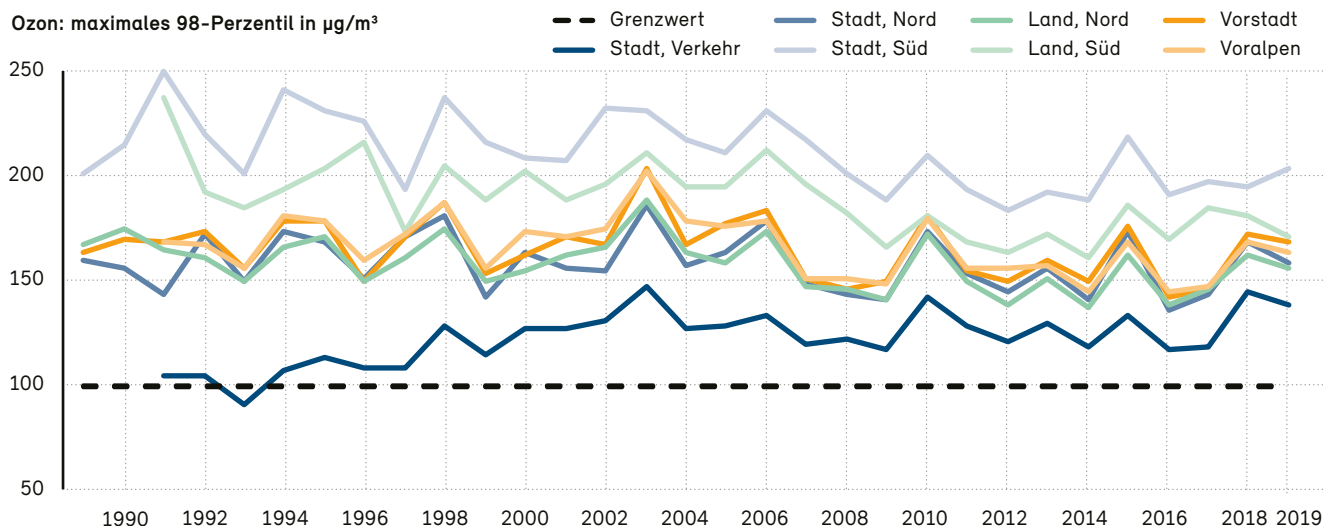


Abb. 13: Maximales monatliches 98-Perzentil der Halbstundenmittel von Ozon



gelegte Immissionsgrenzwert von $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 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.

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 Stickstoff-

monoxid 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, wobei Kinder speziell betroffen sind. 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

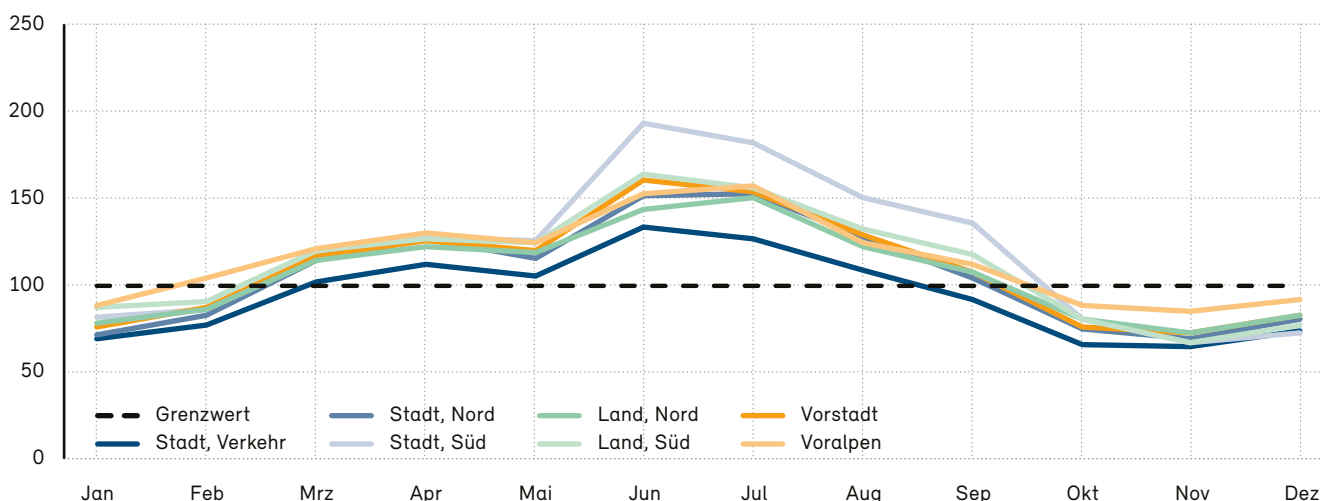
Die Entwicklung der Belastung durch Stickstoffdioxid ist in Abb. 15 gezeigt. An allen Standorten hat die Konzentration von Stickstoffdioxid in den letzten Jahrzehnten abgenommen. Nur an verkehrsexponierten Messstandorten wurde der Jahresmittelgrenzwert im Jahr 2019 überschritten, an allen anderen NABEL-Standorten wurde der Jahresgrenzwert eingehalten. An einem unmittelbar an der Autobahn gelegenen Standort wurde der Tagesmittelgrenzwert an zwei Tagen überschritten (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 Stand-

Abb. 14: Monatliche 98-Perzentilwerte der Halbstundenmittel von Ozon im Jahr 2019

Ozon: monatliches 98-Perzentil in $\mu\text{g}/\text{m}^3$



orten wird mit Passivsammlern die Ammoniakkonzentration gemessen. 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.

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,

Abb. 15: Jahresmittel von Stickstoffdioxid

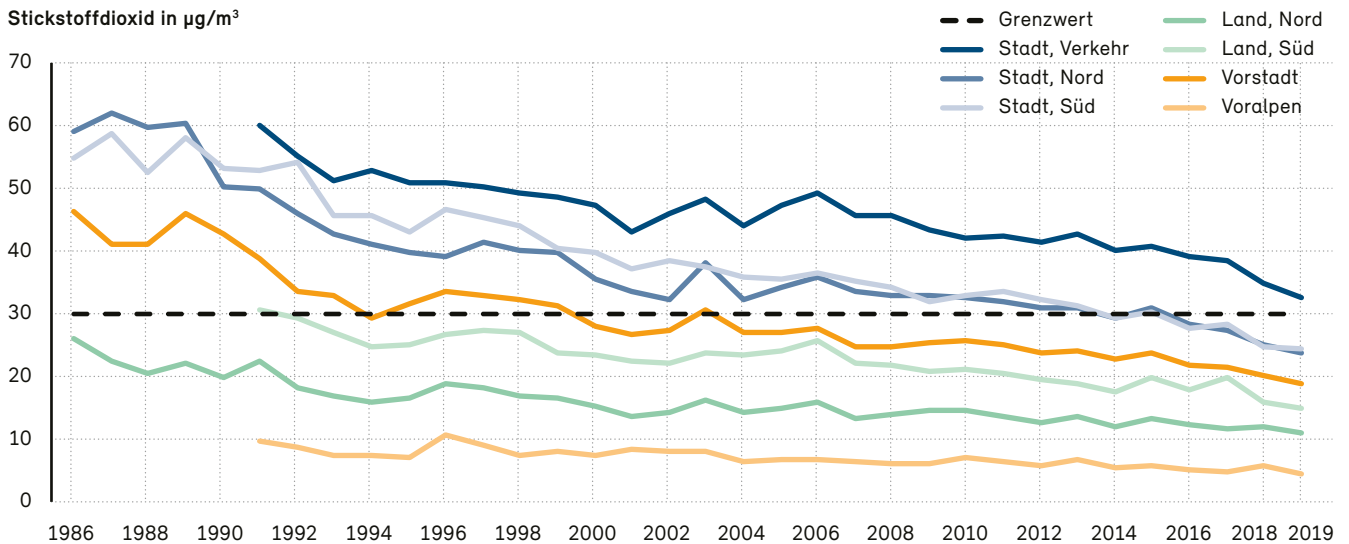
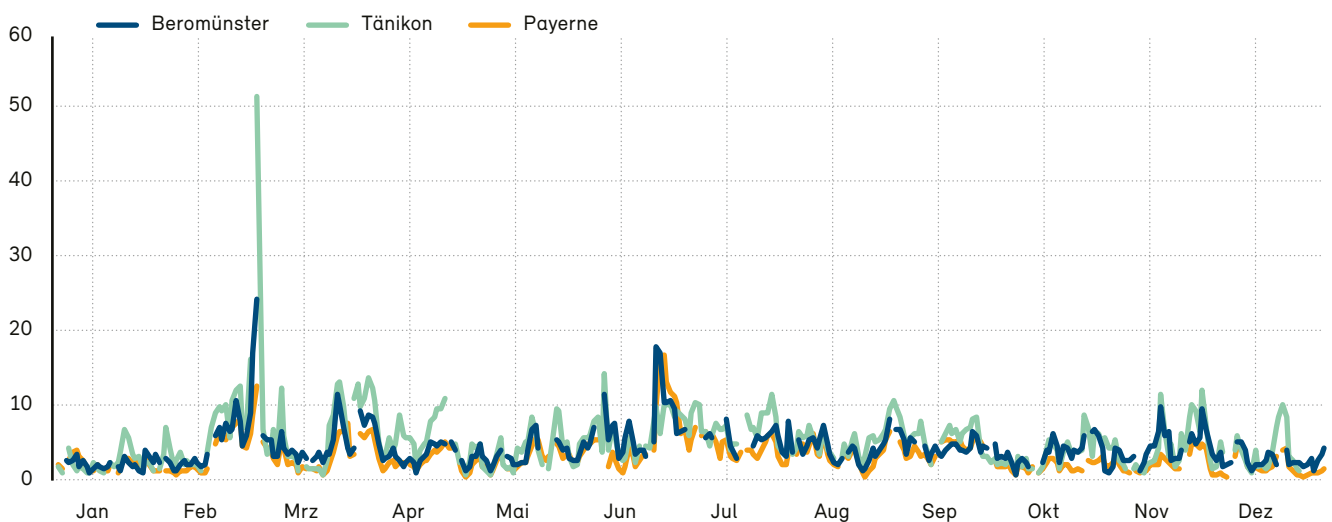


Abb. 16: Tagesmittel von Ammoniak im Jahr 2019

Ammoniak wird an drei ländlichen NABEL-Standorten kontinuierlich gemessen.

Ammoniak in µg/m³



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 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 widerspiegelt. Die Jahresfrachten von reaktivem Stickstoff in der Form von Nitrat und Ammonium im Niederschlag haben in den letzten Jahrzehnten nur wenig abgenommen (Abb. 19 und 20).

5.5 Weitere gasförmige Luftschadstoffe

Schwefeldioxid

Schwefeldioxid ist ein farbloses, in höheren Konzentrationen stechend riechendes, gut wasserlösliches Reizgas.

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

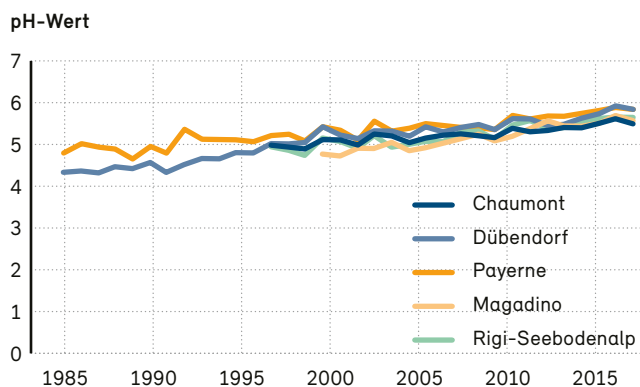


Abb. 18: Jahresfracht von Sulfat im Niederschlag

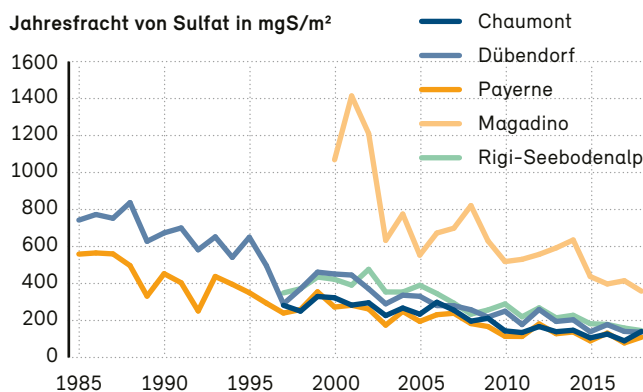


Abb. 19: Jahresfracht von Nitrat im Niederschlag

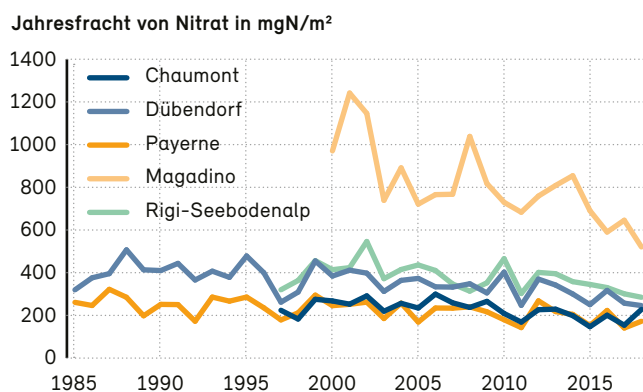
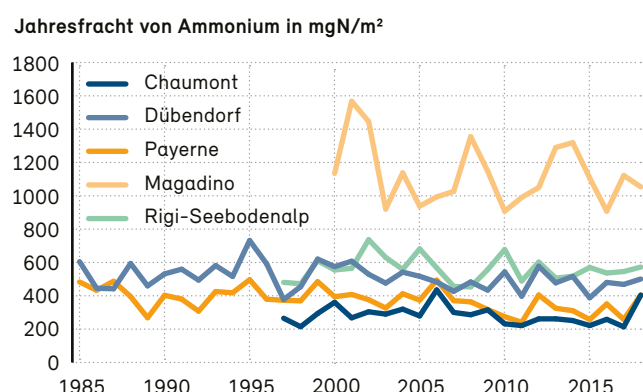


Abb. 20: Jahresfracht von Ammonium im Niederschlag



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 Sechstel 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), 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. Kohlenmonoxid ist deshalb für den Menschen und die warmblütigen Tiere ein Atemgift. Die Belastung durch Kohlenmonoxid konnte durch Verbesserung der Verbrennungsvorgänge und durch Abgasnachbehandlung stark reduziert werden. Der Tagesgrenzwert von 8 mg/m³ wird heute an allen

NABEL-Standorten eingehalten, liegen doch alle gemessenen Tagesmittel unter 1 mg/m³.

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 0,7 µg/m³ und damit weit unter dem Richtwert der EU von 5 µg/m³.

Abb. 21: Jahresmittel von Schwefeldioxid

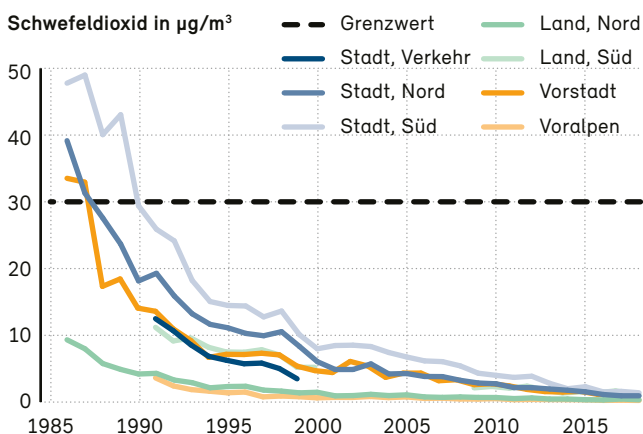
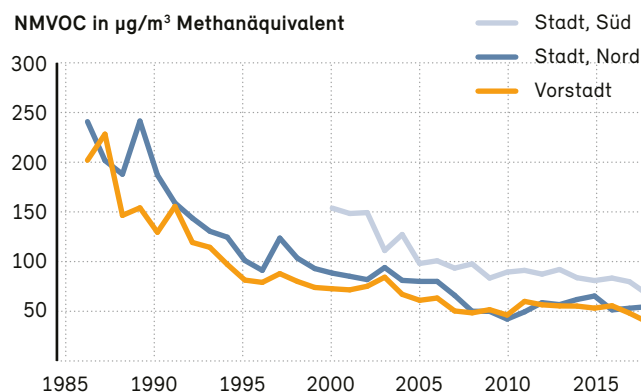


Abb. 22: Jahresmittel von flüchtigen organischen Verbindungen ohne Methan (NMVOC)



5.6 Treibhausgase

In der Forschungsstation Jungfraujoch werden durch das NABEL auch Treibhausgase gemessen. Aufgrund der Lage von 3580m 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 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.

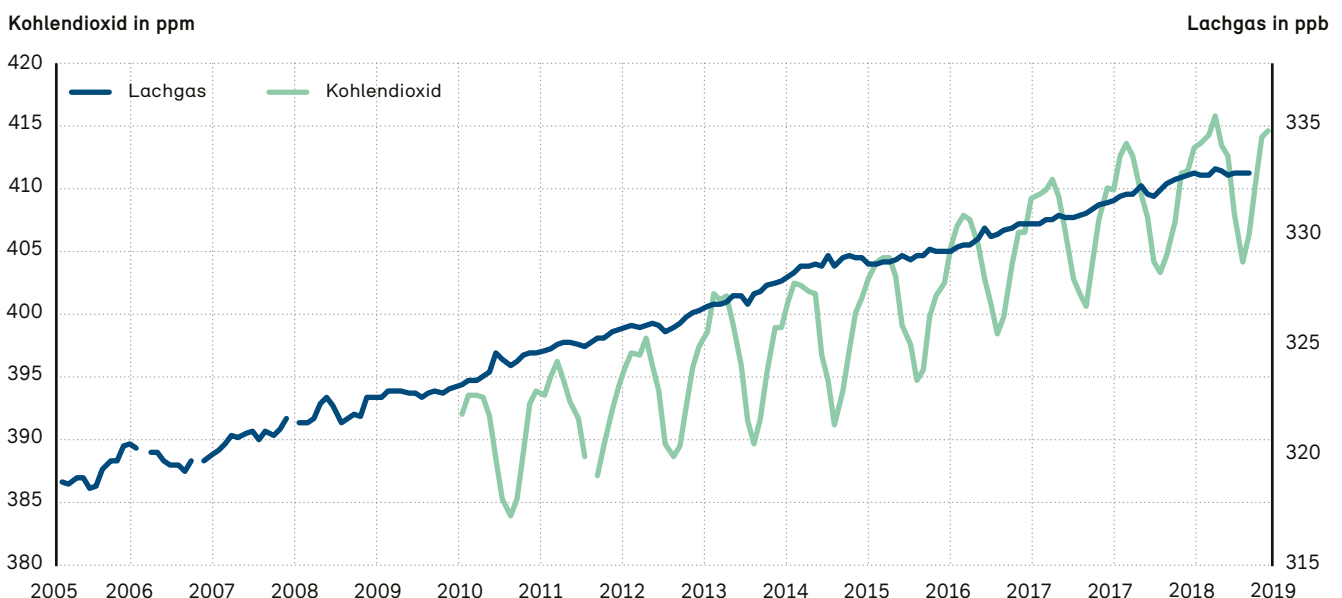
Die Konzentration von Kohlendioxid (CO_2) weist einen ausgeprägten Jahresgang auf, welcher im Wesentlichen die Aufnahme von Kohlendioxid durch die Vegetation im Sommerhalbjahr widerspiegelt. Die Konzentration von Lachgas (Distickstoffmonoxid, N_2O) hat seit dem Messbeginn im Jahre 2005 über drei Prozent zugenommen. Lachgas wird aus stark gedüngten Böden und bei Ver-

brennungsvorgängen 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 und Trichlorethan 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 (CCl_3F) 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 keine Quellen von F11 vorhanden sind. Das als Lösungsmittel verwendete 1,1,1-Trichlorethan

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



(CH_3CCl_3) 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 Klimaanlage in Autos und für die Schäumung von 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.

Abb. 24: Monatsmittel von Methan auf dem Jungfraujoch

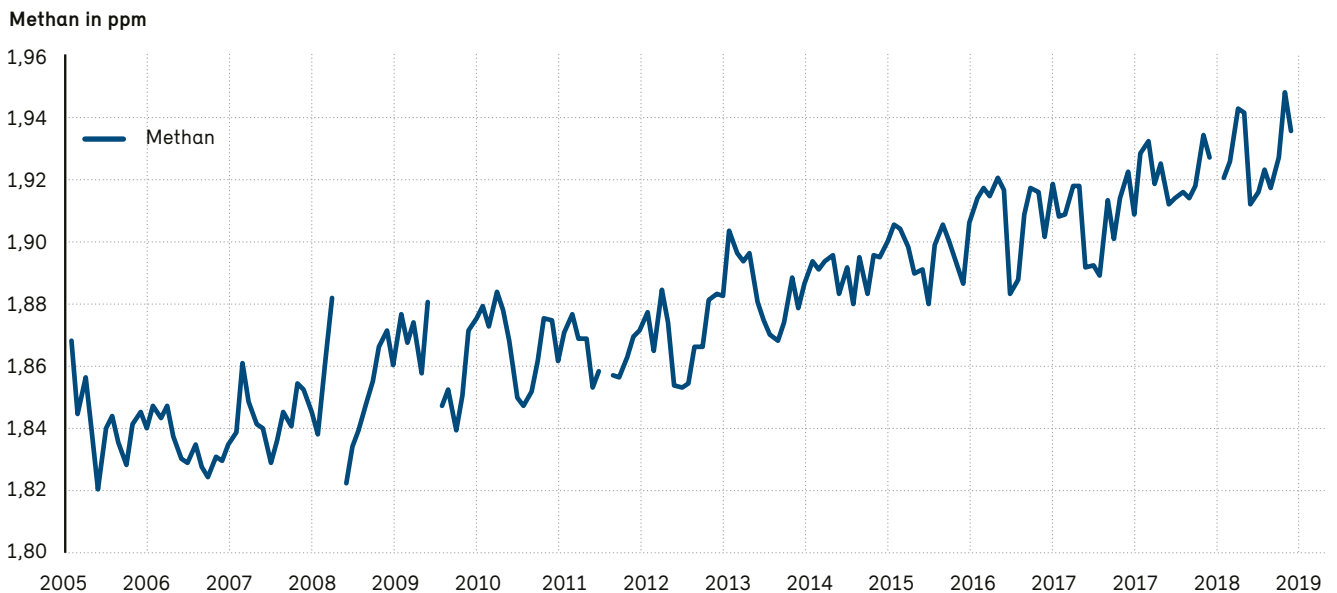
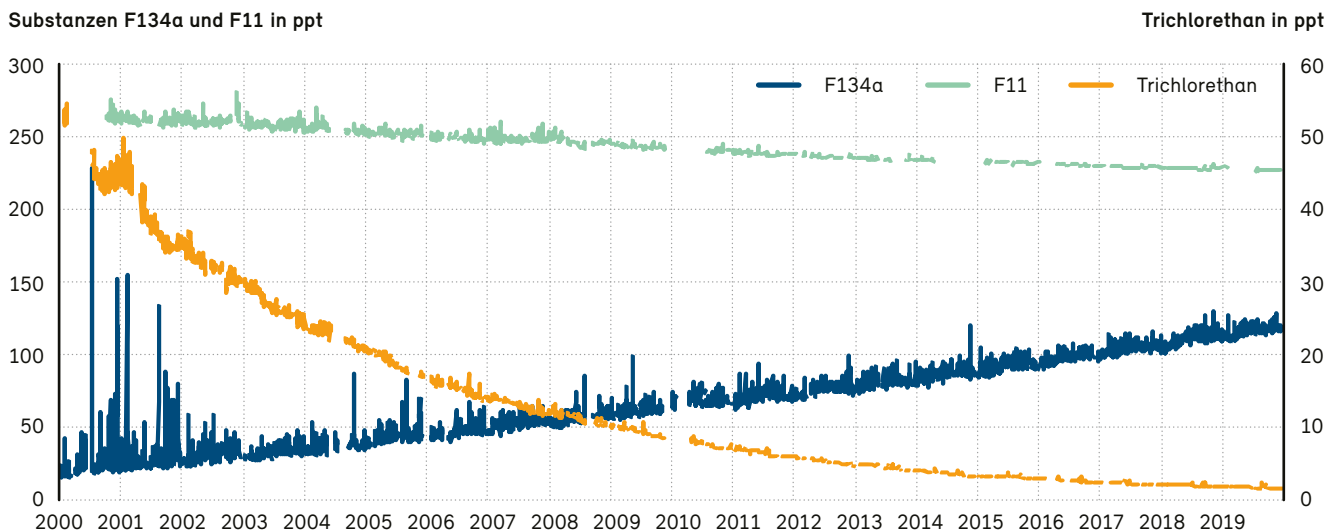


Abb. 25: Tagesmittel von halogenierten Verbindungen auf dem Jungfraujoch

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



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 oder schwefelhaltige Brennstoffe) 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 Stickstoffdioxid und Feinstaub wurden die Grenzwerte im Jahr 2019 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 Emissionsminderung 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 im NABEL gemessenen Konzentrationen und die Emissionsmenge wurden so skaliert, dass das Jahr 2000 100 % entspricht.

Schwefeldioxid, Jahr 2000: 100 %

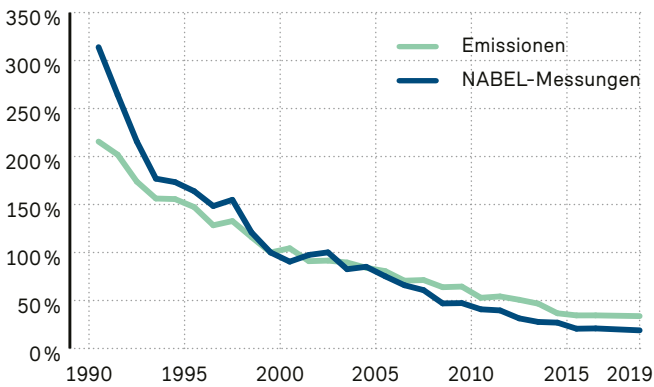


Abb. 27: Entwicklung der im NABEL gemessenen Aussenluftkonzentration und der Emissionen von Stickoxiden

Stickoxide bezeichnet die Summe von Stickstoffmonoxid und Stickstoffdioxid.

Stickoxide, Jahr 2000: 100 %

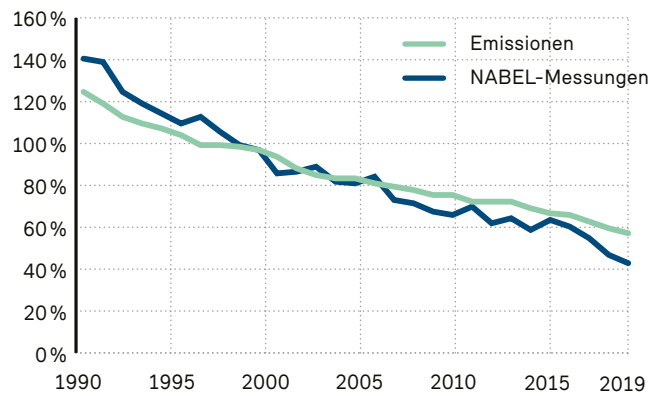


Abb. 28: Entwicklung der im NABEL gemessenen Aussenluftkonzentration und der Emissionen von NMVOC

NMVOC bezeichnet die flüchtigen organischen Verbindungen ohne Methan.

NMVOC, Jahr 2000: 100 %

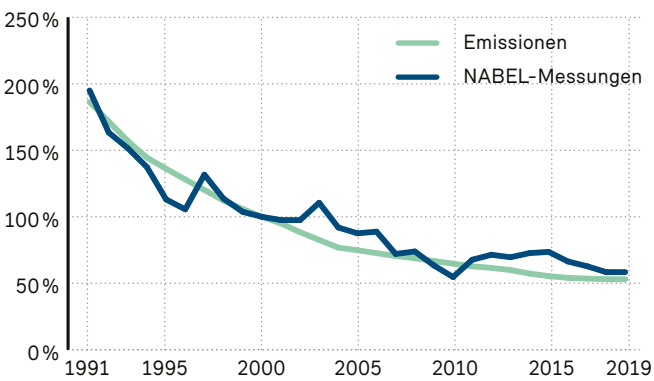
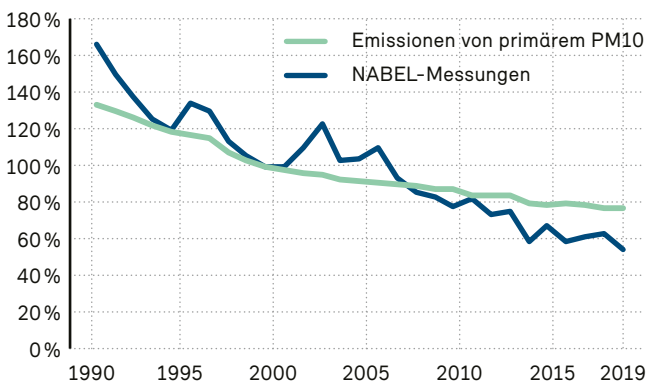


Abb. 29: Entwicklung der im NABEL gemessenen Aussenluftkonzentration und der Emissionen von PM10

Nur die Emissionen von primärem PM10 wurden berücksichtigt.

Feinstaub PM10, Jahr 2000: 100 %



Anhang






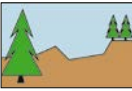
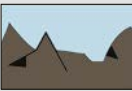
Gemäss Artikel 39 Absatz 1 der Luftreinhalte-Verordnung (LRV) vom 16. Dezember 1985 führt das Bundesamt für Umwelt Erhebungen über die Luftverschmutzung im gesamtschweizerischen Rahmen durch. Das NABEL dient insbesondere der Erfüllung dieser gesetzlichen Aufgabe. Es ist somit ein wichtiges Vollzugsinstrument 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 30 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

Tab. 2: Klassierung der NABEL-Stationen nach Standorttyp

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

Projekte ergänzt. Beispielsweise werden auf dem Jungfrau-Joch 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 Meteo-Schweiz-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/bafu/de/home/themen/luft.html

Detaillierte Messergebnisse des NABEL 2019: www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/luft/zustand/daten/luftbelastung--historische-daten/jahres--und-monatsberichte-nabel.html

Beschrieb des NABEL-Messnetzes: www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/luft/zustand/daten/nationales-beobachtungsnetz-fuer-luftfremdstoffe--nabel-.html

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

Ausführliche Informationen zum Thema Luftbelastung: www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/luft/zustand/daten.html

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

Weitere Berichte zum NABEL: www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/luft/zustand/daten/nationales-beobachtungsnetz-fuer-luftfremdstoffe--nabel-/berichte-des-nabel.html

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: <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/luft/publikationen-studien/publikationen/luftverschmutzung-und-gesundheit.html>

Kosten der gesundheitlichen Auswirkungen von Luftverschmutzung: www.are.admin.ch/are/de/home/verkehr-und-infrastruktur/grundlagen-und-daten/kosten-und-nutzen-des-verkehrs.html