

Zusätzliche Partikelmessungen im NABEL

Bericht über die Messungen 2018

Messbericht

Andrea Fischer und Christoph Hüglin

Empa, Abteilung Luftfremdstoffe/Umwelttechnik

Überlandstrasse 129, 8600 Dübendorf

Dübendorf, Oktober 2019

Impressum

Auftraggeber: Bundesamt für Umwelt (BAFU), Abteilung Luftreinhaltung und Chemikalien,
Sektion Luftqualität, 3003 Bern

Auftragnehmer: Empa, Abteilung Luftfremdstoffe/Umwelttechnik
Überlandstrasse 129, 8600 Dübendorf

Autoren: Andrea Fischer, Christoph Hüglin

Kontakt: andrea.fischer@empa.ch

Dieser Bericht ist abrufbar unter: www.bafu.admin.ch/luft
<http://empa.ch/web/s503/nael>

Dübendorf, Oktober 2019

Inhaltsverzeichnis:

1	Zusammenfassung	2
2	Résumé	4
3	Messkonzept	7
3.1	Messstationen	7
3.2	Messprogramm.....	8
3.3	Probenahme und Analytik	9
4	Resultate der gravimetrischen Feinstaub- und der Partikelanzahlmessungen.....	12
5	Literaturverzeichnis.....	28
	Anhang.....	31

1 Zusammenfassung

Zahlreiche wissenschaftliche Studien belegen die schädlichen Auswirkungen von erhöhten Feinstaubbelastungen auf die menschliche Gesundheit. Sowohl bei Kurzzeitexposition als auch bei Langzeitexposition können Atemwegserkrankungen und Herz-Kreislauf-Erkrankungen hervorgerufen werden. Darüber hinaus wird die Gesamtsterblichkeit und damit die Lebenserwartung beeinträchtigt. Im Namen der Internationalen Gesellschaft für Umweltepidemiologie (ISEE) und der European Respiratory Society (ERS), hat ein Team internationaler deutschsprachiger Wissenschaftler eine kurze Expertise zu den Auswirkungen von Luftschadstoffen auf die Gesundheit und dem aktuellen Stand zu Richt- und Grenzwerten verfasst (ISEE 2019).

Eine für das Jahr 2015 aktualisierte Studie des Bundesamts für Raumentwicklung ARE (Ecoplan/Infras 2019) kommt zum Ergebnis, dass wegen der Luftverschmutzung (durch PM₁₀) in der Schweiz jährlich rund 2'200 Personen vorzeitig sterben, dabei gehen 22'000 Lebensjahre verloren (BAFU 2019). Nach einem Bericht der Europäischen Umweltagentur (EEA 2018) ist im Jahr 2015 PM_{2.5} in der Luft für etwa 422'000 vorzeitige Todesfälle in Europa verantwortlich. Gemäss Angabe der WHO (2018a) starben 2016 rund 4.2 Millionen Menschen weltweit vorzeitig an den Folgen von Luftverschmutzung. Die Verschmutzung durch Feinstaub ist für den grössten Teil (3 Mio) der vorzeitigen Toten verantwortlich (WHO 2016a).

Neben PM₁₀ wird auch die feinere Fraktion PM_{2.5} als Indikator für die Feinstaubbelastung verwendet. Weltweit (WHO 2017, WHO 2016b, WHO 2013a, WHO 2013b, WHO 2013c) und in Europa (Europäische Union 2008) hat PM_{2.5} in den letzten Jahren stark an Bedeutung gewonnen. Gemäss Modellrechnungen der WHO (2018b) für das Jahr 2016 leben 91% der Weltbevölkerung an Orten mit einem PM_{2.5}-Jahresgrenzwert über dem empfohlenen Richtwert der WHO von 10 µg/m³ (2014: 92%; WHO 2016).

Am 11. April 2018 hat der Bundesrat Änderungen an der Luftreinhalte-Verordnung genehmigt, namentlich die Festlegung eines Immissionsgrenzwertes für Feinstaub PM_{2.5}. Der Grenzwert von 10 µg/m³ für das Jahresmittel (gültig ab 1.6.2018) entspricht den Empfehlungen der Weltgesundheitsorganisation (WHO 2017) und ergänzt die bestehenden Grenzwerte für PM₁₀. Schadstoffe wie ultrafeine Partikel werden durch die Massenkonzentrationen PM₁₀ und PM_{2.5} nicht genügend abgebildet. Da ultrafeine Partikel über andere Mechanismen als die gröberen, durch PM₁₀ und PM_{2.5} abgebildeten Partikel wirken können, verlangt die EKL, dass die Anzahlkonzentration von ultrafeinen Partikeln in der Aussenluft gemäss Vorsorgeprinzip der Luftreinhalte-Verordnung minimiert wird (EKL 2013).

An ausgewählten NABEL-Standorten werden seit 1998 zusätzlich zu den PM₁₀-Feinstaubmessungen gravimetrische PM_{2.5}-Messungen durchgeführt. Zudem wird seit einigen Jahren an verschiedenen NABEL-Stationen die Anzahlkonzentration ultrafeiner Partikel gemessen.

Dieser Bericht gibt eine Übersicht über das Messprogramm (Tab. 2), die angewendeten Messverfahren und die Resultate der durchgeführten Messungen in der Messperiode 1998 - 2018.

Die Resultate der zusätzlichen Partikelmessungen im NABEL zeigen 2018 ein ähnliches Bild wie in den vergangenen Jahren. Die PM10-, PM2.5- und die Partikelanzahl-Konzentrationen haben über den gesamten Messzeitraum bis 2014 deutlich abgenommen, seither verbleiben die Konzentrationen auf tiefem Niveau (Abb. 3 + Abb. 11). Die Abnahme der PM10 – Konzentration (Abb. 4) zwischen Beginn der Messreihe (Mittelwert 1998 – 2000) bis zum aktuellen Zeitpunkt (Mittelwert der vergangenen 3 Jahre, 2016 – 2018) liegt im Bereich zwischen 38% (Zürich-Kaserne) und 49% (Lugano-Universität). An der Station Bern-Bollwerk liegt der aktuelle PM10-Jahresmittelwert von $21.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$, wie bereits jener von 2015 ($21.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$) und 2017 ($21.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$) knapp über dem Jahreshgrenzwert. An allen anderen NABEL-Stationen liegen die PM10-Konzentrationen 2018 zwischen 7.9 (Rigi-Seebodenalp) und $16.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Lugano-Universität) und sind damit deutlich unterhalb des Grenzwerts (Tab. 3; Abb. 1 und Abb. 2).

Während 2018 beim PM10-Jahresmittelwert nur die Station Bern-Bollwerk im Bereich des Grenzwertes von $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ liegt, zeigt der Vergleich der PM2.5 Jahresmittelwerte von 2018 mit dem neuen PM2.5 Grenzwert (gültig ab 1.6.2018), dass einzig die Station Rigi-Seebodenalp ($6.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$) einen Messwert deutlich unter dem Grenzwert aufweist (Abb. 2). Die Messstation Payerne registriert mit $9.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ einen Jahresmittelwert knapp unter, jene der strassennahen Station Bern-Bollwerk mit $14.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ über dem Grenzwert von $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Die Jahresmittelwerte der übrigen Stationen liegen knapp über dem Grenzwert.

Wie bei den Jahresmittelwerten, so ist auch bei der Anzahl von Überschreitungen des PM10-Tagesgrenzwertes von $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ eine im langjährigen Verlauf markante Abnahme über die gesamte Messperiode zu verzeichnen (Abb. 5). Nach einer starken Abnahme an Grenzwertüberschreitungen an allen Stationen im Jahr 2014, einem leichten Anstieg 2015 und den tiefsten Werten seit Beginn der Messreihen im Jahr 2016, wurde 2017 eine leichte Zunahme und im vergangenen Jahr wieder eine Abnahme an allen Stationen registriert. Diese Schwankungen in der jährlichen Anzahl an Überschreitungen des Tagesgrenzwerts sind hauptsächlich auf den Einfluss der Witterungsverhältnisse auf die Feinstaubbelastung zurückzuführen. Die Summe der Überschreitungen an allen Stationen hat sich von 228 im Jahr 2004 auf 27 im Jahr 2018 kontinuierlich reduziert.

Das Verhältnis des Jahresmittelwerts von PM2.5 zum Jahresmittelwert von PM10 liegt für die meisten Standorte im Bereich von 0.70 - 0.77, einzig in der verkehrsbelasteten Strassenschlucht Bern-Bollwerk wird ein tieferes Verhältnis von 0.64 registriert (Abb. 6).

Die Verläufe der Partikelanzahl-Konzentrationen seit Beginn der Messreihen zeigen an den verschiedenen Stationen grosse Unterschiede, weisen aber generell eine sinkende Tendenz mit einer geringeren Abnahme in den Jahren 2014-2018 auf (Abb. 11).

2 Résumé

De nombreuses études scientifiques démontrent qu'une importante pollution par les poussières fines a des effets nocifs sur la santé humaine. L'exposition à court et à long terme peut causer des maladies respiratoires et cardiovasculaires. En outre, la mortalité globale et donc l'espérance de vie sont affectées. Au nom de la société internationale d'épidémiologie (ISEE) et de l'European Respiratory Society (ERS), une équipe internationale de scientifiques germanophones a rédigé un bref rapport sur les effets des polluants atmosphériques sur la santé et sur l'état actuel des recommandations et valeurs limites (ISEE 2019).

Une étude de l'Office fédéral du développement territorial ARE actualisée pour l'année 2015 (Ecoplan/Infras 2019) arrive à la conclusion qu'en Suisse la pollution atmosphérique (par les PM10) provoque chaque année 2'200 décès prématurés, ce qui correspond à 22'000 années de vie perdues (OFEV 2019). Selon un rapport de l'Agence européenne pour l'environnement (AEE 2018), en 2015 les poussières fines (PM2.5) ont été responsables de 422'000 décès prématurés en Europe. Une publication de l'OMS (OMS 2018a) estime que 4.2 millions de personnes sont décédées prématurément dans le monde en 2016 à cause de la pollution atmosphérique. La pollution par les particules fines est responsable de la majorité (3 millions) des décès prématurés (OMS 2016a).

A côté des PM10, la fraction plus fine (PM2.5) est aussi utilisée comme indicateur de la pollution par les poussières fines. Depuis ces dernières années, dans le monde entier (OMS 2017, OMS 2016b, OMS 2013a, OMS 2013b, OMS 2013c) et en Europe (Union européenne 2008) une attention accrue est portée aux PM2.5. Selon les calculs du modèle de l'OMS (2018b) pour 2016, 91 % de la population mondiale vit dans des endroits où la valeur limite annuelle des PM2.5 est supérieure à la recommandation de l'OMS de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (2014 : 92 % ; OMS 2016).

Le 11 avril 2018, le Conseil fédéral a approuvé des modifications de l'ordonnance sur la protection de l'air, à savoir l'établissement d'une valeur limite d'immission pour les particules PM2.5. La valeur limite de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pour la moyenne annuelle (valable à partir du 1er juin 2018) est conforme aux recommandations de l'Organisation mondiale de la santé (OMS 2017) et complète les valeurs limites existantes pour PM10. La mesure de la masse des poussières fines PM10 et PM2.5 ne reflète qu'insuffisamment la situation pour certains polluants, telles que les particules ultrafines. Comme les mécanismes d'action des particules ultrafines peuvent différer de ceux des particules plus grossières représentées par les fractions PM10 et PM2.5, la CFHA requiert la minimisation des concentrations de ces particules dans l'air en vertu du principe de précaution conformément à l'ordonnance sur la protection de l'air (CFHA 2013).

Depuis 1998, sur plusieurs stations NABEL, on procède, en plus des mesures des PM10, à la mesure gravimétrique des PM2.5. En outre, depuis quelques années on mesure aussi dans certaines stations NABEL, le nombre de particules ultrafines par volume. Le présent rapport donne une vue

d'ensemble du programme de mesure (Tab. 2), des méthodes de mesure utilisées et des résultats des mesures effectuées au cours de la période de mesure 1998 - 2018.

En 2018, les résultats des mesures supplémentaires effectuées sur le réseau NABEL présentait une image semblable à celles des années précédentes. Les concentrations des PM₁₀, des PM_{2.5} et le nombre de particules par volume ont nettement diminué sur l'ensemble de la période de mesure jusqu'en 2014, depuis lors les concentrations sont restées à un niveau bas (Fig. 3 + Fig. 11). La diminution de la concentration de PM₁₀ (Fig. 4) entre le début de la série de mesures (valeur moyenne 1998-2000) et aujourd'hui (valeur moyenne des 3 dernières années, 2016-2018) se situe entre 38% (Zürich-Kaserne) et 49% (Lugano-Università). À la station de Bern-Bollwerk, la moyenne annuelle des PM₁₀ de 21.3 µg/m³ se situe juste au-dessus de la valeur limite annuelle, tout comme celles de 2015 (21.5 µg/m³) et 2017 (21.3 µg/m³). Toutes les autres stations NABEL se situent en 2018 entre 7.9 (à Rigi-Seebodenalp) et 16.4 µg/m³ (à Lugano-Università) et sont donc bien en dessous de la valeur limite (Tab. 3 ; Fig.1 et Fig. 2).

Alors que seule la station de Bern-Bollwerk se situe dans la limite de 20 µg/m³ pour la valeur de la moyenne annuelle des PM₁₀ en 2018, la comparaison des valeurs moyennes annuelles des PM_{2.5} en 2018 avec la nouvelle valeur limite des PM_{2.5} (valable à partir du 1.6.2018) montre que seule la station de Rigi-Seebodenalp (6.1 µg/m³) a une valeur mesurée nettement inférieure (figure 2). Avec 9.4 µg/m³, la station de mesure de Payerne enregistre une valeur moyenne annuelle juste en dessous de la valeur limite de 10 µg/m³. Avec 14.2 µg/m³, la valeur moyenne annuelle de la station Bern-Bollwerk près de la route est supérieure à la valeur limite. Les valeurs moyennes annuelles des autres stations sont légèrement supérieures à la valeur limite.

Tout comme pour les moyennes annuelles, le nombre de dépassements de la valeur limite journalière PM₁₀ de 50 µg/m³ montre également une diminution marquée sur plusieurs années sur l'ensemble de la période de mesure (Fig. 5). Après une forte diminution des dépassements des valeurs limites journalières dans toutes les stations en 2014, une légère augmentation en 2015 et les valeurs les plus basses depuis le début de la série de mesures en 2016, une légère augmentation a été enregistrée en 2017, puis une diminution dans toutes les stations l'année dernière. Ces fluctuations du nombre annuel de dépassements des valeurs limites journalières sont principalement dues à l'influence des conditions météorologiques sur la pollution par les poussières fines. Le nombre total de dépassements à toutes les stations n'a cessé de diminuer, passant de 228 en 2004 à 27 en 2018.

Le rapport entre la moyenne annuelle des PM_{2.5} et la moyenne annuelle des PM₁₀ se situe entre 0.70 et 0.77 pour la majorité des sites, avec un rapport inférieur - 0.64 - enregistré uniquement sur le site encaissé proche du trafic de Bern-Bollwerk (Fig. 6).

L'évolution temporelle du nombre de particules par volume depuis le début des séries de mesures montrent de grandes différences entre les différentes stations, mais clairement une tendance à la baisse avec toutefois une diminution moins marquée au cours des années 2014-2018 (Fig. 11).

3 Messkonzept

3.1 Messstationen

Seit 1998 werden an einzelnen NABEL-Stationen zusätzliche Partikelmessungen durchgeführt. Tabelle 1 zeigt eine kurze Charakterisierung dieser Standorte. Eine detaillierte Beschreibung der Stationen betreffend Lage und Umgebung findet sich im Technischen Bericht zum NABEL (Empa 2018), welcher unter <http://empa.ch/web/s503/label> verfügbar ist.

Tab. 1: Charakterisierung der NABEL-Stationen mit zusätzlichen Partikelmessungen

Basel-Binningen	BAS	Vorstädtisch; am Stadtrand auf dem Gebiet der Gemeinde Binningen
Bern-Bollwerk	BER	Städtisch, verkehrsbelastet; direkt an Hauptverkehrsachse, ca. 3 m vom Strassen-rand entfernt in einer Strassenschlucht
Chaumont	CHA	Ländlich, oberhalb 1000 m ü.M. Umgebung wird durch Wiesen und Weideland dominiert
Dübendorf-Empa	DUE	Vorstädtisch; ca. 150 m entfernt von Hauptverkehrsstrasse
Härkingen-A1	HAE	Ländlich, Autobahn; ca. 20 m nördlich der Autobahn A1
Lugano-Università	LUG	Städtisch; in relativ offener Hofsituation
Magadino-Cadenazzo	MAG	Ländlich, unterhalb 1000 m ü.M. umgeben von Feldern einer landwirtschaftlichen Versuchsanstalt
Payerne	PAY	Ländlich, unterhalb 1000 m ü.M. auf dem Gelände der Météo-Suisse Payerne
Rigi-Seebodenalp	RIG	Ländlich, oberhalb 1000 m ü.M. voralpine Umgebung, Weideland und Waldpartien
Zürich-Kaserne	ZUE	Städtisch; Hofsituation, nicht unmittelbar verkehrsbelastet

3.2 Messprogramm

Einen zeitlichen Überblick über das Programm der ergänzenden Partikelmessungen an den einzelnen Stationen gibt Tabelle 2. Da nicht alle Messreihen den gesamten Zeitraum seit dem 1. Januar 1998 abdecken, sind in der Tabelle 2 auch das Start- bzw. das End-Datum der jeweiligen Messung notiert.

PM10-Messungen wurden an allen Stationen während dem gesamten Zeitraum seit dem 1. Januar 1998 durchgeführt. Zu Beginn der Messreihe und seit Juni 2010 werden tägliche gravimetrische PM10-Messungen durchgeführt. Im Zeitraum 2001 bis Juni 2010 wurde die Probenahme an allen Stationen auf jeden 4. Tag reduziert (siehe Kapitel 3.3).

In den vergangenen Jahren hat PM2.5 als Kenngrösse der Feinstaubbelastung stark an Bedeutung gewonnen (Europäische Union, 2008; WHO 2013a, 2013b) und seit dem 1.6.2018 hat die Schweiz einen Immissionsgrenzwert für PM2.5 von $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Jahresmittelwert). Der Immissionsgrenzwert entspricht den Empfehlungen der WHO. Ab 2011 wurden, neben den bereits vorhandenen PM2.5-Messungen an den Stationen Basel-Binningen, Bern-Bollwerk, Payerne, Rigi-Seebodenalp und Zürich-Kaserne, Messungen an den Stationen Dübendorf-Empa, Härkingen-A1, Lugano-Università und Magadino-Cadenazzo ins Messprogramm aufgenommen (mit Probenahme an jedem vierten Tag). Für eine befristete Zeit (von März 2014 bis Ende 2015) wurden an den Stationen Bern-Bollwerk, Dübendorf-Empa, Lugano-Università und Zürich-Kaserne tägliche gravimetrische PM2.5-Messungen durchgeführt. An den Standorten Magadino-Cadenazzo, Payerne und Zürich-Kaserne fanden in den vergangenen 3 Jahren verschiedene Wechsel zwischen täglicher gravimetrischer PM2.5-Messung sowie Probenahme nur an jedem 4 Tag statt (siehe Tab. 2), Grund dafür waren diverse Projekte.

PM1-Messungen wurden an einzelnen Stationen im Zeitraum 2003 – 2013 durchgeführt. Da PM1 hochkorreliert mit PM2.5 ist, wurden die Messungen von PM1 an den Stationen Basel-Binningen, Bern-Bollwerk, Lugano-Università und Rigi-Seebodenalp per Ende 2010 beendet. An den beiden Stationen Härkingen-A1 und Payerne wurden die Messungen per Ende 2013 eingestellt.

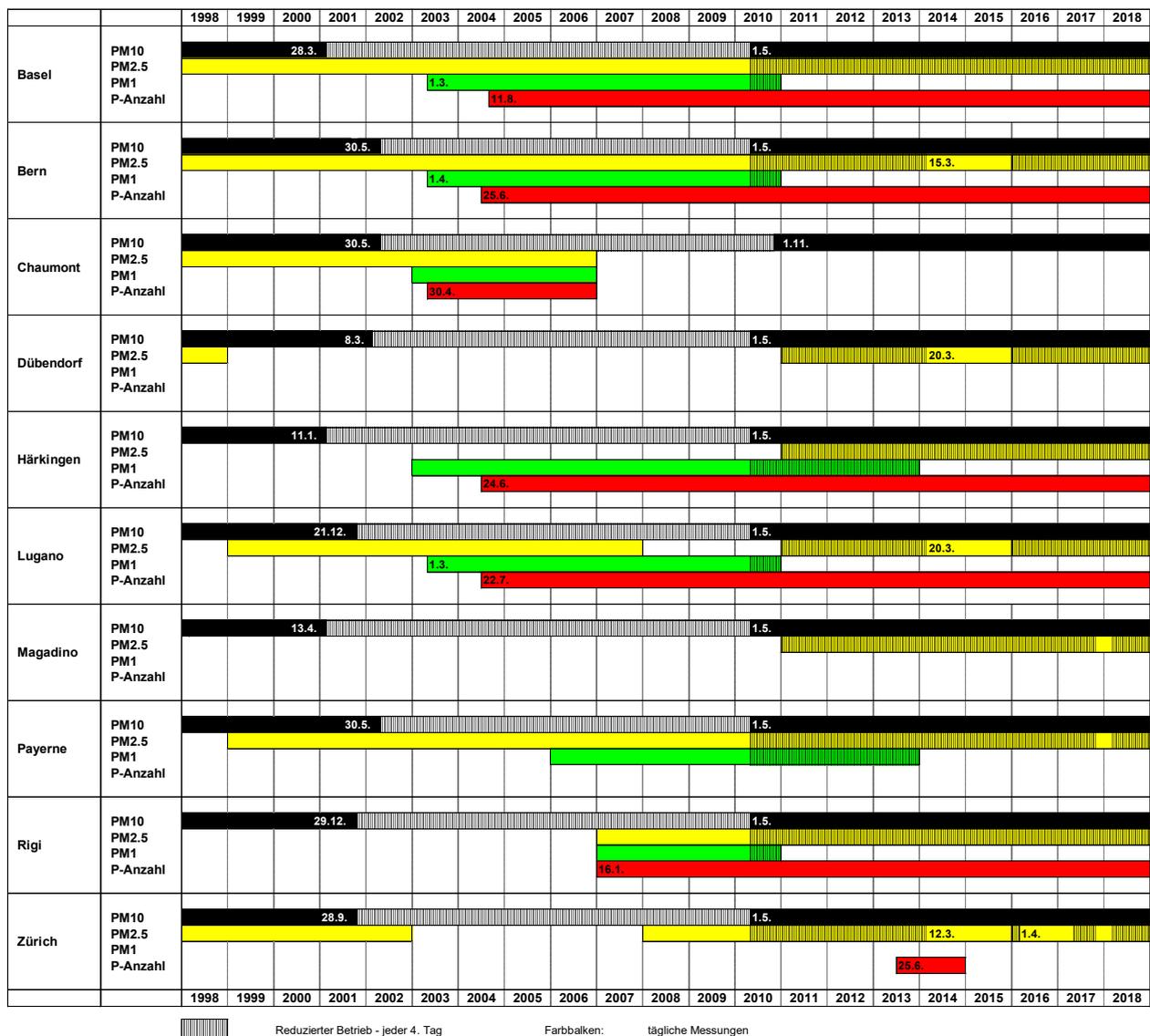
Erste Messungen der Partikelanzahl wurden 2003 am Standort Chaumont gestartet, diese wurden Ende 2006 beendet. Unterschiedlich lange Messreihen gibt es für die Stationen Basel-Binningen, Bern-Bollwerk, Härkingen-A1, Lugano-Università, Rigi-Seebodenalp und Zürich-Kaserne für den Zeitraum seit 2004.

3.3 Probenahme und Analytik

Die gravimetrischen Messungen erfolgten gemäss den Vorgaben der europäischen Norm EN 12341 "Aussenluft – Gravimetrisches Standardmessverfahren für die Bestimmung der PM₁₀- oder PM_{2.5}-Massenkonzentration des Schwebstaubes" (CEN 2014).

Als Probenahmekopf für die PM1-Messungen wurde ein zweistufiger Impaktor verwendet. Dieser besteht aus einem PM2.5-Einlass und einem zusätzlichen PM1-Abscheider, bei welchem Anzahl und Durchmesser der Impaktordüsen so dimensioniert sind, dass nach den in Hinds (1999) beschriebenen Prinzipien ein Cut-point von 1µm resultiert.

Tab. 2: Zeitlicher Überblick über das Programm der ergänzenden Partikelmessungen



Ab dem Zeitpunkt der Inbetriebnahme der PM-Monitore (Betameter resp. TEOM-FDMS) bis Ende April 2010 wurden die gravimetrischen PM10-Messungen vorübergehend auf Probenahmen jeden 4. Tag reduziert (siehe Tabelle 2). Während dieser Zeit wurden die PM10-Tageswerte aus den Monitordaten sowie den verbleibenden gravimetrischen Tageswerten berechnet. Einzelheiten zur angewendeten Methode sind in Gehrig et al. (2005) beschrieben.

Wegen der hohen lufthygienischen Bedeutung von PM10 war dieses Messkonzept nicht befriedigend, und es wurden deshalb ab Mai 2010 im NABEL wieder tägliche gravimetrische PM10-Messungen durchgeführt (Chaumont ab November 2010). Um den personellen Aufwand nicht zu erhöhen, wurden als Kompensation die gravimetrischen PM2.5 und PM1-Messungen nur noch jeden 4. Tag durchgeführt. Für das Übergangsjahr 2010 hatte dies zur Folge, dass die PM2.5- und PM1-Jahresmittelwerte nicht durch einfache Mittelung aller Tageswerte berechnet werden konnten, da sonst die Periode Januar – April Übergewichtet worden wäre. Die Jahresmittelwerte 2010 wurden deshalb aus den Monatsmittelwerten berechnet. Analog wurde auch für die Berechnung der mittleren Verhältnisse der Tageswerte (PM2.5/PM10 und PM1/PM10) die Gewichtung so angepasst, dass keine Übergewichtung der Periode Januar - April resultierte.

Die Messungen der Partikelanzahl wurden mit Kondensationskernzählern des Typs TSI 3775 durchgeführt. Bei diesem Messverfahren wird die angesaugte Probeluft zunächst durch eine mit Butanol gesättigte Kammer geleitet, dabei kondensiert Butanol auf den durchgeleiteten Partikeln. Die Kondensation bewirkt die Vergrösserung der Partikel auf eine optisch erfassbare Grösse. Die Zählung der Partikel erfolgt bis zu einer Konzentration von 50'000 Partikel/cm³ im Einzelzählmodus, bei höheren Konzentrationen durch Messung der gesamten Streulichtintensität und Umrechnung auf Partikelkonzentrationen mit Hilfe einer Kalibrierfunktion (photometrischer Modus). Ausser an den Stationen Rigi-Seebodenalp und Basel-Binningen wird an allen Stationen die Probeluft mit Hilfe einer speziellen Verdünnungseinheit aufbereitet. An den Standorten Bern-Bollwerk und Härkingen-A1 beträgt das Verdünnungsverhältnis ca. 1:20, am Standort Lugano-Università ca. 1:3. Durch diese Probenaufbereitung können die Geräte weitestgehend im Einzelzählmodus betrieben werden. Erfasst werden Teilchen mit einem Durchmesser grösser als etwa 4 nm. Der obere Cut-point der Probenahme spielt keine Rolle, solange er im Bereich von 1 µm liegt, da die Partikelanzahl von den submikronen kleineren Partikeln um Grössenordnungen dominiert wird.

In Härkingen-A1 wurde für die Messung der Partikelanzahlkonzentration vom 27.11.2008 bis zum 23.3.2011 eine Ansaugleitung mit 1/8-Zoll Durchmesser verwendet, vorher und nachher eine solche mit 1/4-Zoll Durchmesser. Die Verwendung von verschiedenen Durchmessern hat möglicherweise einen Einfluss auf die Messwerte: Einerseits werden bei einem kleineren Durchmesser die Diffusionsverluste verringert, andererseits steigt die Gefahr einer Verschmutzung der Ansaugleitung (z.B. durch Insekten) wodurch Partikelverluste ansteigen können. Die Messungen der Partikelanzahlkonzentration erfolgen gemäss der Technischen Spezifikation

TS 16976 des Europäischen Komitees für Normung (CEN 2016). Das wichtigste Element der Qualitätssicherung der Messung von Partikelanzahlkonzentrationen im NABEL ist die jährliche Rückführung der Messgeräte auf einen Kondensationskernzähler, welcher regelmässig durch das Eidgenössische Institut für Metrologie (METAS) zertifiziert wird und der ausschliesslich für diese Vergleichsmessungen eingesetzt wird.

Eine aktuelle Beschreibung aller im NABEL verwendeten Methoden findet sich im Technischen Bericht zum NABEL (Empa 2018).

4 Resultate der gravimetrischen Feinstaub- und der Partikelanzahlmessungen

Die Jahresmittelwerte 2018 der PM10- und PM2.5-Konzentrationen sowie der Partikelanzahl-Konzentrationen sind in Tabelle 3 zusammengefasst. Einen grafischen Überblick über die Jahresmittel der Massenkonzentrationen und der Partikelanzahl-Konzentrationen für das Jahr 2018 gibt Abbildung 1. Um einen korrekten Vergleich der PM10-Konzentrationen mit den PM2.5-Konzentrationen an den Stationen zu gewährleisten, wurden für die Berechnung der PM10-Jahresmittel nur die Tageswerte jedes 4. Tages verwendet (d.h. nur Tage mit PM2.5-Messungen). Die Differenzen zu den andernorts publizierten vollständigen PM10-Jahresmitteln sind an den meisten Standorten nur gering und liegen meist unterhalb von $0.16 \mu\text{g}/\text{m}^3$. An den Stationen Lugano-Universität, Magadino-Cadenazzo und Rigi-Seebodenalp wurden grössere Abweichungen (0.50 , 0.62 und $0.52 \mu\text{g}/\text{m}^3$) registriert. Diese Abweichungen entsprechen 3 - 6 % der vollständigen PM10-Jahresmittel aus Tageswerten.

Im Jahr 2018 sind die PM10-Jahresmittelwerte aller Stationen, mit Ausnahme von Bern-Bollwerk, unter dem Grenzwert von $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Abb. 2). Der Jahresmittelwert der strassennahen Station Bern-Bollwerk liegt mit dem PM10-Jahresmittelwert von $21.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (jeder 4.Tag) knapp über dem Grenzwert. Alle anderen NABEL-Stationen liegen im Bereich von 7.9 (Rigi-Seebodenalp) bis $16.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Lugano-Universität) und sind damit deutlich unterhalb dem Grenzwert.

Während 2018 beim PM10-Jahresmittelwert nur die Station Bern-Bollwerk im Bereich des Grenzwertes von $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ liegt, zeigt der Vergleich der PM2.5 Jahresmittelwerte von 2018 mit dem neuen PM2.5 Grenzwert (gültig ab 1.6.2018), dass einzig die Station Rigi-Seebodenalp ($6.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$) einen Messwert deutlich unter dem Grenzwert aufweist (Abb. 2). Die Messstation Payerne registriert mit $9.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ einen Jahresmittelwert knapp unter dem Grenzwert. Die Stationen Basel-Binningen, Dübendorf-Empa, Härkingen-A1, Magadino-Cadenazzo und Zürich-Kaserne liegen knapp über dem Grenzwert und am strassennahen Standort Bern wurde mit $14.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ein PM2.5-Jahresmittelwert von deutlich über dem Grenzwert von $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ registriert.

Im Vergleich zu den Massenkonzentrationen (PM10 und PM2.5) zeigen sich bei den Partikelanzahlkonzentrationen deutlich grössere relative Unterschiede zwischen belasteten und weniger belasteten Standorten. So beträgt z.B. das Verhältnis der mittleren Partikelanzahlkonzentrationen von Härkingen-A1 und Rigi-Seebodenalp rund 6.6 gegenüber lediglich rund 2.0 für PM10 und 1.8 für PM2.5. Die analogen Werte für die entsprechenden Verhältnisse von Bern-Bollwerk und Rigi-Seebodenalp betragen 5.9 (mittlere Partikelanzahlkonzentrationen), 2.7 (PM10) und 2.3 (PM2.5). Diese Befunde illustrieren die räumlich grössere Variabilität der massenmässig nicht relevanten ultrafeinen Partikel (Partikeldurchmesser $< 100 \text{ nm}$) in unmittelbarer Quellennähe (insbesondere Verkehr).

Tab. 3: Jahresmittelwerte 2018 von PM10, PM2.5 und Partikelanzahlkonzentrationen, sowie 95%-Perzentil der Halbstundenmittel der Partikelanzahlkonzentrationen (P-Anzahl)

	PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PM2.5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	P-Anzahl (Part/ cm^3)	
	JMW	JMW	JMW	95% Perzentil
Basel-Binningen	14.5[*]	10.8	8594	17759
Bern-Bollwerk	21.3[*]	14.2	17018	36931
Dübendorf-Empa	14.9[*]	10.7		
Härkingen-A1	16.0[*]	11.2	18909	54174
Lugano-Università	16.4[*]	12.3	11931	28667
Magadino-Cadenazzo	15.4[*]	10.8		
Payerne	13.1[*]	9.4		
Rigi-Seebodenalp	7.9[*]	6.1	2866	6271
Zürich-Kaserne	15.8[*]	11.4		
Immissionsgrenzwert	20	10		

^{*}) Um einen korrekten Vergleich der PM10-Konzentrationen mit den nur jeden 4. Tag gemessenen PM2.5-Konzentrationen zu gewährleisten, wurden für die Berechnung des PM10-Jahresmittels ebenfalls nur die Tageswerte jedes 4. Tages herangezogen (d.h. nur Tage mit PM2.5 -Messungen). Dadurch können geringfügige Abweichungen ($-0.16 - 0.14 \mu\text{g}/\text{m}^3$) von den publizierten vollständigen PM10-Jahresmittelwerten auftreten (BAS, BER, DUE, HAE, PAY, ZUE); 0.50 LUG; 0.62 MAG; 0.52 RIG

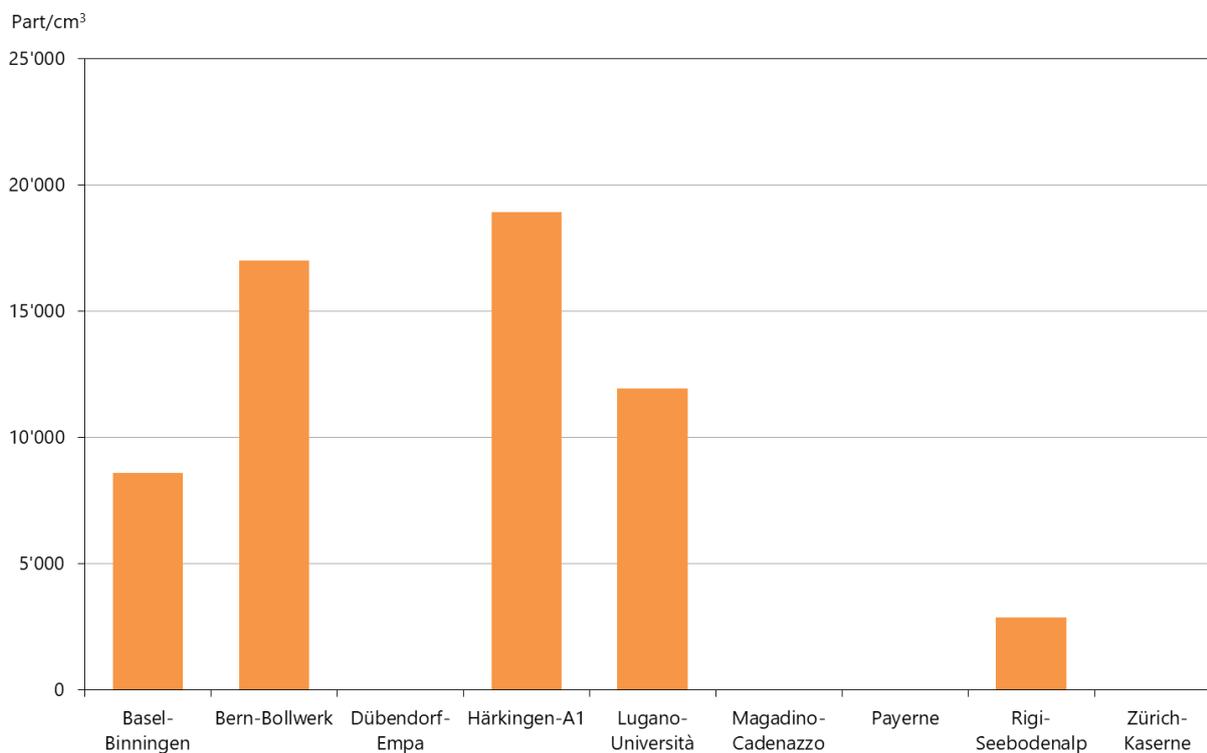
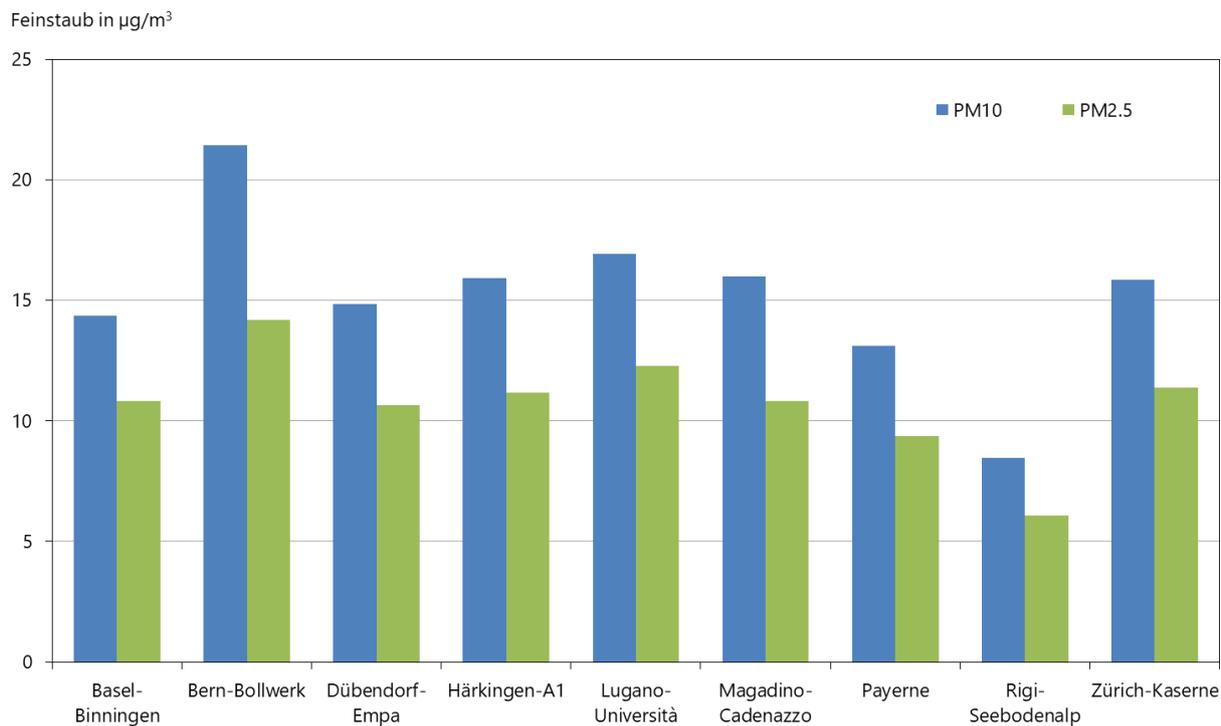


Abb. 1: Übersicht über die Jahresmittelwerte 2018 von PM10 und PM2.5 (oben) und die Jahresmittelwerte 2018 der Partikelanzahlkonzentrationen (unten)

Resultate der gravimetrischen Feinstaub- und der Partikelanzahlmessungen

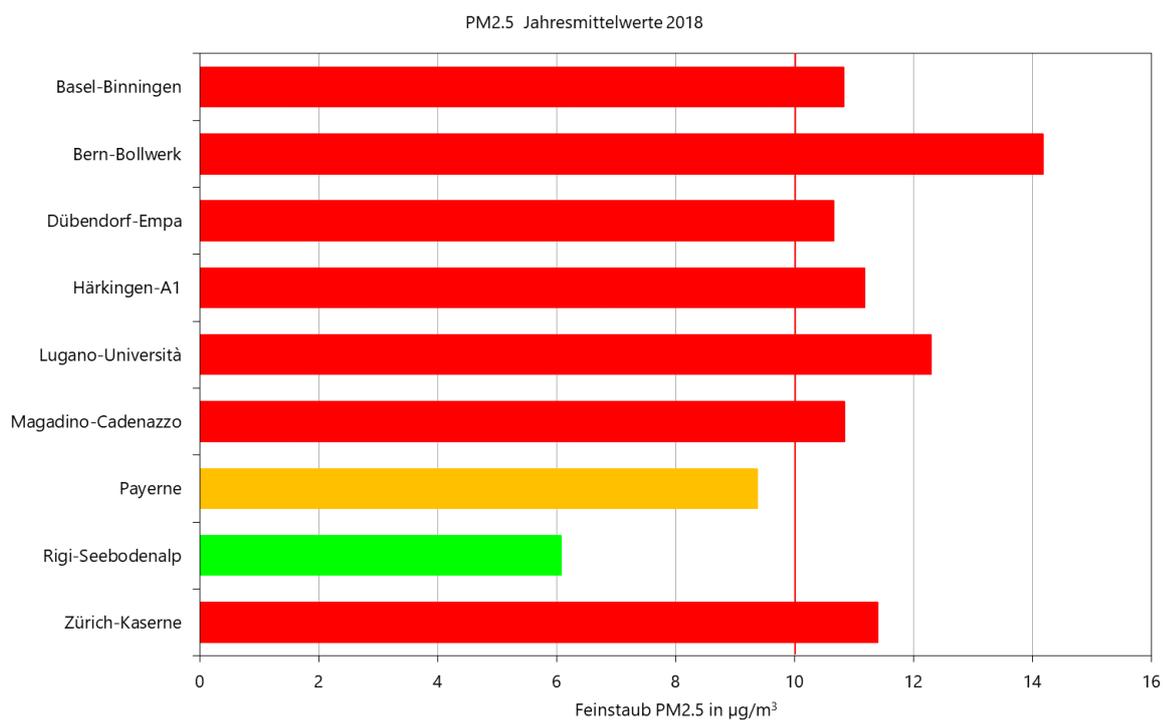
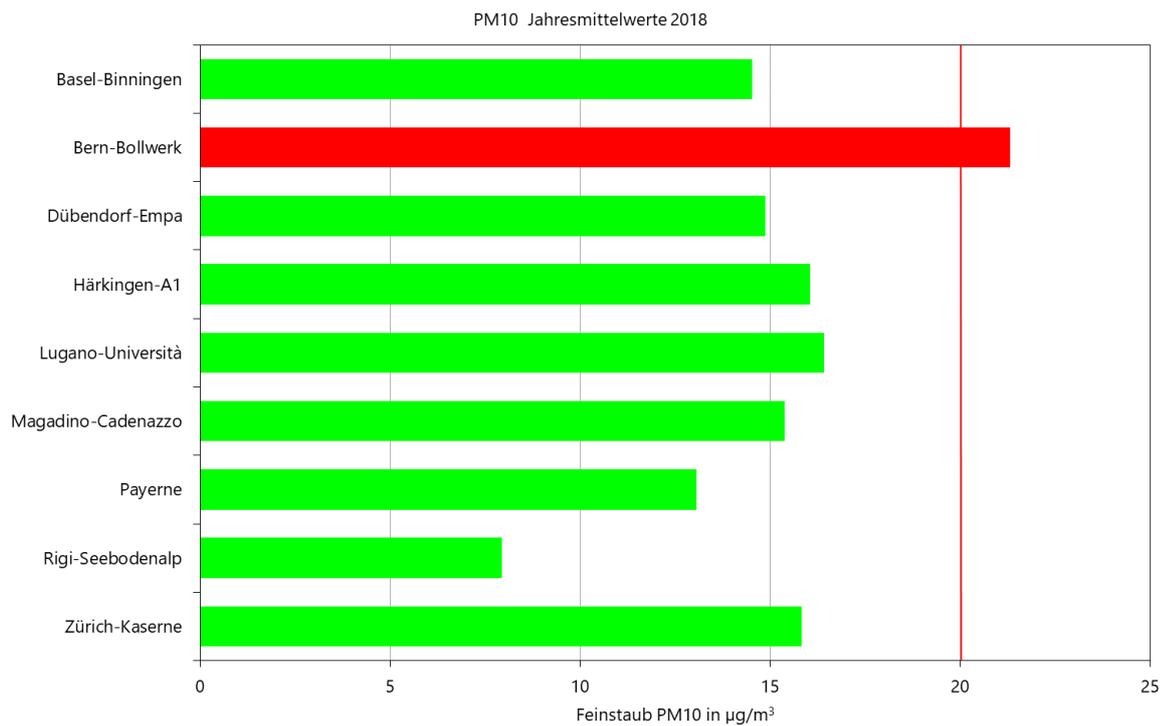


Abb. 2: Vergleich der Jahresmittelwerte 2018 von PM10 (oben) und PM2.5 (unten) mit den Immissionsgrenzwerten (PM10 Grenzwert: $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$; PM2.5 Grenzwert: $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

■ unterhalb Grenzwert
 ■ Bereich Grenzwert
 ■ über Grenzwert

Abbildung 3 zeigt als Vergleich den langjährigen Verlauf der Jahresmittelwerte für PM₁₀, PM_{2.5} und PM₁, wobei die PM₁-Messungen an allen Stationen per Ende 2013 eingestellt wurden. An allen Stationen sind die Feinstaubbelastungen über den gesamten Messzeitraum zurückgegangen. In den Jahren 2003 und 2006 gab es auf der Alpennordseite häufig Inversionslagen die wetterbedingt zu erhöhten Belastungen führten.

Im Jahr 2014 wurden die jeweils tiefsten PM₁₀- und PM_{2.5}-Jahresmittelwerte seit Beginn der Messreihen registriert. Seither verbleiben die Konzentrationen an allen Stationen auf ähnlichem Niveau wie 2014. Gegenüber den hohen Werten im Jahre 2003 weisen die aktuellen Jahresmittelwerte der Stationen ungefähr die Hälfte auf. Während in den Jahren 2014 (18.8 µg/m³) und 2016 (19.4 µg/m³) der PM₁₀-Jahresmittelwert der Station Bern-Bollwerk knapp unter dem Grenzwert von 20 µg/m³ lag, liegt der aktuelle Jahresmittelwert von 21.3 µg/m³, wie bereits jener von 2015 (21.5 µg/m³) und 2017 (21.3 µg/m³) knapp über dem Grenzwert. Der langjährige Trend resultiert aus den abnehmenden Emissionen von Feinstaub und den gasförmigen Vorläufern von Feinstaub, die kurzzeitigen Schwankungen der Jahresmittelwerte sind hauptsächlich auf die wechselnden Wetterverhältnisse zurückzuführen. Von Mitte 2007 bis Mitte 2008 wurden die Messwerte der Station Bern-Bollwerk während des Umbaus des Bahnhofplatzes durch den stark verminderten Verkehr am Bollwerk beeinflusst (tiefere Jahresmittelwerte der Massenkonzentrationen PM₁₀, PM_{2.5} und PM₁). Interessant ist die Tatsache, dass ab 2009 nach der Wiederfreigabe des Verkehrs am Bollwerk, trotz Zunahme des Verkehrs auf beinahe die ursprüngliche Verkehrsaktivität, die PM-Konzentrationen nicht erneut zunahmten, sondern bis 2012 weiter gesunken sind. Diverse umfangreiche Bauarbeiten unmittelbar in der Nähe der Messstation haben im Jahr 2013 zu einem Anstieg der Massenkonzentrationen geführt. An der Station Bern-Bollwerk wurden 2007 und 2008 zudem vergleichsweise tiefe Partikelanzahlkonzentrationen beobachtet (siehe Abb. 11). Auch hier nahmen die Konzentrationen nach Ende der Bauarbeiten nicht mehr signifikant zu, sondern stagnierten bis 2011. Im Jahr 2012 und 2014 nahmen die Partikelanzahlkonzentrationen nochmals stark ab und der aktuelle Jahresmittelwert 2018 am Standort Bern-Bollwerk liegt bei 17018 Part/cm³. Gegenüber den Jahresmittelwerten am Anfang der Messreihen (2005, 2006) entspricht dies einer Halbierung der Konzentration.

Auch in Härkingen-A1 ist zu beachten, dass es einen Einfluss durch umfangreiche Bauarbeiten in unmittelbarer Nähe zur Station (Ausbau der Autobahn auf sechs Fahrspuren; Oktober 2011 – März 2015) auf die Messungen gab.

Die Veränderung der PM₁₀-Konzentration in der gesamten Messperiode 1998 – 2018 zeigt Abbildung 4. Die Abnahme der PM₁₀ – Konzentration zwischen Beginn der Messreihe (Mittelwert 1998 – 2000) bis zum aktuellen Zeitpunkt (Mittelwert der vergangenen 3 Jahre, 2016 – 2018) liegt im Bereich zwischen -38% (Zürich-Kaserne) und -49% (Lugano-Universität).

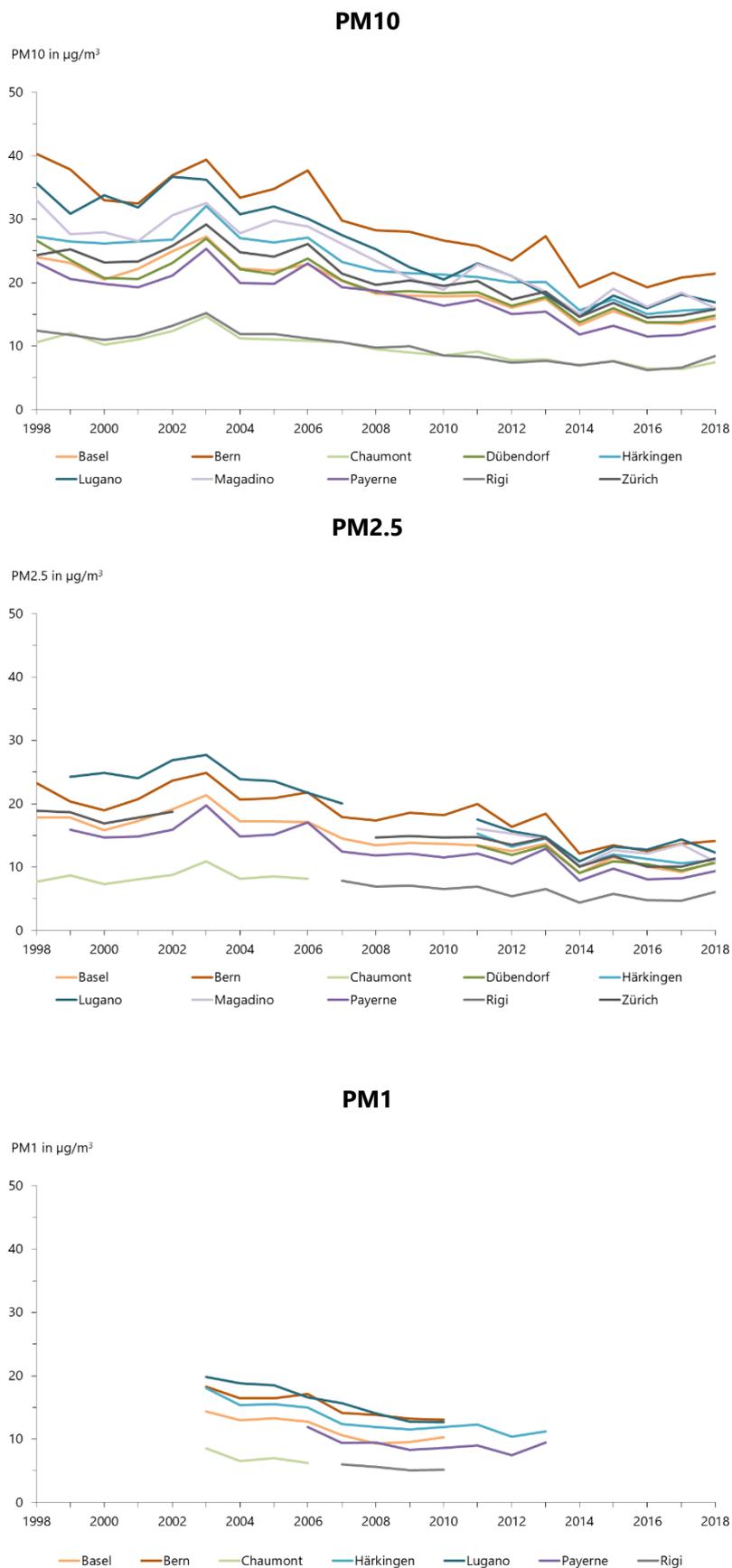


Abb. 3: Langjährige Verläufe der Jahresmittelwerte von PM10, PM2.5 und PM1

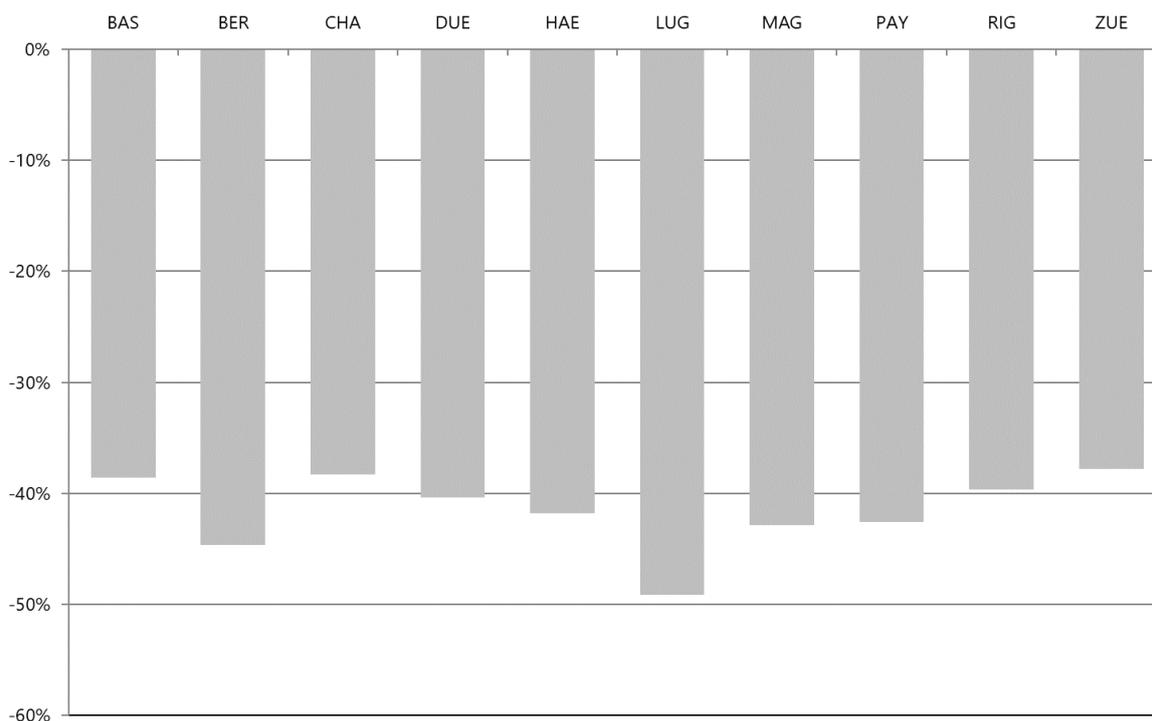


Abb. 4: Veränderung der PM10-Konzentration zwischen Beginn der Messreihe (MW 1998-2000) und aktuellem Zeitpunkt (MW der vergangenen 3 Jahre 2016 – 2018)

Wie bei den Jahresmittelwerten ist bei der Anzahl von Überschreitungen des PM10-Tagesgrenzwertes von $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ eine Abnahme im langjährigen Verlauf zu verzeichnen (Abb. 5). Im Jahr 2006 führten häufige Inversionswetterlagen im Winter auf der Alpennordseite zu zahlreichen Überschreitungen, seither hat die Anzahl der Grenzwertüberschreitungen generell abgenommen. Nach einer starken Abnahme an Grenzwertüberschreitungen an allen Stationen im Jahr 2014, einem leichten Anstieg im Jahr 2015 und den tiefsten Werten seit Beginn der Messreihen im Jahr 2016, wurde 2017 eine leichte Zunahme und im vergangenen Jahr wieder eine Abnahme an allen Stationen registriert. Rigi-Seebodenalp ist die einzige Station die seit 2009 keine Grenzwertüberschreitungen aufweist. Neben Rigi wurden im Jahr 2018 auch an der Station Payerne keine Grenzwertüberschreitungen verzeichnet. An den beiden Standorten Magadino-Cadenazzo und Lugano-Università auf der Alpensüdseite wurde im vergangenen Jahr erstmals seit 2014 wieder eine Abnahme von Grenzwertüberschreitungen registriert. Die Summe aller Überschreitungen aller Stationen hat sich von 228 im Jahr 2004 auf 27 im Jahr 2018 kontinuierlich reduziert.

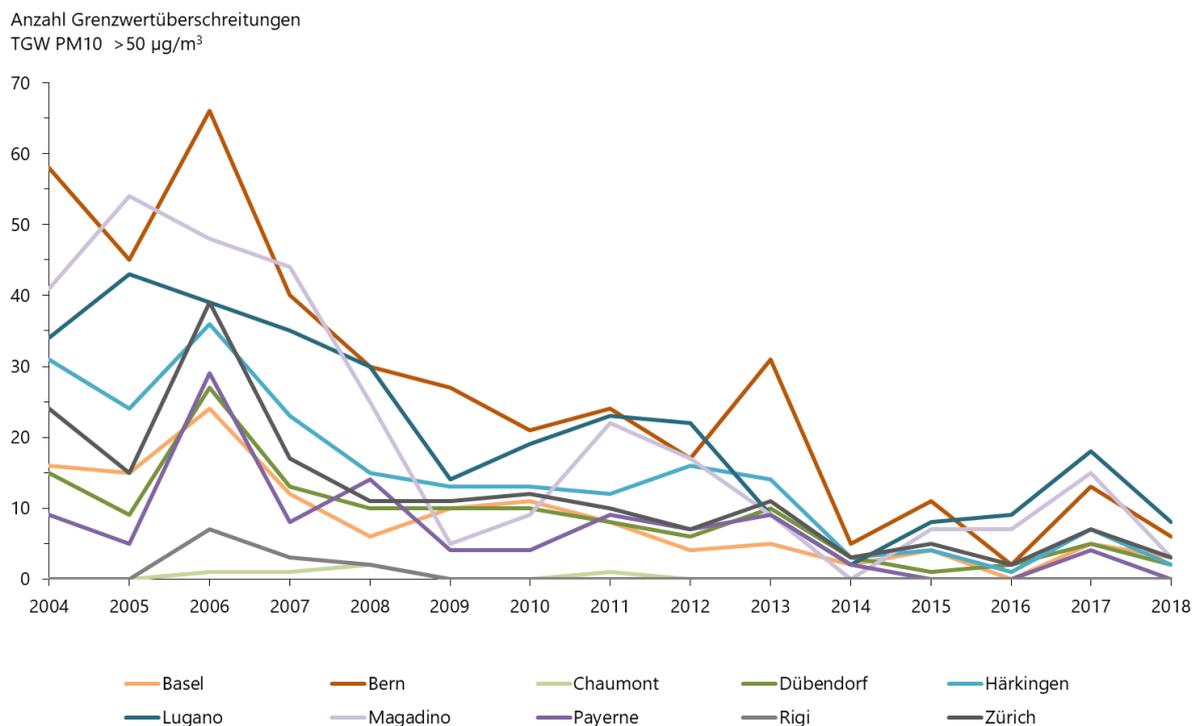


Abb. 5: Langjähriger Verlauf der jährlichen Anzahl Überschreitungen des Tagesgrenzwertes (50 µg/m³)

Die Abbildung 6 gibt einen Überblick über die langjährigen Verläufe der durchschnittlichen PM_{2.5}/PM₁₀ - Verhältnisse der Tageswerte, resp. der Jahresmittelwerte. Als Vergleich dazu sind die entsprechenden Resultate der PM₁/PM₁₀ - Verhältnisse der Tageswerte, resp. der Jahresmittelwerte in Abbildung 7 dargestellt. Die entsprechenden Einzelwerte sind in den Tabellen A1- A4 im Anhang zusammengefasst. Die Resultate illustrieren die relativ geringe Bandbreite der Schwankungen dieser Verhältnisse von Station zu Station. Eine Ausnahme bildet die Strassenschlucht in Bern mit einem höheren Anteil im Grössenbereich von 2.5 bis 10 µm und entsprechend tieferen Verhältnissen. In den Jahren von 2009 bis 2013 war das PM_{2.5}/PM₁₀-Verhältnis aus unbekanntem Gründen ungewöhnlich hoch und im Bereich der anderen NABEL-Stationen. Ein ebenfalls etwas abweichendes Verhalten gegenüber den anderen Stationen wird in Payerne beobachtet. Hier hat sich das bis 2006 stets zwischen 0.71 und 0.78 liegende PM_{2.5}/PM₁₀-Verhältnis der Tageswerte in den Jahren 2007 und 2008 auf etwa 0.6 verringert. Von 2009 bis 2013 hat sich das Verhältnis wieder auf das frühere Niveau von 0.75 erhöht. Nach einer Zunahme der mittleren PM_{2.5}/PM₁₀-Verhältnisse im Jahr 2013 an allen Stationen (Ausnahme Bern-Bollwerk) und einem starken Abfall im Jahr 2014 ist die Entwicklung in den vergangenen Jahren an den verschiedenen Stationen nicht identisch. In Abbildung 6 ist ersichtlich, dass an der Station Basel-Binningen die mittleren Verhältnisse der vergangenen 5 Jahre stagnieren, während an den übrigen Stationen das PM_{2.5}/PM₁₀-Verhältnis ansteigt (Ausnahme Härkingen-A1, dort zeigt sich kein einheitliches Bild). Das Verhältnis des Jahresmittels von PM_{2.5} zum Jahresmittel von PM₁₀ liegt für

die meisten Standorte im Bereich von 0.70 – 0.77, einzig am Verkehrsstandort Bern-Bollwerk wird ein tieferes Verhältnis von 0.64 registriert.

Im langjährigen durchschnittlichen Verlauf der Monatsmittelwerte der PM_{2.5}/PM₁₀-Verhältnisse (2003 – 2018) zeigen alle Stationen höhere Werte im Winter, wenn auch unterschiedlich ausgeprägt (siehe Abb. 8). Ähnlich, aber deutlich weniger ausgeprägt sind die Jahregänge der durchschnittlichen PM₁/PM₁₀-Verhältnisse (siehe Abb. 9) in der Zeitperiode 2003 – 2013 (Messungen wurden 2013 eingestellt).

Den mittleren Verlauf der Monatswerte 2003-2018 von PM₁₀ und PM_{2.5}, sowie für PM₁ von 2003 – 2013 zeigt Abbildung 10. Für die nicht erhöht gelegenen Stationen zeigt sich der erwartete typische Verlauf mit höheren Konzentrationen in der kalten Jahreszeit, dies aufgrund der im Winter im Durchschnitt stabileren Schichtung der bodennahen Luftmassen mit entsprechend schlechterer Verdünnung der emittierten Schadstoffe. Die erhöhten Stationen Chaumont und Rigi-Seebodenalp, welche im Winter häufig über der Inversionsgrenze liegen, weisen dagegen im Winter tiefere Werte auf als im Sommer.

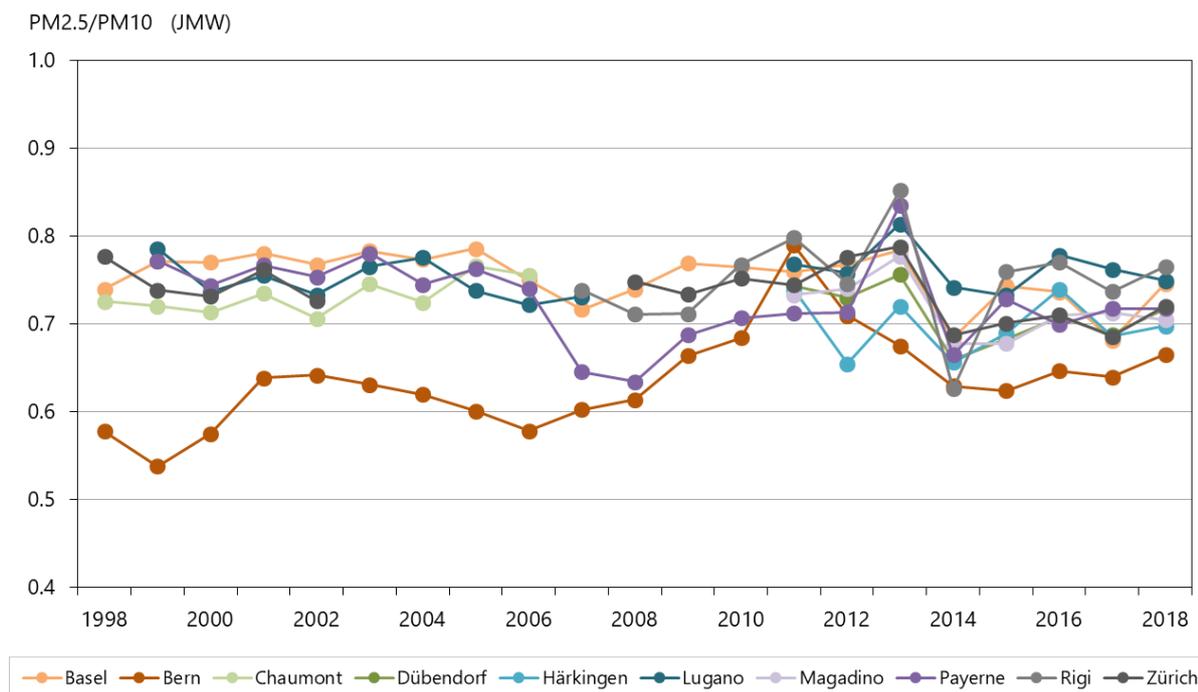
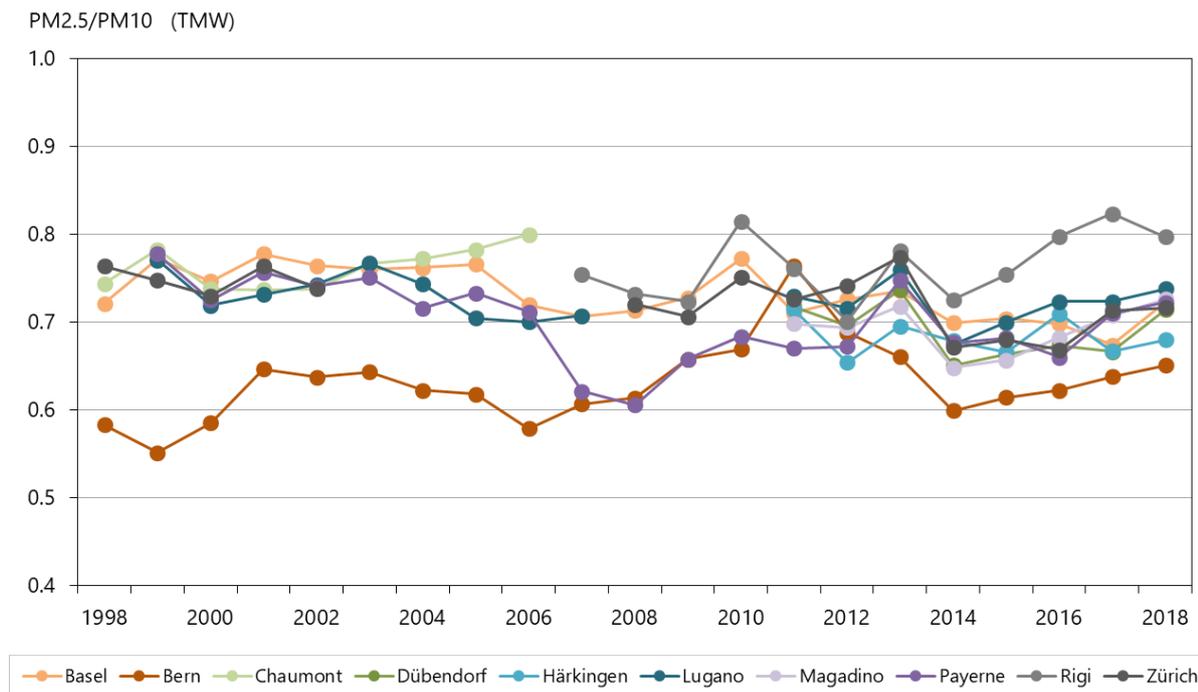


Abb. 6: Langjähriger Verlauf der mittleren PM2.5/PM10-Verhältnisse der Tageswerte (oben) und der PM2.5/PM10-Verhältnisse der Jahresmittelwerte (unten)

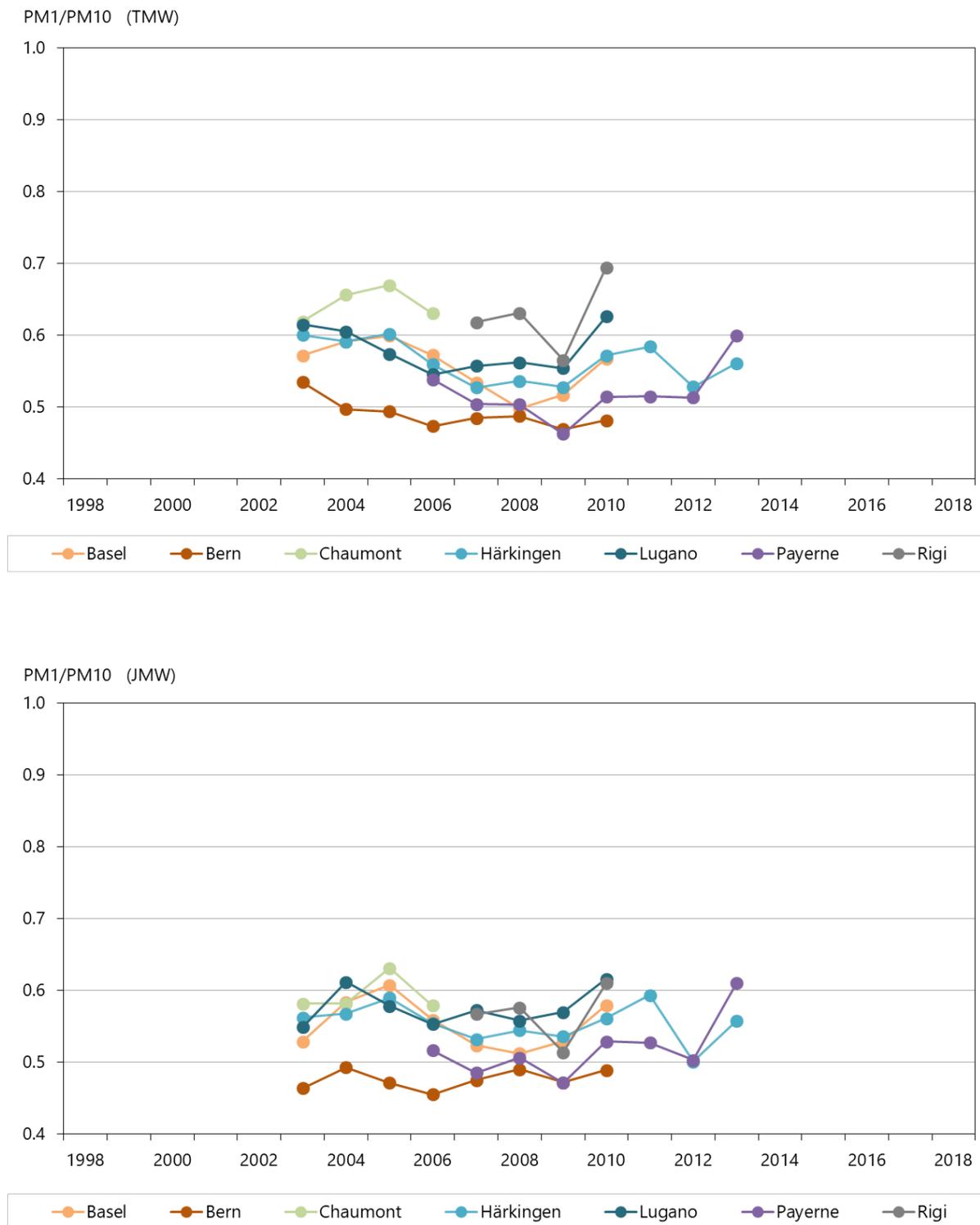


Abb. 7: Langjähriger Verlauf der mittleren PM1/PM10-Verhältnisse der Tageswerte (oben) und der PM1/PM10-Verhältnisse der Jahresmittelwerte (unten)

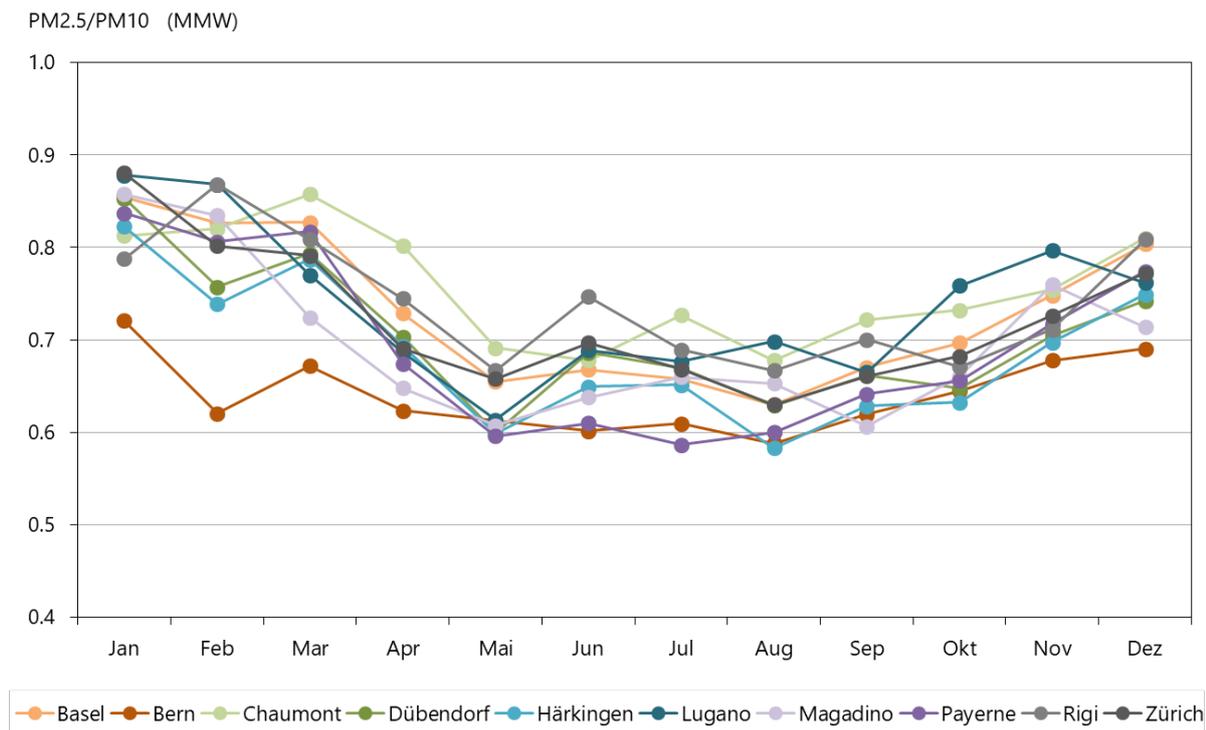


Abb. 8: Durchschnittlicher Jahresverlauf der Monatsmittelwerte der PM2.5/PM10-Verhältnisse in der Zeitperiode 2003- 2018

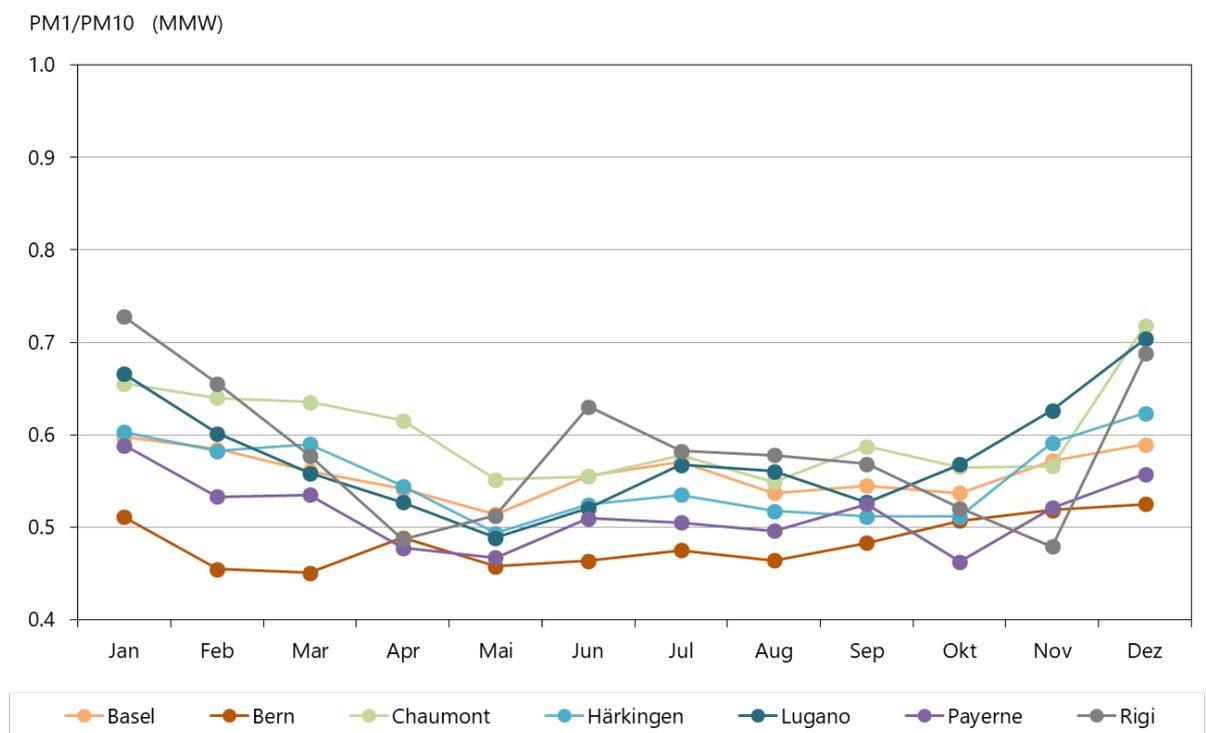


Abb. 9: Durchschnittlicher Jahresverlauf der Monatsmittelwerte der PM1/PM10-Verhältnisse in der Zeitperiode 2003- 2013

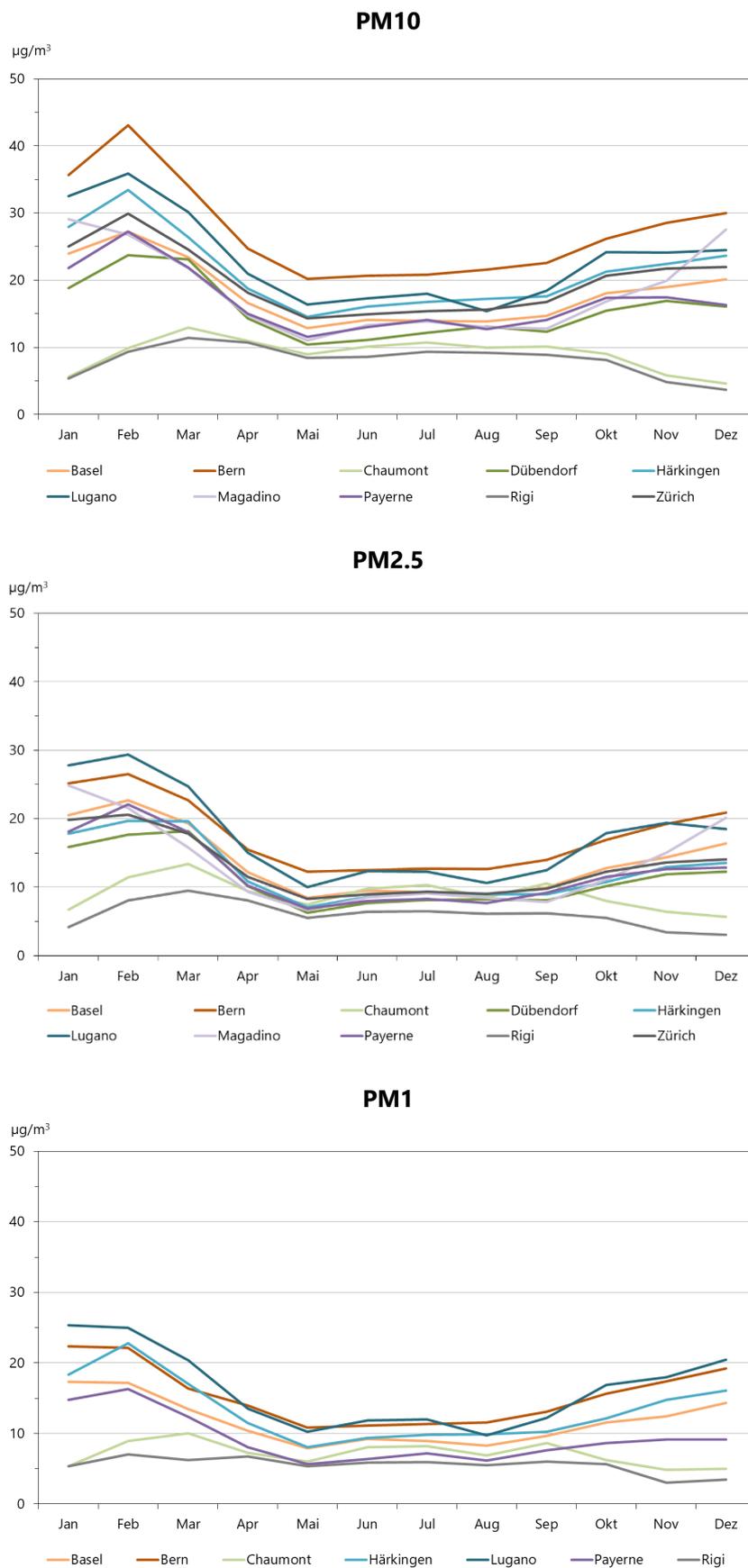


Abb. 10: Mittlerer Verlauf der Monatswerte ab 2003 von PM10, PM2.5 und PM1

Der Verlauf der Jahresmittelwerte der Partikelanzahlkonzentrationen seit Beginn der Messreihen ist in Abbildung 11 dargestellt. Die Verläufe sind an den einzelnen Stationen etwas uneinheitlich, weisen aber generell eine sinkende Tendenz mit einer geringeren Abnahme in den Jahren 2014-2018 auf.

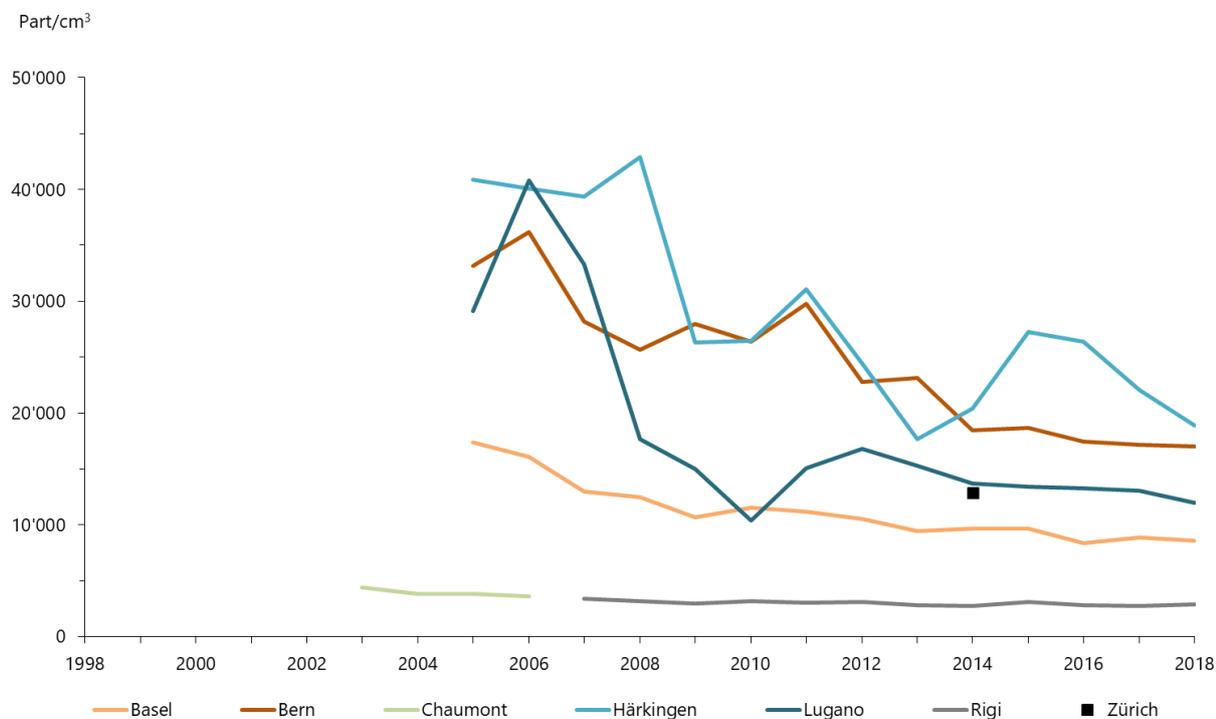


Abb. 11: Verlauf der Jahresmittelwerte der Partikelanzahl seit Beginn der Messreihen. An den quellennahen Standorten Bern, Lugano und Härkingen sind grosse Veränderungen der Partikelanzahlkonzentrationen innerhalb von wenigen Jahren zu beobachten. Vermutlich ist dies auf Änderungen der Aktivitäten von Emissionsquellen in unmittelbarer Nähe der Messstationen zurückzuführen.

Wie im Kapitel 3.3 (Probenahme und Analytik) bereits erwähnt, wurde in Härkingen-A1 vom 27.11.2008 bis 23.03.2011 eine Ansaugleitung mit 1/8-Zoll Durchmesser verwendet, vorher und nachher eine solche mit 1/4-Zoll Durchmesser. Der unterschiedliche Querschnitt der Ansaugleitung hat möglicherweise einen Einfluss auf die gemessenen Werte, kann allerdings den starken Rückgang der Partikelanzahlkonzentration an dieser Station zwischen 2008 und 2009 nicht erklären. Generell fällt auf, dass an den quellennahen Standorten Bern-Bollwerk, Lugano-Università und Härkingen-A1 teilweise grosse Veränderungen der Partikelanzahlkonzentrationen innerhalb von wenigen Jahren zu beobachten sind. Es wird vermutet, dass dies auf Veränderungen der Aktivitäten von Emissionsquellen in unmittelbarer Nähe der Messstationen zurückzuführen ist. Messtechnische Gründe, insbesondere zeitlich variierende Verluste der Probenahme, können allerdings nicht ganz ausgeschlossen werden. Im Gegensatz zu allen anderen Stationen, an denen die Jahresmittelwerte der Partikelanzahl in den letzten 4 Jahren relativ konstant blieben, weist

Härkingen-A1 einen starken Anstieg im Jahr 2015, gefolgt von einer Abnahme in den vergangenen Jahren auf. Der Jahresmittelwert 2018 ist mit 18'909 im Bereich des tiefsten gemessenen Jahresmittelwerts seit Messbeginn (2013; 17'630). Es ist zu beachten, dass zwischen Oktober 2011 und März 2015 umfangreiche Bauarbeiten in unmittelbarer Nähe zur Messstation Härkingen-A1 durchgeführt wurden (Ausbau der Autobahn auf sechs Fahrspuren).

In Abbildung 12 und 13 sind der Jahresverlauf der Monatsmittelwerte im Jahr 2018, sowie der durchschnittliche Jahresverlauf der Monatsmittelwerte der Partikelanzahlkonzentration seit Beginn der Messreihen dargestellt. Qualitativ gleichen die durchschnittlichen Jahresverläufe der Monatsmittelwerte der Partikelanzahlkonzentration (Abb. 13) denen der Massenkonzentrationen (Abb. 10). Ausnahme ist die Messreihe der Station Härkingen-A1, welche einen etwas deformierten Jahresgang aufweist, Grund dafür sind die Werte vom Sommer/Herbst 2004, wo aus nicht geklärten Gründen untypisch hohe Partikelanzahlkonzentrationen gemessen wurden. Die Jahresgänge der Stationen Basel-Binningen und Zürich-Kaserne zeigen einen weit weniger ausgeprägten Jahresverlauf als die entsprechenden Jahresverläufe der strassennahen Standorte Bern-Bollwerk, Härkingen-A1 und Lugano-Universität. Generell zeigen die Resultate der seit Anfang 2007 begonnenen zusätzlichen Partikelmessungen an der Station Rigi-Seebodenalp sehr ähnliche Charakteristika wie die davor gemessenen Werte an der Station Chaumont. Die Messungen an der erhöht gelegenen, wichtigen EMEP-Station Rigi-Seebodenalp werden fortgesetzt.

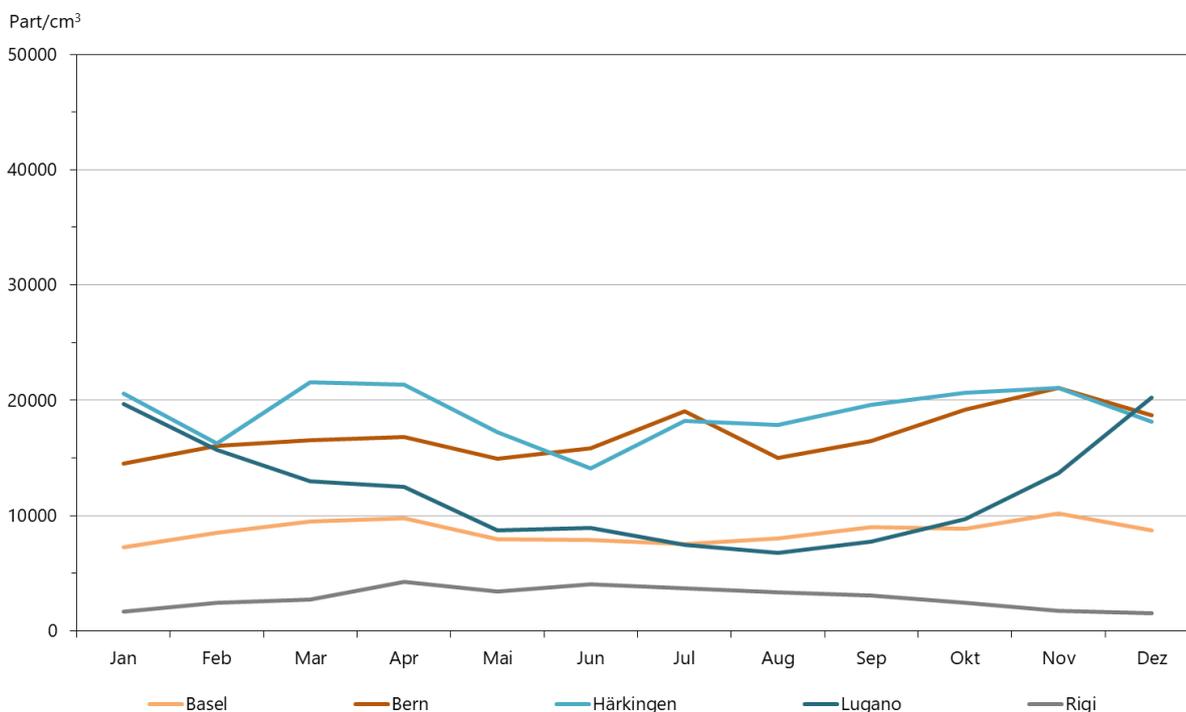


Abb. 12: Jahresverlauf der Monatsmittelwerte im Jahr 2018

Resultate der gravimetrischen Feinstaub- und der Partikelanzahlmessungen

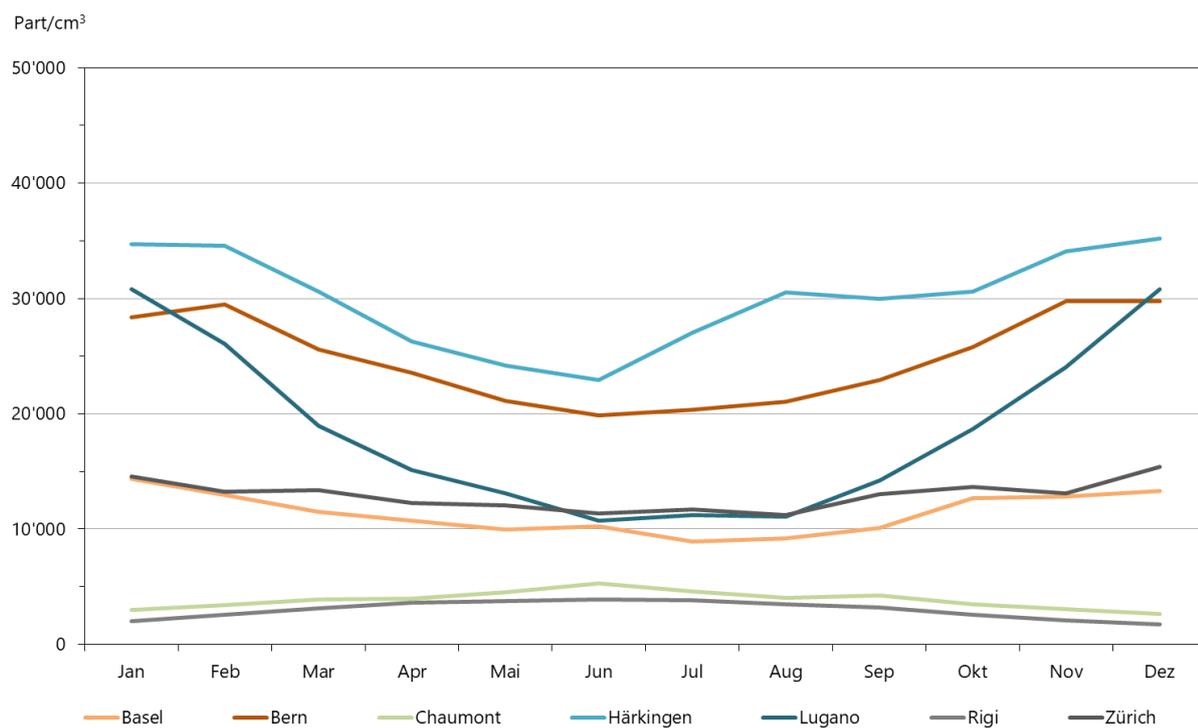


Abb. 13: Durchschnittlicher Jahresverlauf der Monatsmittelwerte der Partikelanzahlkonzentration seit Beginn der Messreihen

5 Literaturverzeichnis

- BAFU (2019). Auswirkungen der Luftverschmutzung auf die Gesundheit. <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/luft/fachinformationen/auswirkungen-der-luftverschmutzung/auswirkungen-der-luftverschmutzung-auf-die-gesundheit.html>
- CEN (2014). Aussenluft - Gravimetrisches Standardmessverfahren für die Bestimmung der PM₁₀ - oder PM_{2,5}-Massenkonzentration des Schwebstaubes. EN 12341:2014.
- CEN (2016). Aussenluft – Bestimmung der Partikelanzahlkonzentration des atmosphärischen Aerosols. CEN/TS 16976:2016.
- CFHA (2013). Les poussières fines en Suisse 2013. Commission fédérale de l'hygiène de l'air (CFHA). Berne. 66 p.
http://www.ekl.admin.ch/fileadmin/ekl-dateien/themen/Les_poussieres_fines_en_Suisse_2013.pdf
- Ecoplan / Infrac (2019). Externe Effekte des Verkehrs 2015. – Aktualisierung der Berechnungen von Umwelt-, Unfall und Gesundheitseffekten des Strassen-, Schienen-, Luft und Schiffsverkehrs 2010 bis 2015. Auftraggeber: Bundesamt für Raumentwicklung (ARE). Schlussbericht 185 S.
- EEA (2018). Air quality in Europe – 2018 report.
<https://www.eea.europa.eu/publications/air-quality-in-europe-2018>.
- EKL (2013). Feinstaub in der Schweiz 2013. Eidgenössische Kommission für Lufthygiene (EKL). Bern. 63 S.,
http://www.ekl.admin.ch/fileadmin/ekl-dateien/themen/Feinstaub_in_der_Schweiz_2013.pdf
- Empa (2018). Technischer Bericht zum Nationalen Beobachtungsnetz für Luftfremdstoffe (NABEL) 2018; Dübendorf, Switzerland; <http://empa.ch/web/s503/nabel>.
- Europäische Union (2008). RICHTLINIE 2008/50/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 21. Mai 2008 über Luftqualität und saubere Luft für Europa. Amtsblatt der Europäischen Union, L 152.
- Gehrig, R., Hueglin, C., Schwarzenbach, B., Seitz, T. and Buchmann, B. (2005). A new method to link PM₁₀ concentrations from automatic monitors to the manual gravimetric reference method according to EN12341. Atmos. Environ. 39 (12): 2213-2223.
- Hinds, W. C. (1999). Aerosol Technology; Properties, Behavior and Measurement of Airborne Particles. New York, John Wiley & Sons.

- ISEE (2019) ISEE Policy Statement on Air Pollution. Die Rolle der Luftschadstoffe für die Gesundheit. Eine Expertise im Namen der Internationalen Gesellschaft für Umweltepidemiologie (ISEE) und der European Respiratory Society (ERS). <http://www.youreventinfo.org/ISEE/Documents/Die-Rolle-der-Luftschadstoffe-f%C3%BCr-die-Gesundheit.pdf>
- OFEV (2019). Effets de la pollution atmosphérique sur la santé. <https://www.bafu.admin.ch/bafu/fr/home/themes/air/info-specialistes/effets-de-la-pollution-atmospherique/effets-de-la-pollution-atmospherique-sur-la-sante.html>.
- Union européenne (2008). DIRECTIVES 2008/50/ CE du Parlement européen et du Conseil du 21 mai 2008 concernant la qualité de l'air ambiant et un air pur pour l'Europe. Journal officiel de l'Union européenne L 152/1.
- WHO (2013a). Review of Evidence on Health Aspects of Air Pollution - REVIHAAP Project. Final Technical Report. WHO Regional Office for Europe. Copenhagen. www.euro.who.int/en/health-topics/environment-and-health/air-quality/publications/2013/review-of-evidence-on-health-aspects-of-air-pollution-revihaap-project-final-technical-report.
- WHO (2013b). Health risks of air pollution in Europe – HRAPIE project: Recommendations for concentration-response functions for cost-benefit analysis of particulate matter, ozone and nitrogen dioxide. WHO Regional Office for Europe; <http://www.euro.who.int/en/health-topics/environment-and-health/air-quality/publications/2013/health-risks-of-air-pollution-in-europe-hrapie-project.-recommendations-for-concentrationresponse-functions-for-costbenefit-analysis-of-particulate-matter,-ozone-and-nitrogen-dioxide>.
- WHO (2013c). Health Effects of Particulate Matter. Policy implications for countries in eastern Europe, Caucasus and Central Asia. ISBN 978 92 0001 7. <http://www.euro.who.int/en/health-topics/environment-and-health/air-quality/publications/2013/health-effects-of-particulate-matter.-policy-implications-for-countries-in-eastern-europe,-caucasus-and-central-asia-2013>.
- WHO (2016a). Ambient air pollution: A global assessment of exposure and burden of disease. WHO 2016. ISBN 978 92 4 151 135 3. <http://www.who.int/phe/publications/air-pollution-global-assessment/en/>.

- WHO (2016b). WHO Expert Consultation: Available evidence for the future update of the WHO Global Air Quality Guidelines (AQGs) Meeting report, Bonn, Germany, 29 September-1 October 2015: WHO Regional Office for Europe; <http://www.euro.who.int/en/health-topics/environment-and-health/air-quality/publications/2016/who-expert-consultation-available-evidence-for-the-future-update-of-the-who-global-air-quality-guidelines-aqgs-2016>.
- WHO (2017). Evolution of WHO air quality guidelines: past, present and future. Copenhagen: WHO Regional Office for Europe; 2017. ISBN 978928905306. http://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0019/331660/Evolution-air-quality.pdf.
- WHO (2018a). Burden of disease from ambient air pollution for 2016. https://www.who.int/airpollution/data/AAP_BoD_results_May2018_final.pdf.
- WHO (2018b). Ambient (outdoor) air quality and health. Factsheet 2018. [https://www.who.int/en/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/en/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health).

Anhang

Tab. A1: Mittlere PM2.5/PM10-Verhältnisse der Tagesmittelwerte

	BAS	BER	CHA	DUE	HAE	LUG	MAG	PAY	RIG	ZUE
1998	0.72	0.58	0.74							0.76
1999	0.77	0.55	0.78			0.77		0.78		0.75
2000	0.75	0.59	0.74			0.72		0.73		0.73
2001	0.78	0.65	0.74			0.73		0.76		0.76
2002	0.76	0.64	0.74			0.74		0.74		0.74
2003	0.76	0.64	0.77			0.77		0.75		
2004	0.76	0.62	0.77			0.74		0.72		
2005	0.77	0.69	0.78			0.71		0.73		
2006	0.72	0.58	0.80			0.70		0.71		
2007	0.71	0.61				0.71		0.62	0.75	
2008	0.71	0.61						0.61	0.73	0.72
2009	0.73	0.66						0.66	0.72	0.71
2010	0.77	0.67						0.68	0.82	0.75
2011	0.71	0.76		0.72	0.71	0.73	0.70	0.67	0.76	0.73
2012	0.73	0.69		0.70	0.65	0.72	0.69	0.67	0.70	0.74
2013	0.74	0.66		0.74	0.70	0.76	0.72	0.75	0.78	0.77
2014	0.70	0.60		0.65	0.68	0.67	0.65	0.68	0.73	0.67
2015	0.70	0.61		0.66	0.67	0.70	0.66	0.68	0.75	0.68
2016	0.70	0.62		0.67	0.71	0.72	0.68	0.66	0.80	0.69
2017	0.67	0.64		0.67	0.67	0.72	0.71	0.71	0.82	0.71
2018	0.72	0.65		0.71	0.68	0.74	0.73	0.72	0.80	0.72

Tab. A2: PM2.5/PM10-Verhältnisse der Jahresmittelwerte

	BAS	BER	CHA	DUE	HAE	LUG	MAG	PAY	RIG	ZUE
1998	0.74	0.58	0.73							0.78
1999	0.77	0.54	0.72			0.79		0.77		0.74
2000	0.77	0.58	0.71			0.74		0.74		0.73
2001	0.78	0.64	0.74			0.76		0.77		0.76
2002	0.77	0.64	0.71			0.73		0.75		0.73
2003	0.78	0.63	0.75			0.77		0.78		
2004	0.77	0.62	0.72			0.78		0.74		
2005	0.79	0.60	0.77			0.74		0.76		
2006	0.75	0.58	0.76			0.72		0.74		
2007	0.72	0.60				0.73		0.65	0.74	
2008	0.74	0.61						0.63	0.71	0.75
2009	0.77	0.66						0.69	0.71	0.73
2010	0.77	0.68						0.71	0.77	0.75
2011	0.76	0.79		0.74	0.74	0.77	0.73	0.71	0.80	0.74
2012	0.77	0.71		0.73	0.65	0.76	0.74	0.71	0.75	0.78
2013	0.78	0.68		0.76	0.72	0.81	0.78	0.84	0.85	0.79
2014	0.68	0.63		0.66	0.66	0.74	0.68	0.66	0.63	0.69
2015	0.74	0.62		0.68	0.69	0.73	0.68	0.73	0.76	0.70
2016	0.74	0.65		0.71	0.74	0.78	0.71	0.70	0.77	0.71
2017	0.68	0.64		0.69	0.69	0.76	0.71	0.72	0.74	0.69
2018	0.75	0.67		0.72	0.70	0.75	0.70	0.72	0.77	0.72

Tab. A3: Mittlere PM1/PM10-Verhältnisse der Tagesmittelwerte

	BAS	BER	CHA	LUG	PAY	HAE	RIG
2003	0.57*	0.54*	0.62	0.62		0.60	
2004	0.59	0.50	0.66	0.61		0.59	
2005	0.60	0.49	0.67	0.57		0.60	
2006	0.57	0.47	0.63	0.55	0.54	0.56	
2007	0.53	0.49		0.56	0.50	0.53	0.62
2008	0.50	0.49		0.56	0.50	0.54	0.63
2009	0.52	0.47		0.55	0.46	0.53	0.57
2010	0.57	0.48		0.63	0.51	0.57	0.70
2011					0.52	0.58	
2012					0.51	0.53	
2013					0.60	0.56	
2014	**	**	**	**	**	**	**
2015	**	**	**	**	**	**	**
2016	**	**	**	**	**	**	**
2017	**	**	**	**	**	**	**
2018	**	**	**	**	**	**	**

* unvollständige Messreihen, siehe Tabelle 2

** 2014 PM1-Messungen eingestellt

Tab. A4: PM1/PM10-Verhältnisse der Jahresmittelwerte

	BAS	BER	CHA	LUG	PAY	HAE	RIG
2003	0.53*	0.46*	0.58	0.59*		0.56	
2004	0.58	0.49	0.58	0.61		0.57	
2005	0.61	0.47	0.63	0.58		0.59	
2006	0.56	0.46	0.58	0.55	0.52	0.55	
2007	0.52	0.48		0.57	0.49	0.53	0.57
2008	0.51	0.49		0.56	0.51	0.54	0.58
2009	0.53	0.47		0.57	0.47	0.54	0.51
2010	0.58	0.49		0.62	0.53	0.56	0.61
2011					0.53	0.59	
2012					0.50	0.50	
2013					0.61	0.59	
2014	**	**	**	**	**	**	**
2015	**	**	**	**	**	**	**
2016	**	**	**	**	**	**	**
2017	**	**	**	**	**	**	**
2018	**	**	**	**	**	**	**

* unvollständige Messreihen, siehe Tabelle 2

** 2014 PM1-Messungen eingestellt