

Luftqualität 2018

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 2018

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.) 2019: Luftqualität 2018. Messresultate des
Nationalen Beobachtungsnetzes für Luftfremdstoffe (NABEL).

Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt-Zustand Nr. 1916: 28 S.

Gestaltung

Cavelti AG, Marken. Digital und gedruckt, Gossau

Titelbild

NABEL-Messstation Lausanne.

Bild: Empa

PDF-Download

www.bafu.admin.ch/uz-1916-d

Eine gedruckte Fassung kann nicht bestellt werden.

Diese Publikation ist auch in französischer Sprache verfügbar.

Die Originalsprache ist Deutsch.

© BAFU 2019

Inhaltsverzeichnis

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

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

1	Luftbelastung in der Schweiz 2018	7
1.1	Vergleich mit Immissionsgrenzwerten	7
1.2	Räumliche Verteilung der Luftbelastung	8

2	Luftbelastung an den NABEL-Stationen 2018	10
2.1	Vergleich mit Immissionsgrenzwerten	10

3	Besonderheiten 2018	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	22

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 2018, exceedances of the ambient air quality standards were partially observed for ozone, respirable fine particulates (PM10 and PM2.5) and nitrogen dioxide. The standards for sulphur dioxide, carbon monoxide, dust fall, and heavy metals were respected 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. Bei den Schadstoffen Ozon, Feinstaub (PM10 and PM2.5) und Stickstoffdioxid wurden im Jahr 2018 die Immissionsgrenzwerte teilweise überschritten. An den NABEL-Stationen werden die Grenzwerte für Schwefeldioxid, Kohlenmonoxid, Staubbiederschlag und die Schwermetalle 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 et sur la base des mesures cantonales. En 2018, les valeurs limites d'immission pour l'ozone, les fines particules respirables (PM10 et PM2,5) et le dioxyde d'azote ont été partiellement dépassées. Celles pour le dioxyde de soufre, le monoxyde de carbone, les retombées de poussières et les métaux lourds ont pu être respectées dans toutes les stations NABEL. La qualité de l'air s'est nettement améliorée au cours des 30 dernières années 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 2018 sono stati in parte superati i valori limite d'immissione di ozono, polveri fini (PM10 e PM2.5) e diossido di azoto. Presso le stazioni NABEL i valori limite del biossido di zolfo, del monossido di carbonio, della precipitazione di polveri e dei metalli pesanti 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

Am 11. April 2018 hat der Bundesrat die Änderung der Luftreinhalte-Verordnung genehmigt mit Verschärfungen von Emissionsgrenzwerten und der Festlegung eines Immissionsgrenzwertes für Feinstaub mit einem Durchmesser von weniger als 2,5 Mikrometern (PM_{2.5}). Der Grenzwert von 10 µg/m³ für das Jahresmittel entspricht den Empfehlungen der Weltgesundheitsorganisation und ergänzt die bestehenden Grenzwerte für PM₁₀. Im Nationalen Beobachtungsnetz für Luftfremdstoffe (NABEL) wird PM_{2.5} bereits seit 1998 an ausgewählten Standorten gemessen. Diese Messungen dokumentieren die Entwicklung der Belastung durch PM_{2.5} über die letzten 20 Jahre und sind Grundlage für eine Beurteilung der gesundheitlichen Auswirkungen von PM_{2.5} in der Schweiz.

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.

Die Messungen belegen den Erfolg der bisherigen Luftreinhaltepolitik von Bund, Kantonen und Gemeinden. Die Qualität der Luft ist seit 1985 deutlich besser geworden. 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 insbesondere 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 Luftreinhaltepolitik ist unabdingbar, um auch die verbleibenden übermässigen Immissionen nachhaltig zu beseitigen.

Dazu sind Massnahmen zur Verminderung der Schadstoffemissionen nötig. Insbesondere der Ausstoss von Stickoxiden, Ammoniak, flüchtigen organischen Verbindungen, lungengängigem Feinstaub sowie krebserregenden Stoffen (z. B. Dieselmotoren, Benzo(a)pyren oder Benzol) muss noch weiter gesenkt werden. Die technischen Möglichkeiten zur Emissionsminderung sollen bei allen Quellen ausgeschöpft 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 2018

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 zur Luftbelastung zu erhalten.

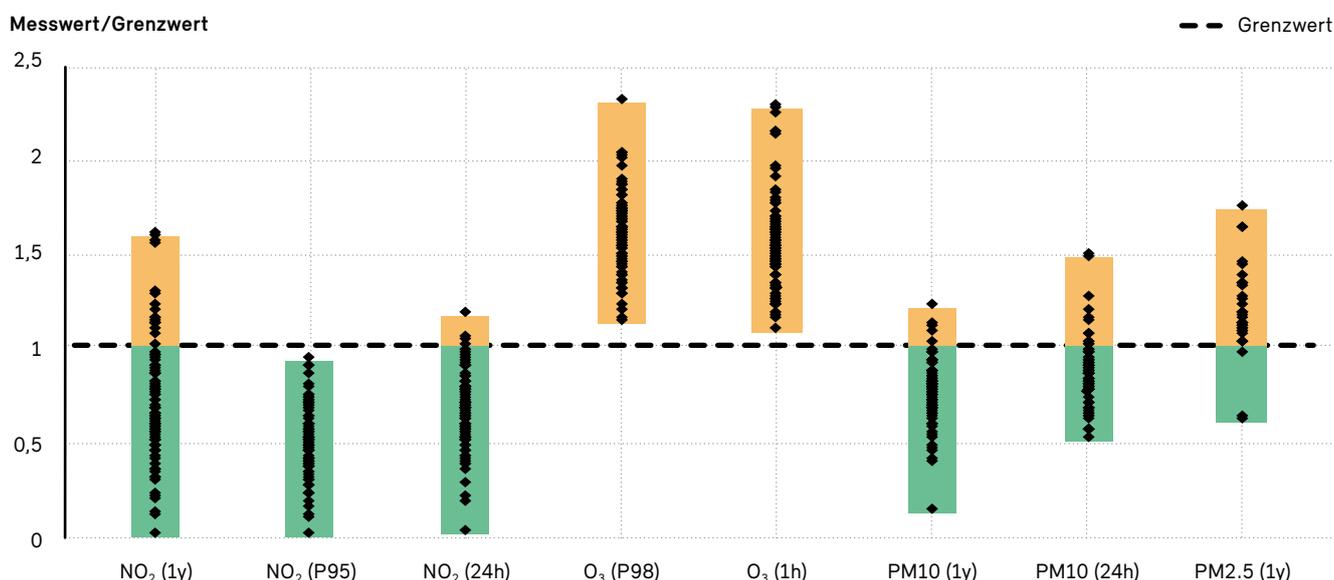
1.1 Vergleich mit Immissionsgrenzwerten

Die Luftqualität in der Schweiz wird anhand der Immissionsgrenzwerte der Luftreinhalte-Verordnung beurteilt. Die Immissionsgrenzwerte für die Jahresmittel von Schwefeldioxid, Staubbiederschlag, Schwermetallen im Feinstaub und Schwermetalldeposition sowie auch für das Tagesmittel von Kohlenmonoxid sind an fast allen Standorten in der Schweiz eingehalten oder sogar deutlich unterschritten. Einzelne hohe Belastungen durch diese Schadstoffe treten noch in unmittelbarer Nähe von grossen Industrieanlagen auf, sind aber kein

grossflächiges Problem in der Schweiz. So wurde 2018 der Immissionsgrenzwert für die Zinkdeposition nur an zwei Standorten in der Nähe eines metallverarbeitenden Betriebs überschritten. Die Immissionsgrenzwerte von Feinstaub (PM10 und PM2.5), Stickstoffdioxid und Ozon hingegen werden noch teilweise überschritten und diese Schadstoffe stellen in der Schweiz ein lufthygisches Problem dar. Abb. 1 zeigt die Schadstoffkonzentrationen dieser Schadstoffe, wie sie an den Schweizer Messstationen von Bund, Kantonen und Städten gemessen wurden, im Vergleich zu den Immissionsgrenzwerten. Beim Stickstoffdioxid ist an mehreren Standorten der Jahresmittelgrenzwert überschritten, während nur vereinzelte Überschreitungen des Tagesmittelgrenzwertes auftreten. Beim Feinstaub PM10 hingegen wird der Tagesmittelgrenzwert an vielen Standorten überschritten, während der Jahresmittelwert an den meisten Standorten eingehalten ist. Die Grenzwerte für Ozon werden an allen Standorten überschritten.

Abb. 1: Vergleich der gemessenen Luftbelastung mit den Immissionsgrenzwerten für das Jahr 2018

Quotient aus der im Jahr 2018 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 pro Jahr erlaubt. Deshalb wurde der zweithöchste 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 2018 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 werden in den städtischen und vorstädtischen Gebieten nur noch an Hauptverkehrsstrassen überschritten. Abseits der Hauptverkehrsstrassen liegen die Konzentrationen von Stickstoffdioxid in der Regel unter dem Grenzwert. Im ländlichen Raum werden die Immissionsgrenzwerte für Stickstoffdioxid, mit Ausnahme von Korridoren entlang der Autobahnen, eingehalten.

Feinstaub

Abb. 3 zeigt die räumliche Verteilung der Jahresmittel 2018 von Feinstaub (PM₁₀). Die Konzentration von lungengängigem Feinstaub liegt in den Städten im Bereich des Immissionsgrenzwerts und auf dem Land deutlich darunter. Die höchsten Konzentrationen werden im Tessin gemessen. Der Stadt-Land Gegensatz ist beim PM₁₀ weniger stark ausgeprägt als beim Stickstoffdioxid. Zwei Ursachen sind dafür verantwortlich. Rund die Hälfte der PM₁₀-Belastung besteht 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 liegt 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 Halbstundenmittelwerte

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 wird im überwiegenden Teil der Schweiz deutlich überschritten. Entlang von Strassen werden zum Teil niedrigere Ozonwerte gemessen, da das in grossen Mengen vorkommende 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 noch zu hoch. Damit wird die Biodiversität in diesen Gebieten gefährdet.

Abb. 2: Karte der Jahresmittel von Stickstoffdioxid für das Jahr 2018 (Grenzwert $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$)

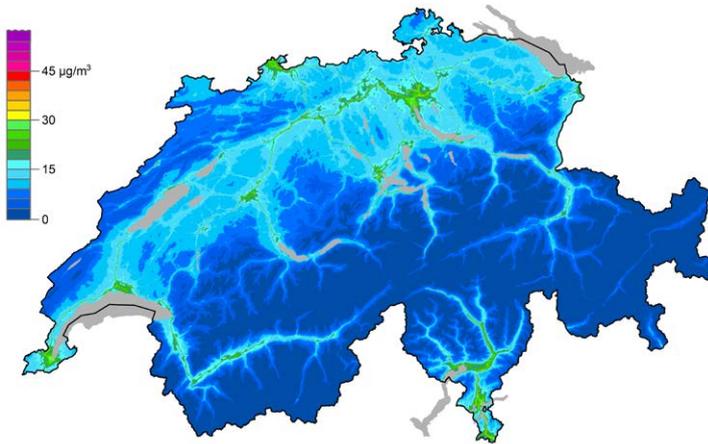


Abb. 3: Karte der Jahresmittel von Feinstaub (PM10) für das Jahr 2018 (Grenzwert $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$)

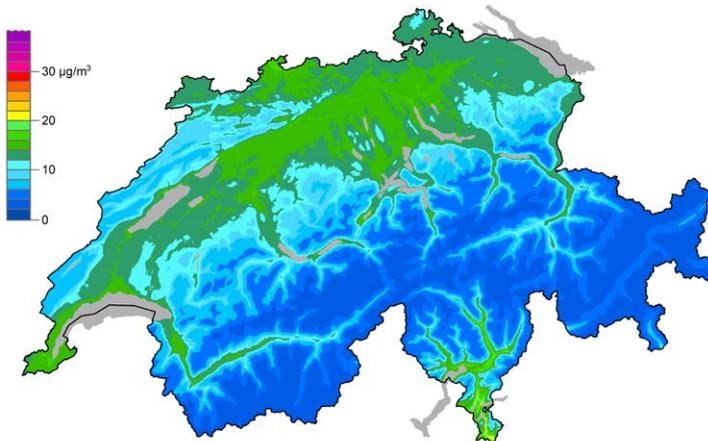
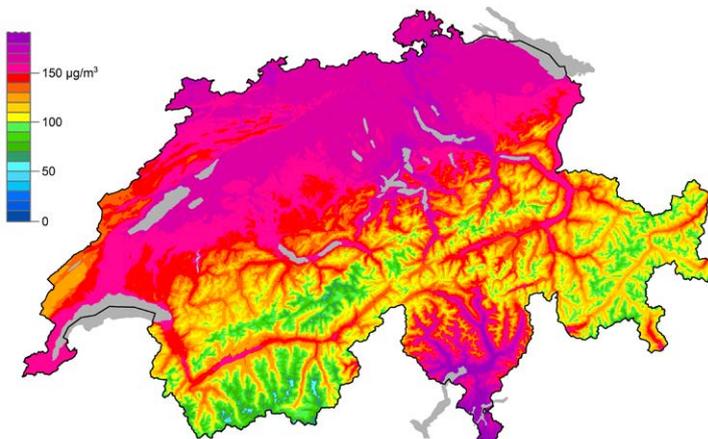


Abb. 4: Karte der höchsten monatlichen 98-Perzentilwerte von Ozon für das Jahr 2018 (Grenzwert $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$)



2 Luftbelastung an den NABEL-Stationen 2018

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 2018 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 werden die Ozongrenzwerte überschritten, wobei die höchsten Ozonbelastungen im Tessin, an den Stationen Lugano und Magadino, gemessen werden. Im Tessin wurde auch der höchste Stundemittelwert von $233 \mu\text{g}/\text{m}^3$ registriert, während auf der Alpennordseite der Spitzenwert bei $195 \mu\text{g}/\text{m}^3$ lag. Der Jahresmittelgrenzwert für $\text{PM}_{2.5}$ wird an mehreren Standorten des NABEL überschritten. Die Grenzwerte für Stickstoffdioxid werden entlang von stark befahrenen städtischen Strassen und Autobahnen überschritten. Die übrigen Grenzwerte der Luftreinhalte-Verordnung für weitere Schadstoffe werden an allen NABEL Stationen eingehalten. So liegen die gemessenen Werte von Schwefeldioxid, Kohlenmonoxid und Schwermetallen deutlich unter den Immissionsgrenzwerten.

Tab. 1: Messwerte an den NABEL-Stationen für das Jahr 2018Schadstoffe: 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.

* Ausfall des Messgeräts

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	–	36	1	144	125	21	6	14,2
	LAU	–	33	0	146	129	16	0	–
Städtisch	LUG	1,4	25	0	195	799	17	8	12,3
	ZUE	1,0	25	0	169	509	16	3	11,4
Vorstädtisch	BAS	1,3	17	0	176	503	14	3	10,8
	DUE	0,9	23	0	169	499	15	2	10,7
Ländlich, Autobahn	HAE	0,5	34	0	159	299	16	2	11,2
	SIO	–	31	0	135	193	16	1	–
Ländlich, unterhalb 1000 m	MAG	1,2	16	0	181	566	16	3	11,0
	PAY	0,3	12	0	159	412	13	0	9,4
	TAE	–	12	0	166	481	13	1	–
	BRM	–	9,6	0	165	796	11	0	–
Ländlich, oberhalb 1000 m	CHA	–	5,8	0	168	853	7,5	0	–
	RIG	0,3	6,1	0	168	890	8,5	0	6,1
	DAV	–	3,4	0	120	22	*	*	*
Hochgebirge	JUN	0,02	0,2	0	128	48	2,6	0	–
Immissionsgrenzwert		30	30	1	100	1	20	3	10

3 Besonderheiten 2018

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

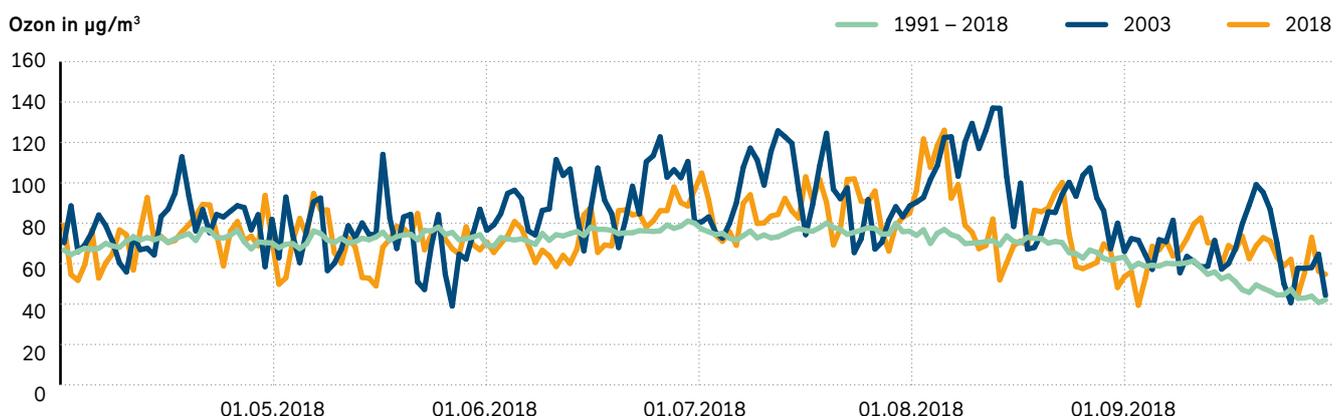
Die Schweiz registrierte im Jahr 2018 den drittwärmsten Sommer seit Messbeginn im Jahr 1864. Im landesweiten Mittel stieg die Sommertemperatur 2,0 Grad über die Norm 1981 – 2010. Heisser waren bisher nur der Sommer 2015 mit 2,3 Grad und der legendäre Hitzesommer 2003 mit 3,6 Grad über der Norm. Alle drei Sommermonate 2018 präsentierten sich sehr sonnig.

In der bodennahen Troposphäre wird Ozon unter intensiver Sonneneinstrahlung durch photochemische Reaktionen aus den sogenannten Vorläufersubstanzen (im Wesentlichen Stickstoffdioxid und flüchtige organische Verbindungen) gebildet. An windstillen Tagen mit hohen Temperaturen und starker Sonneneinstrahlung werden deshalb die höchsten Ozonkonzentrationen gemessen.

An den NABEL-Stationen wurden im Jahr 2018 deutlich höhere Ozonkonzentrationen gemessen als im Durchschnitt aller Jahre seit 1991 (Abb. 5). Noch höhere Ozonwerte wurden im Jahr 2003 mit seinem ausgeprägten Hitzesommer gemessen. Im Sommerhalbjahr von April bis September lag die mittlere Ozonkonzentration im Jahr 2018 rund $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ über dem langjährigen Mittel, im Jahr 2003 gar $14 \mu\text{g}/\text{m}^3$ darüber.

Abb. 5: Tagesmittel der Ozonkonzentration an der NABEL-Station Payerne

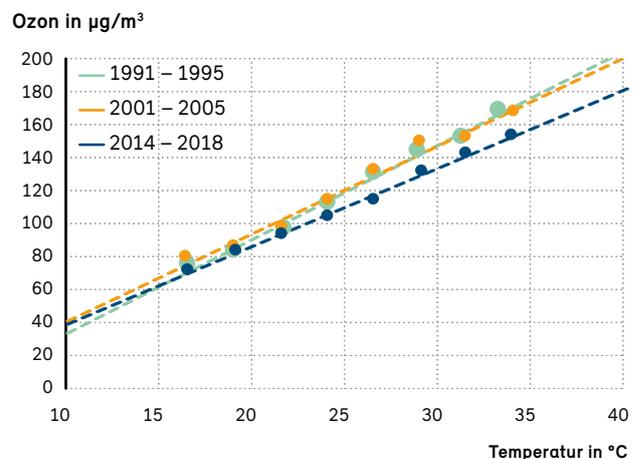
Der Verlauf der Konzentrationen im Sommerhalbjahr zeigt die hohen Konzentrationen der Jahre 2018 und 2003 gegenüber dem langjährigen Mittel 1991 – 2018.



Die Konzentrationen der Ozonvorläufersubstanzen haben in den letzten dreissig Jahren deutlich abgenommen. Entsprechend wird heute bei ähnlichen meteorologischen Bedingungen weniger Ozon über der Schweiz produziert und es treten weniger hohe Ozonwerte auf (Abb. 6). So wurden zum Beispiel auf der Alpennordseite im Extremjahr 2003 noch maximale Stundenwerte von über $240 \mu\text{g}/\text{m}^3$ gemessen, während dort im Jahr 2018 kein Stundenmittel über $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ registriert wurde.

Abb. 6: Abhängigkeit der Ozonkonzentration von der Temperatur

Pro Temperaturklasse ist der Median aller Stundenmittel der Ozonkonzentration von 12 bis 20 Uhr der Monate Juni bis August dargestellt. Ausgewertet wurden Messdaten der ländlichen NABEL-Standorte Payerne und Tänikon.



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.

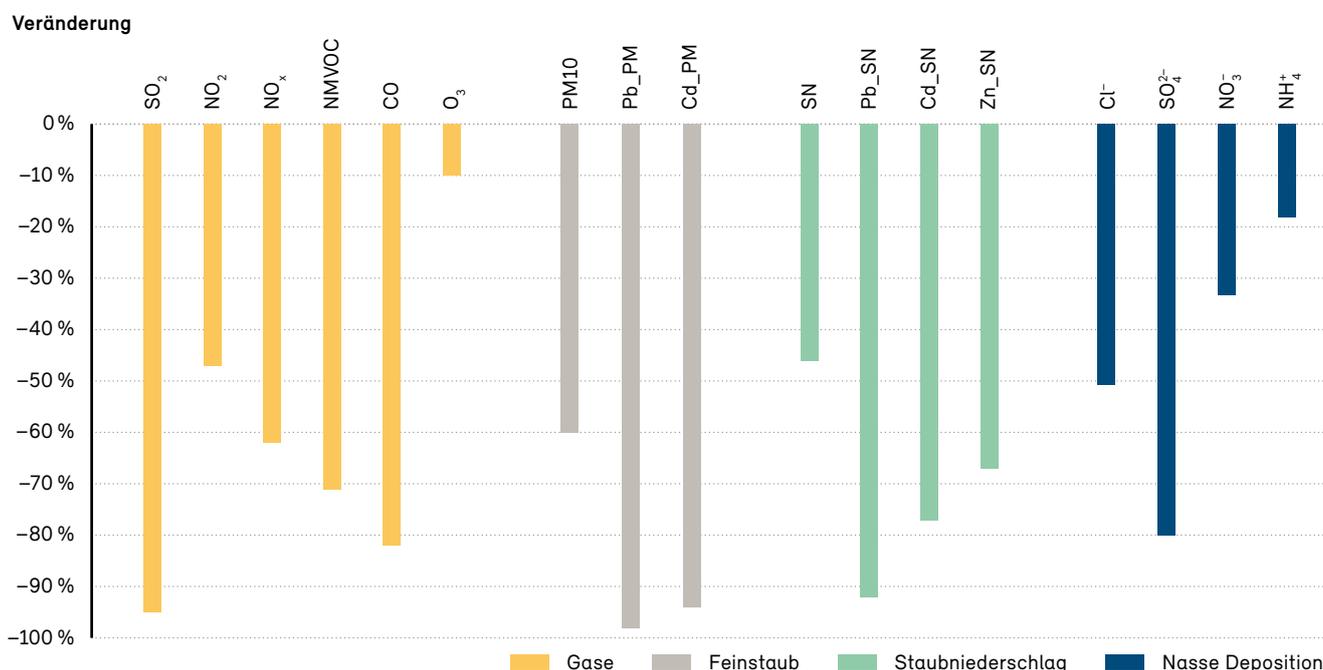
4.1 Entwicklung der Luftbelastung

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 2018

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 PM_{2.5}, ultrafeine Partikel, Stickstoffdioxid und Kohlenmonoxid; Nervensystem, Blut und Niere durch Blei; die Niere auch durch Cadmium.

PM₁₀, PM_{2.5} 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 (PM_{2.5}) 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.

Die sommerliche Ozonbelastung führt periodisch zu sichtbaren Schäden hauptsächlich an den Blättern von Laubbäumen, Sträuchern und Kulturpflanzen. Eine anhaltende Dauerbelastung durch Ozon kann das Wachstum und die Vitalität empfindlicher Pflanzenarten beeinträchtigen. Dabei treten nachweislich Ertragseinbussen an landwirtschaftlichen Kulturen auf. Die Ernteausfälle liegen in der Schweiz je nach Region und Kultur bei 5–15%. Waldbäume müssen durch die Luftverschmutzung mit einem zusätzlichen, anthropogen verursachten Stress fertig werden. Die Luftverschmutzung ist ein wichtiger Faktor, der zur Schwächung und zur Destabilisierung des Ökosystems Wald führt. Neben den beobachteten direkten Wirkungen gasförmiger Luftschadstoffe, vor allem Ozon, beeinflussen die Einträge von versauernden und stickstoffhaltigen Luftschadstoffen in den Waldboden das Ökosystem Wald auf vielfältige Weise negativ und stellen mittelfristig ein erhebliches Risiko dar. Erhöhte Stickstoffeinträge beeinträchtigen auch naturnahe Ökosysteme wie artenreiche Naturwiesen und Trockenrasen, alpine Heiden sowie Hoch- und Flachmoore.

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 Staubbilastung 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.

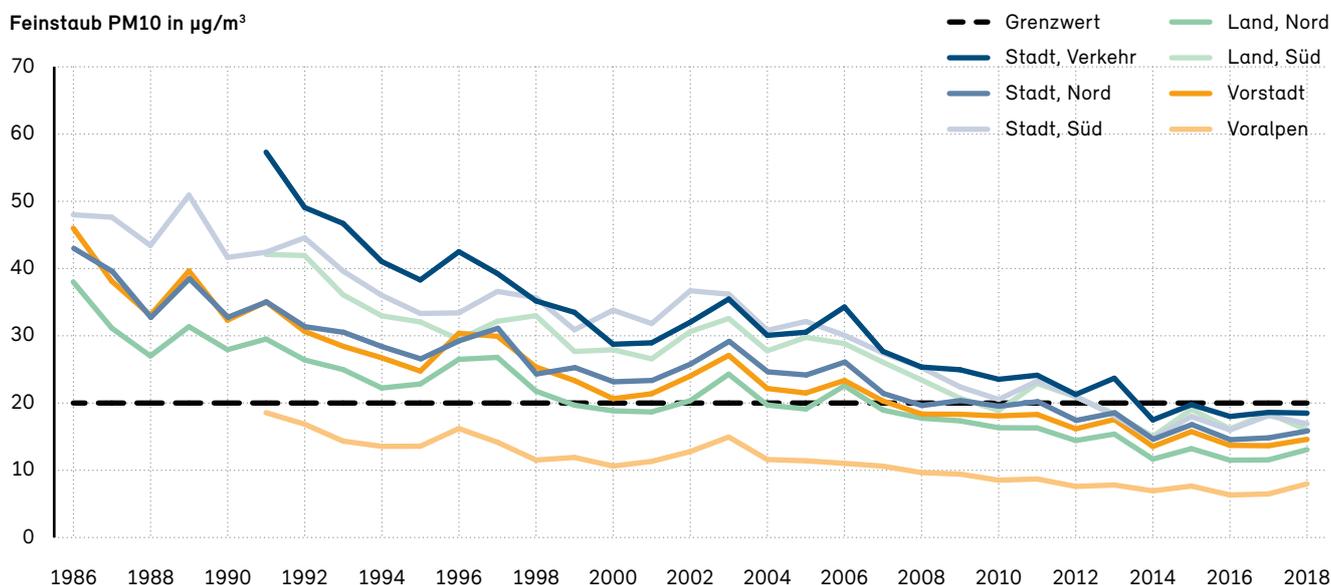
Feinstaub besteht aus primären, direkt als Teilchen emittierten Anteilen und aus sekundären Bestandteilen, welche sich erst in der Luft durch chemische und physikalische Prozesse aus gasförmigen Vorläufersubstanzen bilden.

In der Abb. 8 sind die aus den TSP-Werten berechneten PM10-Jahresmittelwerte (vor 1997) zusammen mit den gemessenen PM10-Werten (ab 1997) 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 an den NABEL-Standorten gemessenen PM2.5 Jahresmittelwerte dargestellt. Seit 1998 hat die Belastung durch PM2.5 um rund 40% abgenommen und liegt heute in den Siedlungen bei 10–14 µg/m³. Abb. 10 zeigt den Anteil von PM2.5 am PM10. An den meisten Standorten im Mittelland liegt dieser bei rund 75%. In einer städtischen Strassenschlucht mit hohem Verkehrs-

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.



aufkommen ist der PM2.5 Anteil geringer, da dort viele gröbere Partikel aus Abrieb und Aufwirbelung zur Feinstaubbelastung beitragen.

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 die Entwicklung 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 wesentlich grösseren Anteil (rund 8 %) an der

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

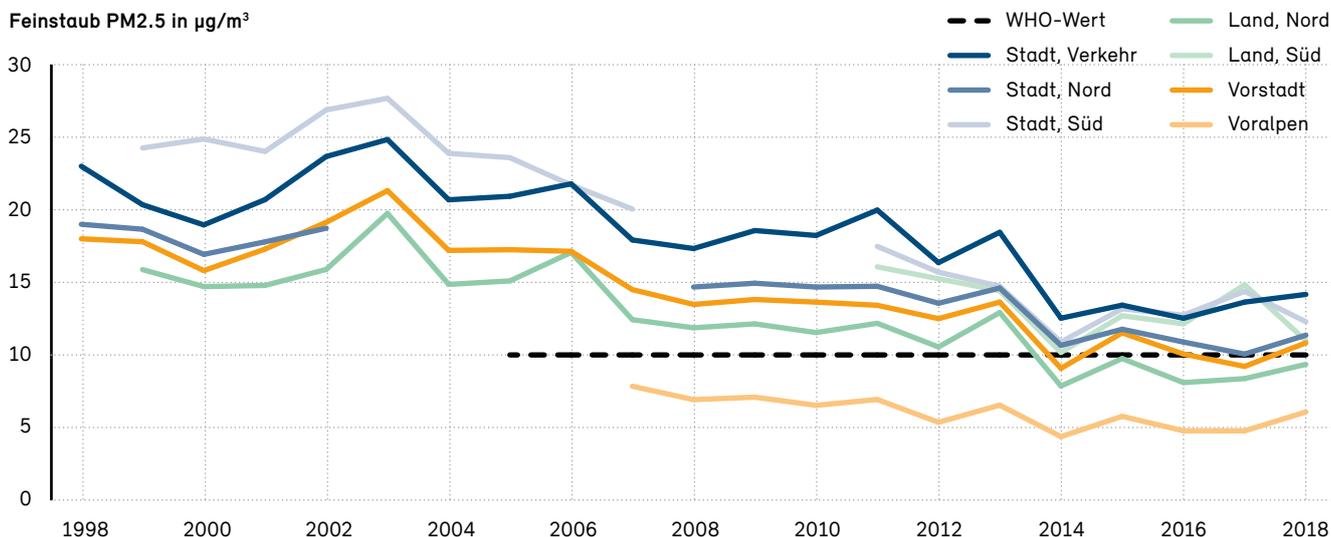
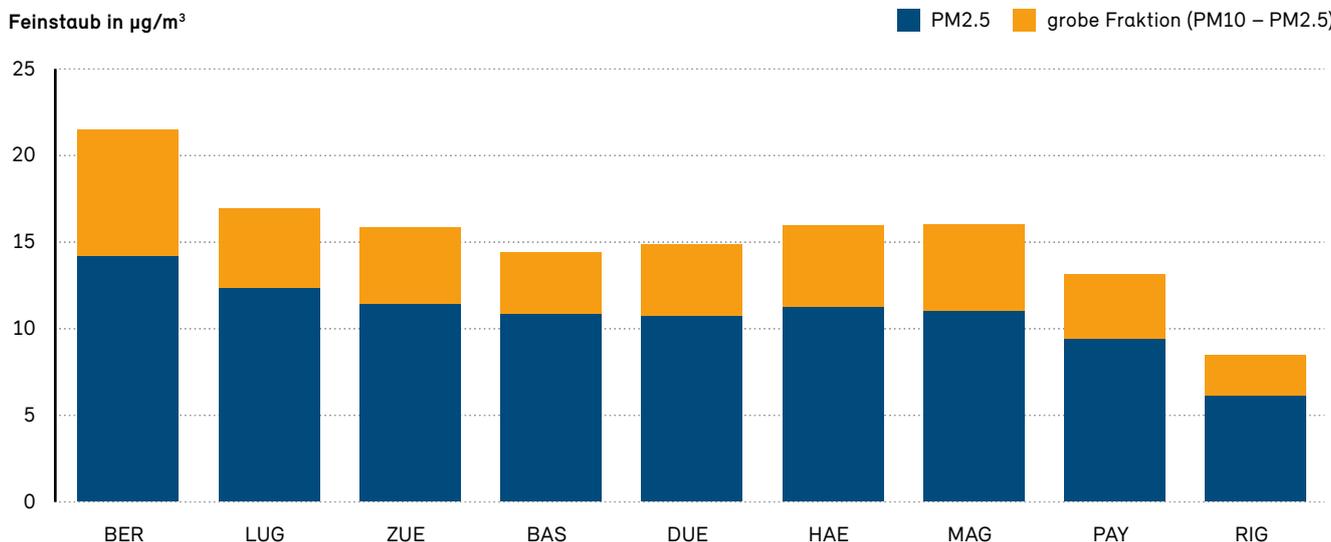


Abb. 10: Konzentrationen von PM2.5 und grober Fraktion im Jahr 2018

An neun 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 0,28 ng/m³ gemessen. Noch höhere Konzentrationen wurden an kantonalen Messstationen in Dörfern mit vielen Holzheizungen gemessen.

Schwermetallgehalt

Der Schwermetallgehalt im Feinstaub PM10 liegt an allen NABEL-Standorten unter dem Immissionsgrenzwert. Ebenso sind die Immissionsgrenzwerte für die Gesamtdosition 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) werden die höchsten Werte in Verkehrsnähe gemessen.

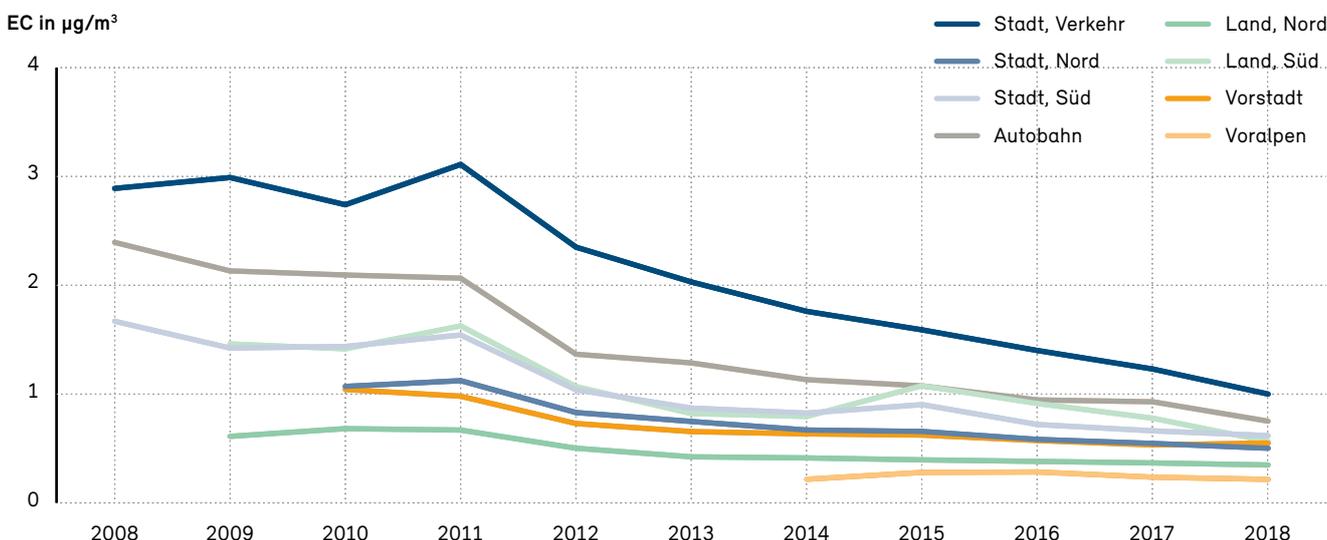
5.2 Ozon

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:

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.

Ein ganz anderes Problem sind die während des Sommers auftretenden 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

Abb. 11: Jahresmittel von Russ (EC)



Ozon werden deshalb vor allem durch die anthropogenen Emissionen von Stickoxiden und flüchtigen organischen Verbindungen verursacht.

Ozon absorbiert neben UV-Strahlung auch Infrarotstrahlung und wirkt deshalb in der Stratosphäre und in der Troposphäre als klimarelevantes Spurengas mit relativ kurzer Lebensdauer.

Ozon ist eines der stärksten Oxidationsmittel und eines der stärksten Reizgase überhaupt. Aus dieser Eigen-

schaft resultiert eine hohe Aggressivität gegen menschliche, tierische und pflanzliche Gewebe sowie Materialien. Es greift beim Menschen vor allem Atemwege und Lungengewebe an.

Abb. 13 zeigt die Entwicklung der Ozonbelastung anhand des maximalen monatlichen 98-Perzentilwertes. An den meisten Stationen hat dieser Wert abgenommen mit Ausnahme von direkt verkehrsbeeinflussten Standorten. Dort wurde früher mehr Stickstoffmonoxid emittiert, welches Ozon abgebaut hat. Ozon zeigt einen typischen Jah-

Abb. 12: Jahresmittel der Partikelanzahlkonzentration

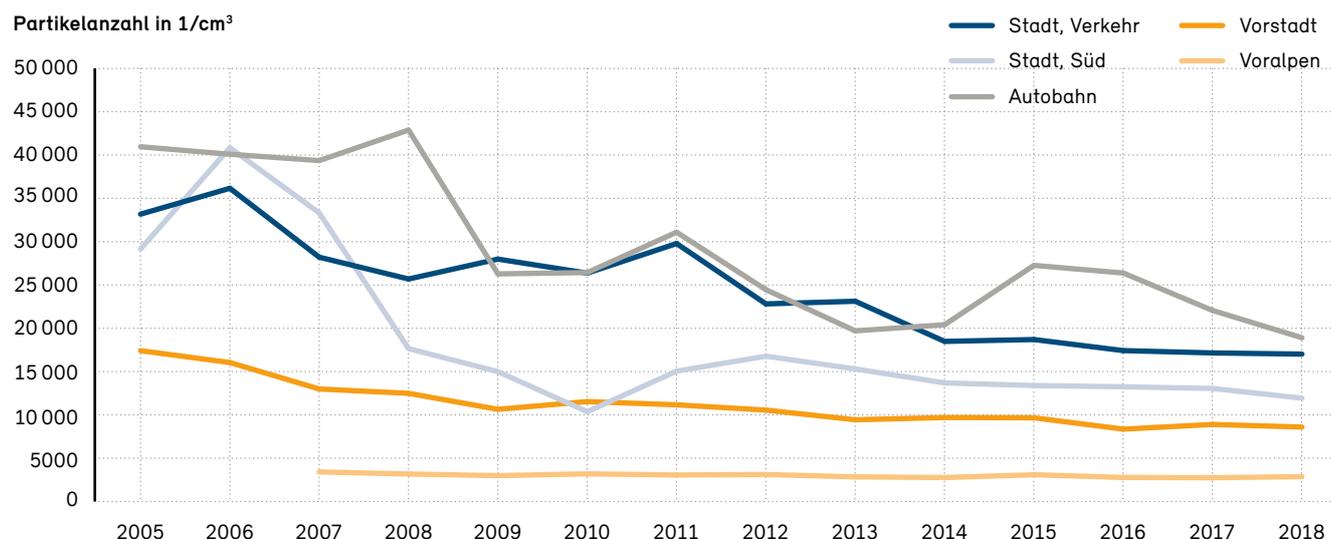
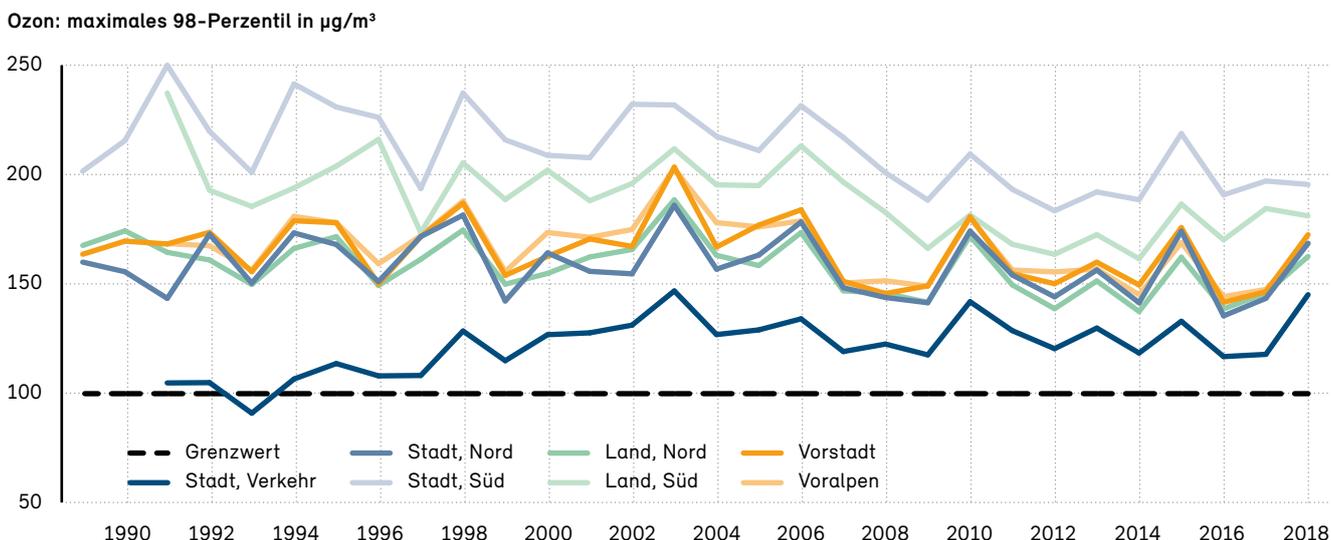


Abb. 13: Maximales monatliches 98-Perzentil der Halbstundenmittel von Ozon



resgang, der sich grundlegend von den meisten anderen Schadstoffen unterscheidet. Im Sommer werden bedeutend höhere Konzentrationen gemessen als im Winter. 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 rötlich-braunes, 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, 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

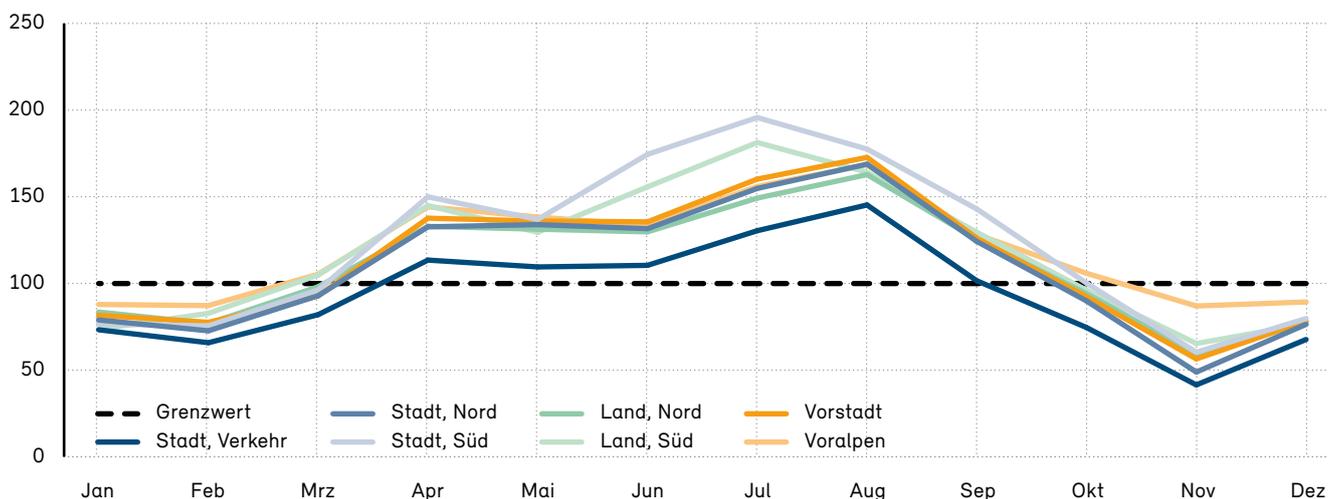
Die Entwicklung der Belastung durch Stickstoffdioxid ist in Abb. 15 gezeigt. An allen Standorten hat die Konzentration von Stickstoffdioxid in den letzten Jahrzehnten abgenommen. Ausser an stark verkehrsbelasteten Standorten wird der Jahresgrenzwert überall eingehalten.

Ammoniak

Ammoniak stammt zum grössten Teil aus der Tierhaltung der Landwirtschaft und wird an drei NABEL-Standorten mit hoher Zeitaufösung gemessen. An weiteren Standorten wird mit Passivsammlern die Ammoniakkonzentration gemessen. Die Belastung durch Ammoniak ist 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 $3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ Ammoniak). Die ausgeprägten Spitzen treten während Perioden mit Gülleausbringung auf.

Abb. 14: Monatliche 98-Perzentilwerte der Halbstundenmittel von Ozon im Jahr 2018

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



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

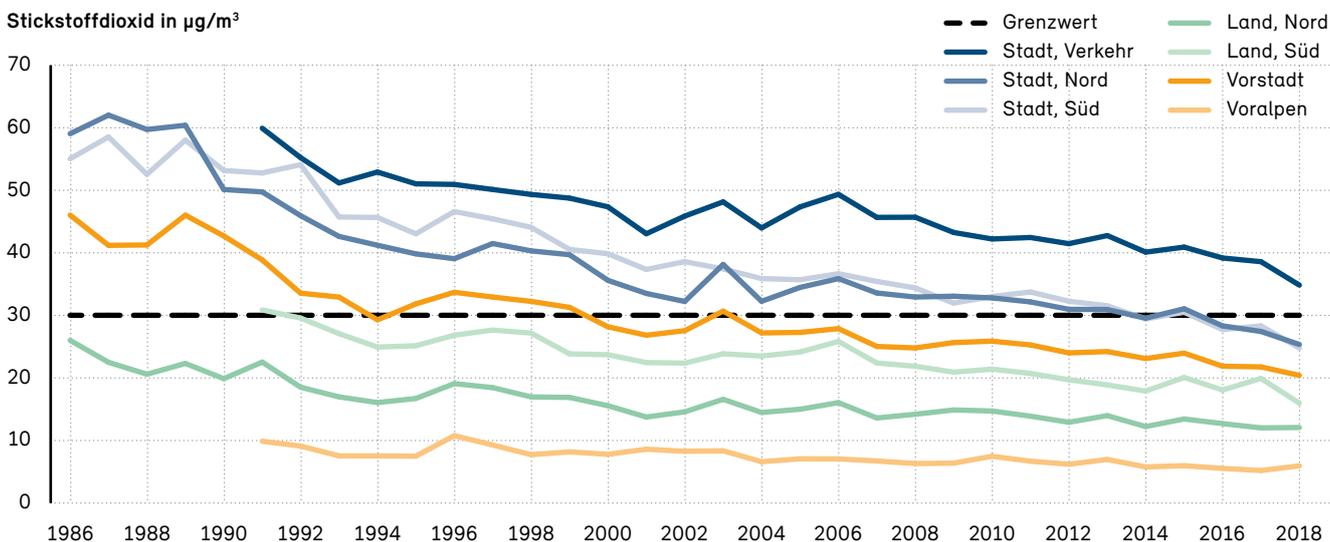
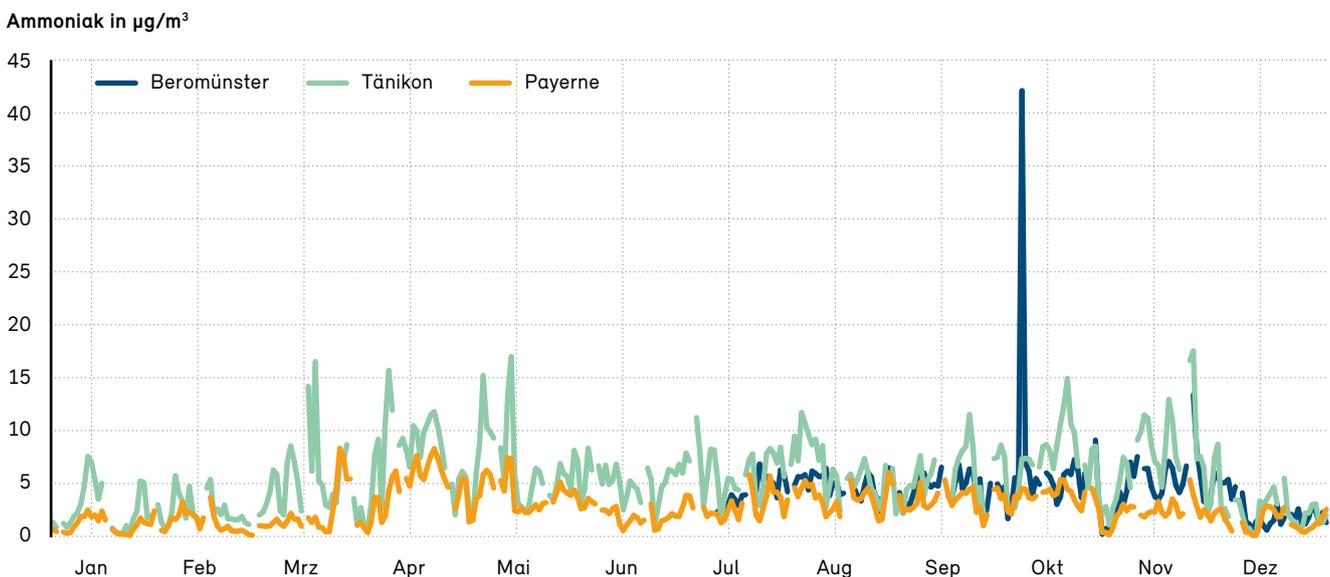


Abb. 16: Tagesmittel von Ammoniak im Jahr 2018

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

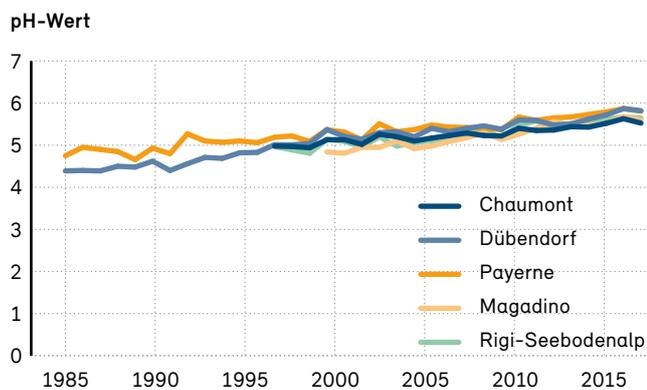


Abb. 18: Jahresfracht von Sulfat im Niederschlag

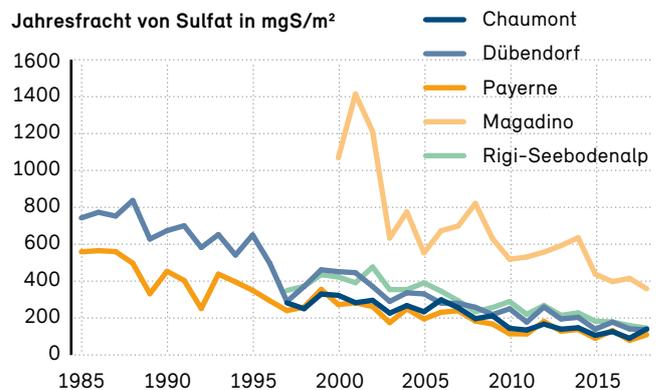


Abb. 19: Jahresfracht von Nitrat im Niederschlag

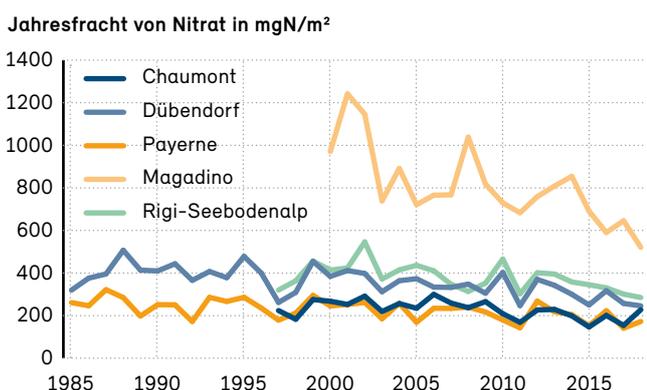
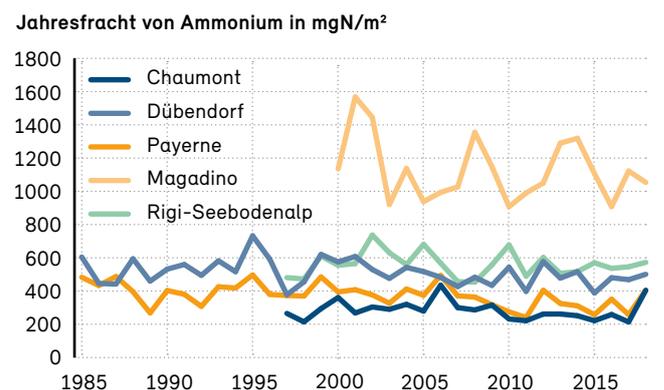


Abb. 20: Jahresfracht von Ammonium im Niederschlag



(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 Ozon-

bildungspotenzial 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 0,8 µg/m³ und damit weit unter dem Richtwert der EU von 5 µg/m³.

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.

Abb. 21: Jahresmittel von Schwefeldioxid

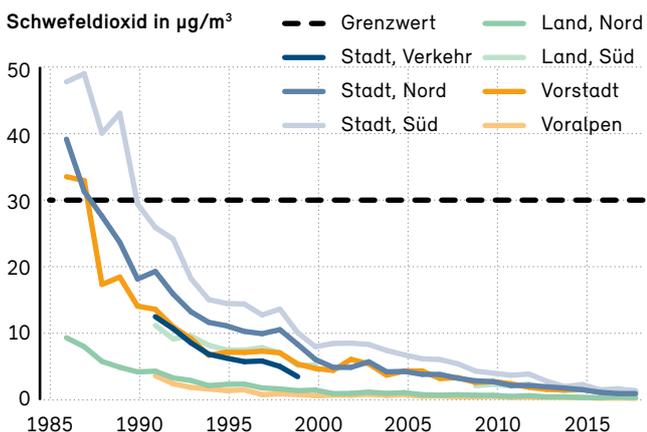
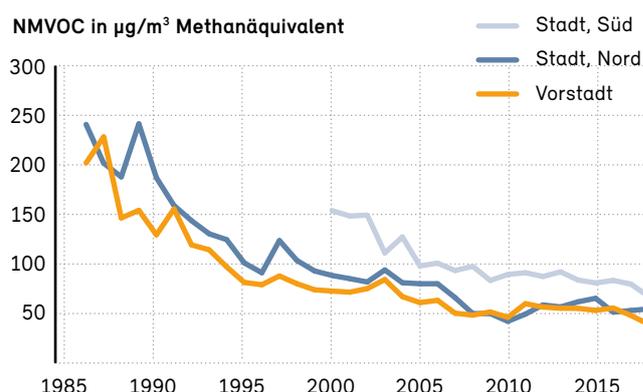


Abb. 22: Jahresmittel von flüchtigen organischen Verbindungen ohne Methan (NMVOC)



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.

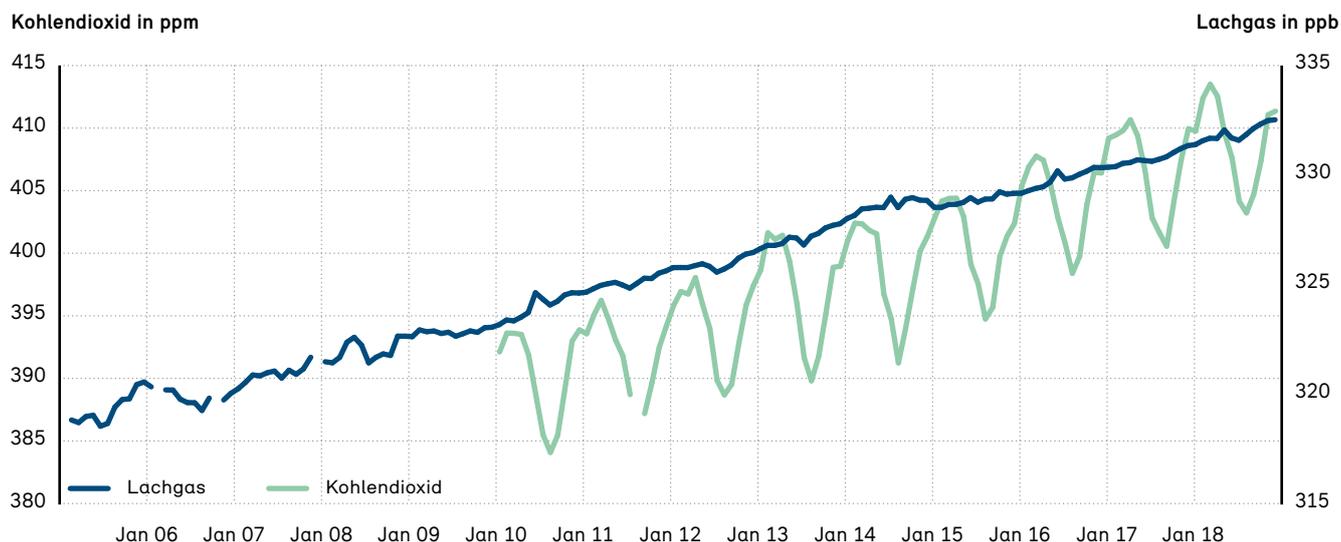
Die Konzentration von Kohlendioxid (CO_2) weist einen ausgeprägten Jahresgang auf, welcher im Wesentlichen die Aufnahme von Kohlendioxid durch die Vegetation im Sommerhalbjahr widerspiegelt. Die Konzentration von Lachgas (Distickstoffmonoxid, N_2O) hat seit dem Messbeginn im Jahre 2005 über drei Prozent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

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



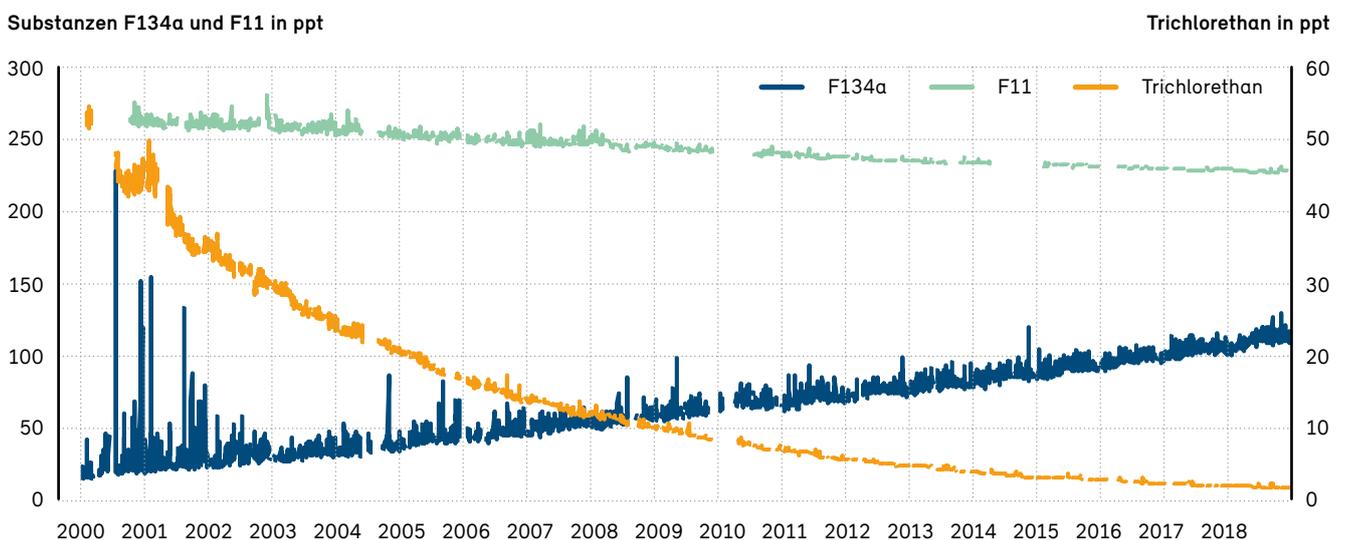
gemäss internationalen Abkommen produziert und verwendet werden, muss aber in den Treibhausgasstatistiken gemäss dem Kyoto-Protokoll berücksichtigt werden. F134a ersetzt andere, mittlerweile verbotene Substanzen und zeigt einen deutlichen Anstieg in der Konzentration der Hintergrundluft (Abb. 25). Wenn 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, Feinstaub und Ozon konnten zwar die Immissionen gesenkt werden, die gemessenen Konzentrationen liegen aber teilweise noch über den Grenzwerten. 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 (Göteborg

Protokoll) des UNECE-Übereinkommens über weiträumige grenzüberschreitende Luftverunreinigung dar. Dieses legt für die 31 Unterzeichnerstaaten des Göteborger Protokolls in Europa und Nordamerika nationale Emissionsziele für Stickoxide, Schwefeldioxid, Ammoniak, flüchtige organische Verbindungen und Feinstaub für das Jahr 2020 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.

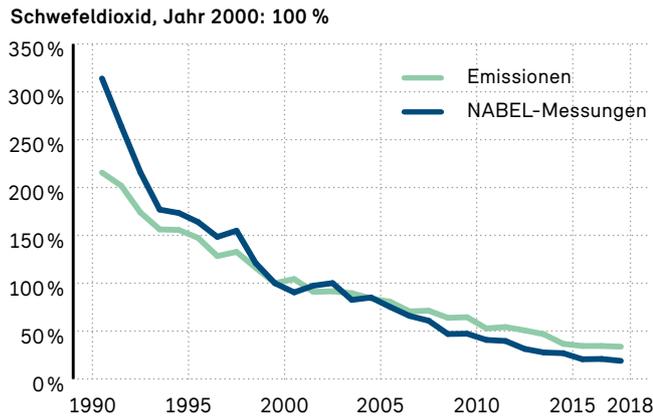


Abb. 27: Entwicklung der im NABEL gemessenen Aussenluftkonzentration und der Emissionen von Stickoxiden

Stickoxide bezeichnet die Summe von Stickstoffmonoxid und Stickstoffdioxid.

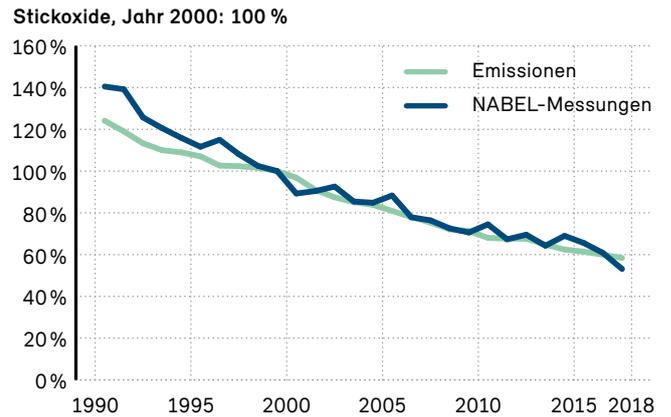


Abb. 28: Entwicklung der im NABEL gemessenen Aussenluftkonzentration und der Emissionen von NMVOC

NMVOC bezeichnet die flüchtigen organischen Verbindungen ohne Methan.

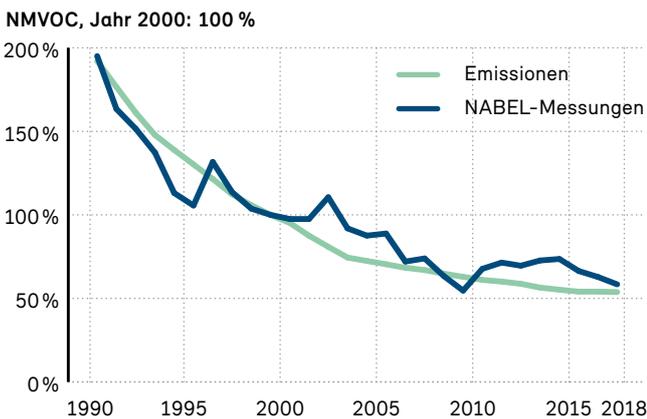
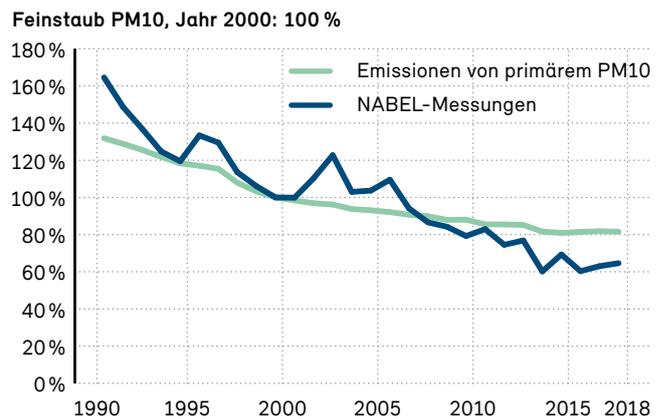


Abb. 29: Entwicklung der im NABEL gemessenen Aussenluftkonzentration und der Emissionen von PM10

Nur die Emissionen von primärem PM10 wurden berücksichtigt.



Anhang

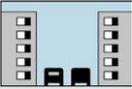
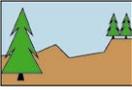
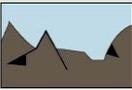
Gemäss Artikel 39 Absatz 1 der Luftreinhalte-Verordnung (LRV) vom 16. Dezember 1985 führt das Bundesamt für Umwelt Erhebungen über die Luftverschmutzung im gesamtschweizerischen Rahmen durch. Das NABEL dient insbesondere der Erfüllung dieser gesetzlichen Aufgabe. Es ist somit ein wichtiges Vollzugsinstrument der LRV, indem es vor allem der Erfolgskontrolle über die gegen die Luftverschmutzung ergriffenen Massnahmen (Art. 44 des Umweltschutzgesetzes) dient. Der Betrieb und die Wartung der Messsysteme, die Qualitätssicherung und die Datenkontrolle werden von der Eidg. Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Empa), Dübendorf, 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 Projekte ergänzt. Beispielsweise werden auf dem Jungfrauoch im Projekt HALCLIM verschiedene Treibhausgase gemessen, um deren zeitliche Entwicklung zuverlässig bestimmen zu können.

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

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. 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 2018: 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