

Partikelmessungen im NABEL

Messbericht 2024

Andrea Fischer und Christoph Hüglin

Empa, Abteilung Luftfremdstoffe/Umwelttechnik
Überlandstrasse 129, 8600 Dübendorf

Dübendorf, September 2025

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

Hinweis: Diese Studie/dieser Bericht wurde im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) verfasst. Für deren Inhalt sind allein die Autoren verantwortlich.

Dieser Bericht ist abrufbar unter: <https://www.empa.ch/web/s503>



Dübendorf, September 2025

Inhaltsverzeichnis

1	Zusammenfassung	2
2	Résumé	4
3	Messkonzept	6
3.1	Messstationen.....	6
3.2	Messprogramm	7
3.2.1	Gravimetrische Messungen	7
3.2.2	Kontinuierliche Messungen.....	8
3.3	Gleichwertigkeit der kontinuierlichen Feinstaubmessungen.....	9
4	Resultate der gravimetrischen Feinstaub- und der Partikelanzahl-messungen	12
5	Literaturverzeichnis.....	30
Anhang.....		34

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, Schlaganfälle, Lungenkrebserkrankungen und Herz-Kreislauf-Erkrankungen hervorgerufen werden (EEA 2025, EEA 2024, WHO 2025a, WHO 2025b, WHO 2024a, WHO 2024b, Swiss TPH 2022, Liu et al. 2022, WHO 2021a, Orellano et al. 2024, Orellano et al. 2020, Chen and Hoek 2020, WHO 2013a, WHO 2013b).

PM₁₀ und PM_{2.5} gelten als die wichtigsten Indikatoren für die Feinstaubbelastung. Seit 01.06.2018 gilt in der Schweiz ergänzend zu den Grenzwerten für PM₁₀ auch ein jährlicher Immissionsgrenzwert für PM_{2.5}. Dieser entspricht mit 10 µg/m³ für den Jahresmittelwert den bisherigen Empfehlungen der Weltgesundheitsorganisation (WHO 2017). Untersuchungen zeigen, dass bereits bei Belastungen, die unterhalb der aktuell gültigen Immissionsgrenzwerte liegen, nachteilige Auswirkungen auf die Gesundheit zu erwarten sind (Stafoggia et al. 2022, Brunekreef et al. 2021, WHO 2021b, Hoffmann et al. 2021). Im September 2021 hat die WHO neue Richtwerte (Air Quality Guidelines, AQGs) veröffentlicht und darin unter anderem neue Richtwerte für das Jahresmittel von PM₁₀ (15 µg/m³) und PM_{2.5} (5 µg/m³) empfohlen (WHO 2021b). Die Eidgenössischen Kommission für Lufthygiene (EKL) hat in einem Bericht die Bedeutung der neuen WHO-Luftqualitätsrichtwerte für die Schweiz bewertet. Die EKL empfiehlt für PM₁₀ und PM_{2.5} die Anpassung der Luftreinhalte-Verordnung (LRV) unter Berücksichtigung der WHO-Richtwerte und damit eine Senkung bzw. Ergänzung der heute gültigen Immissionsgrenzwerte (EKL 2023).

Ultrafeine Partikel tragen aufgrund ihrer Grösse (Durchmesser kleiner 100 nm) nur unwesentlich zur Massenkonzentration des Feinstaubs bei und werden daher durch PM₁₀ und PM_{2.5} nicht genügend abgebildet. Da ultrafeine Partikel über andere Mechanismen als die gröberen wirken können, empfiehlt die EKL, die Anzahlkonzentration von ultrafeinen Partikeln in der Aussenluft gemäss Vorsorgeprinzip zu minimieren und an repräsentativen Messstationen zu erfassen (EKL 2013).

Der vorliegende Bericht gibt eine Übersicht über die NABEL-Messungen der Massenkonzentrationen von Feinstaub (PM₁₀ und PM_{2.5}) sowie der Anzahlkonzentration von Feinstaubpartikeln im Zeitraum von 1998 bis 2024.

Die Partikelmessungen zeigen im Jahr 2024 ein ähnliches Bild wie in den vergangenen Jahren. Die PM₁₀-, PM_{2.5}- und die Partikelanzahl-Konzentrationen haben über den gesamten Messzeitraum deutlich abgenommen (Abb. 3 + Abb. 12). Die Abnahme der PM₁₀-Konzentration (Abb. 4) zwischen Beginn der Messreihe (Mittelwert 1998 – 2000) bis zum aktuellen Zeitpunkt (Mittelwert der vergangenen 3 Jahre, 2022 – 2024) liegt im Bereich zwischen 33 % (Sion-Aéroport-A9) und 56 % (Bern-Bollwerk). An allen NABEL-Standorten wurden 2024 die tiefsten Messwerte oder Werte im Bereich der tiefsten Messwerte seit Beginn der Messungen verzeichnet. An der Station Bern-

Bollwerk wurde 2024 der tiefste PM10-Jahresmittelwert ($14.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$) seit Beginn der Messreihe gemessen, während in den Jahren 2014-2019 Messwerte jeweils im Bereich des Grenzwerts von $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ registriert wurden. Während es zu Beginn der Messreihe grosse Unterschiede in den PM10-Konzentrationen der beiden Stationen Bern-Bollwerk und Sion-Aéroport-A9 gab, haben sich die Jahresmittelwerte im Laufe der Jahre angenähert und sind seit 2023 praktisch identisch. An allen anderen NABEL-Stationen liegen die PM10-Konzentrationen 2024 (Tab. 4; Abb. 1 und Abb. 2) zwischen 3.0 (Jungfrauoch) und $13.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Magadino-Cadenazzo) und sind damit deutlich unterhalb des Jahresgrenzwerts (Tab. 4; Abb. 1 und Abb. 2).

Im Jahr 2024 lagen die Jahresmittelwerte der PM2.5-Konzentrationen an sämtlichen NABEL-Standorten, wie bereits im vergangenen Jahr, unter dem PM2.5-Jahresgrenzwert von $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Die höchsten PM2.5-Jahresmittelwerte wurden 2024 an den beiden Standorten auf der Alpensüdseite, an der städtischen Station Lugano-Università ($9.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$) und am ländlichen Standort Magadino-Cadenazzo ($9.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$) registriert. An den übrigen NABEL-Stationen lagen die Jahresmittelwerte von PM2.5 im Jahr 2024 zwischen $1.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (hochalpine Station Jungfrauoch) und $8.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ an der strassennahen Messstation Bern-Bollwerk.

Wie bei den Jahresmittelwerten ist auch bei der Anzahl von Überschreitungen des PM10-Tagesgrenzwerts von $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ eine markante Abnahme über die gesamte Messperiode zu verzeichnen (Abb. 5). Im Jahr 2024 wurde an sämtlichen Standorten eine Gesamtzahl von 14 Überschreitungen verzeichnet, dies stellt eine leichte Zunahme im Vergleich zum Vorjahr (10 Grenzwertüberschreitungen) dar. An keinem NABEL-Standort wurde die zulässige Anzahl von drei Überschreitungen pro Jahr überschritten. Häufig haben starke Saharastaubereignisse zur Überschreitung des PM10-Tagesgrenzwerts beigetragen. Seit 2014 ist eine starke Abnahme an Überschreitungen zu verzeichnen, einzig 2017 gab es einen ausgeprägten Anstieg gegenüber dem Vorjahr. Diese Schwankungen in der jährlichen Anzahl an Überschreitungen des Tagesgrenzwerts sind hauptsächlich auf den Einfluss der Witterungsverhältnisse auf die Feinstaubbelastung und auf Saharastaubereignisse zurückzuführen. Die Summe der Überschreitungen an allen Stationen hat sich seit Messbeginn von 269 (Mittelwert 2004 – 2006) auf 15 (Mittelwert von 2022 – 2024) kontinuierlich reduziert.

Das Verhältnis des Jahresmittelwerts von PM2.5 zum Jahresmittelwert von PM10 liegt im Jahr 2024 für die meisten Standorte im Bereich von 0.61 - 0.68, einzig am stark verkehrsbelasteten Standort Sion-Aéroport-A9 (Autobahn) wird ein tieferes Verhältnis von 0.47 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 2017 - 2024 als in der Periode 2006 - 2013 auf (Abb. 12).

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, des accidents vasculaires cérébraux, des cancers du poumon, et des maladies cardiovasculaires (EEA 2025, EEA 2024, WHO 2025a, WHO 2025b, WHO 2024a, WHO 2024b, Swiss TPH 2022, Liu et al. 2022, WHO 2021a, Orellano et al. 2024, Orellano et al. 2020, Chen and Hoek 2020, WHO 2013a, WHO 2013b).

Les PM₁₀ et PM_{2.5} sont considérés comme les indicateurs les plus importants de la pollution par les particules fines. Depuis le 1er juin 2018, une valeur guides d'immission annuelle pour les PM_{2.5} est également en vigueur en Suisse, en plus des valeurs limites pour les PM₁₀. Avec 10 µg/m³ pour la moyenne annuelle, cela correspond aux recommandations faites jusqu'à présent par l'Organisation mondiale de la santé (OMS) (WHO 2017). Des études montrent que même des niveaux d'exposition inférieurs aux valeurs limites d'émission actuellement en vigueur peuvent avoir des effets néfastes sur la santé (Stafoggia et al. 2022, Brunekreef et al. 2021, WHO 2021b, Hoffmann et al. 2021). En septembre 2021, l'OMS a publié de nouvelles recommandations (Air Quality Guidelines, AQGs) incluant de nouvelles valeurs limites pour la moyenne annuelle des PM₁₀ (15 µg/m³) et des PM_{2.5} (5 µg/m³) (WHO 2021b). Dans un rapport, la Commission fédérale de l'hygiène de l'air (CFHA) a évalué l'importance des nouvelles valeurs indicatives de l'OMS pour la qualité de l'air en Suisse. Elle recommande d'adapter l'ordonnance fédérale sur la protection de l'air pour les PM₁₀ et PM_{2.5} en s'appuyant sur les valeurs indicatives de l'OMS et donc d'abaisser ou de compléter les valeurs limites d'immission actuellement en vigueur (EKL 2023).

En raison de leur taille (diamètre inférieur à 100 nm), les particules ultrafines ne contribuent que de manière insignifiante à la concentration massique des particules et ne sont donc pas suffisamment représentées par les PM₁₀ et PM_{2.5}. Comme les mécanismes d'action des particules ultrafines peuvent différer de ceux des particules plus grossières, la CFHA recommande de minimiser la concentration numérique de ces particules ultrafines dans l'air en vertu du principe de précaution et de les enregistrer aux stations de mesure représentatives (CFHA 2013).

Ce rapport donne un aperçu des mesures NABEL des concentrations massiques de particules fines (PM₁₀ et PM_{2.5}) et de la concentration numérique de particules au cours de la période 1998 - 2024.

En 2024, les mesures de particules montrent une image similaire à celle des années précédentes. Les concentrations de PM₁₀, PM_{2.5} et le nombre de particules ont diminué de manière significative sur toute la période de mesure (Fig. 3 + Fig. 12). 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, 2021 - 2024) se situe entre 33 % (Sion-Aéroport-A9) et 56 % (Bern-Bollwerk). Toutes les stations NABEL ont enregistré en 2024 les valeurs les plus basses

ou dans la plage des valeurs les plus basses depuis le début des mesures. La station de Bern-Bollwerk a enregistré en 2024 la moyenne annuelle de PM₁₀ la plus basse (14.6 µg/m³) depuis le début de la série de mesures, alors qu'entre 2014 et 2019, les valeurs mesurées étaient proches de la valeur limite de 20 µg/m³. Alors qu'au début de la série de mesures, il y avait de grandes différences entre les concentrations de PM₁₀ des deux stations de Bern-Bollwerk et de Sion-Aéroport-A9, les moyennes annuelles se sont rapprochées au cours des années et sont pratiquement identiques depuis 2023. Toutes les autres stations NABEL se situent en 2024 entre 3.0 (à Jungfrauoch) et 13.8 µg/m³ (à Magadino-Cadenazzo) et sont donc bien en dessous de la valeur limite (Tab. 4; Fig.1 et Fig. 2).

En 2024, les moyennes annuelles de PM_{2.5} mesurées dans toutes les stations NABEL étaient, comme l'année précédente, inférieures à la valeur limite annuelle de 10 µg/m³. En 2024, les moyennes annuelles de PM_{2.5} les plus élevées ont été mesurées aux deux sites du Sud des Alpes: à la station urbaine de Lugano-Università une valeur moyenne annuelle de 9.3 et au site rurale de Magadino-Cadenazzo une valeur de 9.0 µg/m³ a été mesurée. Aux autres stations NABEL, les valeurs moyennes annuelles de PM_{2.5} en 2024 varient de 1.5 µg/m³ (station de Jungfrauoch dans les Hautes-Alpes) à 8.9 µg/m³ à la station Bern-Bollwerk située à proximité d'une route.

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 l'ensemble de la période de mesure (Fig. 5). En 2024, un total de 14 dépassements a été enregistré sur l'ensemble des sites, ce qui représente une légère augmentation par rapport à l'année précédente (10 dépassements). Sur aucun site NABEL, le nombre autorisé de 3 dépassements par an n'a été dépassé. Souvent, les dépassements de la valeur limite journalière PM₁₀ sont dus aux épisodes de sable du Sahara. Depuis 2014, on observe une forte diminution des dépassements, seuls 2017 montrant une augmentation par rapport à l'année précédente. Ces fluctuations du nombre annuel de dépassements des valeurs limites journalières sont principalement dues à l'influence des conditions météorologiques et aux épisodes de sable du Sahara sur la pollution par les poussières fines. La somme des dépassements à toutes les stations n'a cessé de diminuer, passant de 269 (valeur moyenne 2004 – 2006) à 15 (valeur moyenne 2022 – 2024).

Le ratio entre la moyenne annuelle de PM_{2.5} et la moyenne annuelle de PM₁₀ en 2024 est de l'ordre de 0.61 - 0.68 pour la plupart des stations. Seule la station à forte circulation Sion-Aéroport-A9 (autoroute) a enregistré un ratio diminué de 0.47 (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 une diminution moins marquée au cours des années 2017 - 2024 que durant la période 2006 - 2013 (Fig. 12).

3 Messkonzept

3.1 Messstationen

Seit dem Jahr 1998 werden an NABEL-Stationen Partikelmessungen durchgeführt. Eine kurze Charakterisierung dieser Standorte ist in Tabelle 1 dargestellt. Eine detaillierte Beschreibung der Stationen hinsichtlich ihrer Lage und Umgebung findet sich im Technischen Bericht zum NABEL (Empa 2024).

Tab. 1: Charakterisierung der NABEL-Stationen

Basel-Binningen	BAS	Vorstädtisch; am Stadtrand auf dem Gebiet der Gemeinde Binningen
Bern-Bollwerk	BER	Städtisch, verkehrsbelastet; direkt an Hauptverkehrsachse, ca. 3 m vom Strassenrand entfernt in einer Strassenschlucht
Beromünster	BRM	Ländlich, unterhalb 1000 m ü.M. an der Basis des stillgelegten Sendemastes des ehemaligen Landessenders
Chaumont	CHA	Ländlich, oberhalb 1000 m ü.M. Umgebung wird durch Wiesen und Weideland dominiert
Davos-Seehornwald	DAV	Ländlich, oberhalb 1000 m ü.M. Südöstlich des Davosersees in einem Wald gelegen
Dübendorf-Empa	DUE	Vorstädtisch; ca. 200 m von Hauptverkehrsstrassen entfernt
Härkingen-A1	HAE	Ländlich, Autobahn; ca. 20 m nördlich der Autobahn A1
Jungfrauoch	JUN	Hochgebirge; liegt in einem Sattel zwischen Alpengipfeln von Jungfrau und Mönch
Lausanne-César-Roux	LAU	Städtisch, verkehrsbelastet; direkt an einer innerstädtischen, leicht ansteigenden Transitstrasse
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
Sion- Aéroport-A9	SION	Ländlich, Autobahn; ca. 50 m nördlich der Autobahn A9 auf dem Gelände des Militärflugplatzes Sion
Tänikon	TAE	Ländlich, unterhalb 1000 m ü.M. auf dem Gelände der Agroscope Reckenholz-Tänikon (ART)
Zürich-Kaserne	ZUE	Städtisch; Hofsituation, nicht unmittelbar verkehrsbelastet

3.2 Messprogramm

Das Programm der Partikelmessungen im NABEL hat sich in den vergangenen 27 Jahren kontinuierlich weiterentwickelt. Die Messgrössen, die Häufigkeit der gravimetrischen Messungen sowie die eingesetzte Messtechnik für kontinuierliche Feinstaubmessungen wurden laufend angepasst, um zuverlässige, dem Stand der Technik entsprechende, Daten zur Feinstaubbelastung in der Schweiz zu erheben. Einen zeitlichen Überblick über das Programm der Partikelmessungen an den einzelnen Stationen geben die Tabellen 2 und 3. Eine aktuelle Beschreibung aller verwendeten Messmethoden findet sich im Technischen Bericht zum NABEL (Empa 2024).

3.2.1 Gravimetrische Messungen

Die gravimetrischen Feinstaubmessungen erfolgten gemäss den Vorgaben der schweizerischen Norm SN EN 12341 "Aussenluft – Gravimetrisches Standardmessverfahren für die Bestimmung der PM10- oder PM2.5-Massenkonzentration des Schwebstaubes" (SN EN 2023). Gravimetrische PM10-Messungen wurden an allen Stationen während der gesamten Messperiode seit dem 1. Januar 1998 durchgeführt (Ausnahmen Jungfraujoch und Davos-Seehornwald). Im Zeitraum 2001 bis Juni 2010 wurde die Probenahme an allen Stationen auf jeden 4. Tag reduziert. Zu Beginn der Messreihe, sowie von Juni 2010 bis März 2019 wurden tägliche gravimetrische PM10-Messungen durchgeführt. Seit April 2019 wird an allen Stationen – mit Ausnahme von Jungfraujoch, Payerne und Rigi-Seebodenalp – alle 2 Tage eine Probe gesammelt. An den Standorten Jungfraujoch, Payerne und Rigi-Seebodenalp werden tägliche Probenahmen durchgeführt (siehe Tab. 2).

Der in der Schweiz geltende Immissionsgrenzwert für PM2.5 von $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Jahresmittelwert) entspricht den Empfehlungen der WHO aus dem Jahr 2005. Im September 2021 hat die WHO neue Richtwerte (Air Quality Guidelines, AQGs) veröffentlicht und darin unter anderem den Richtwert für das Jahresmittel von PM2.5 ($5 \mu\text{g}/\text{m}^3$) gesenkt (WHO 2021b). Ab 2011 wurden, neben den bereits vorhandenen PM2.5-Messungen an den Stationen Basel-Binningen, Bern-Bollwerk, Payerne, Rigi-Seebodenalp und Zürich-Kaserne, weitere PM2.5-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. Seit 2018 sind zudem PM2.5-Messungen an den Messstationen Lausanne-César-Roux, Sion-Aéroport-A9 und Tänikon in Betrieb. An den Standorten Magadino-Cadenazzo, Payerne und Zürich-Kaserne fanden in den Jahren 2017 – 2018 verschiedene Wechsel zwischen täglicher gravimetrischer PM2.5-Messung sowie Probenahme nur an jedem 4. Tag statt (siehe Tab. 2), Grund dafür waren diverse Projekte.

Im Zeitraum 2003 – 2013 wurden Messungen der PM₁-Konzentration an einzelnen Messstationen durchgeführt. Aufgrund der hohen Korrelation zwischen PM₁ und PM_{2.5} wurden die Messungen von PM₁ an den Stationen Basel-Binningen, Bern-Bollwerk, Lugano-Università und Rigi-Seebodenalp zum Ende des Jahres 2010 beendet. Die Messungen an den Stationen Härkingen-A1 und Payerne wurden zum Ende des Jahres 2013 eingestellt.

3.2.2 Kontinuierliche Messungen

Im Jahr 1999 wurden an der Station Härkingen-A1 erstmals kontinuierliche Feinstaubmessungen mit automatischen Messgeräten durchgeführt, welche später auf alle anderen Stationen ausgeweitet wurden (Tabelle 3). Dabei kamen unterschiedliche Messmethoden zum Einsatz (Tabelle 3 und Technischer Bericht des NABEL, Empa 2024). Seit dem Jahr 2018 werden ausschliesslich optische Partikelzähler eingesetzt, diese liefern Messwerte sowohl für PM₁₀ als auch für PM_{2.5}.

Die kontinuierlichen Messungen stellen eine Ergänzung zu den gravimetrischen Feinstaubmessungen dar und liefern Messwerte mit einer höheren zeitlichen Auflösung und nahezu in Echtzeit. Für gesetzliche Messungen zur Überprüfung von Immissionsgrenzwerten ist bei kontinuierlichen Messungen zwingend sicherzustellen, dass die Messergebnisse dem gravimetrischen Referenzverfahren nach SN EN12341 (SN EN 2023) gleichwertig sind. Dies wird erreicht, indem die automatischen Feinstaubmessgeräte im NABEL gemäss der Schweizerischen Norm SN EN16450 "Automatische Messeinrichtungen zur Bestimmung der Staubkonzentration (PM₁₀; PM_{2.5})" (SN EN 2017) betrieben werden.

Erste Messungen der Partikelanzahl wurden 2003 am Standort Chaumont durchgeführt, diese wurden Ende 2006 beendet. Für die Stationen Basel-Binningen, Bern-Bollwerk, Härkingen-A1, Lugano-Università, Rigi-Seebodenalp und Zürich-Kaserne liegen seit 2004 unterschiedlich lange Messreihen vor.

Die Messungen der Partikelanzahl wurden mit Kondensationskernzählern des Typs TSI 3775, TSI 3750 und bis 2010 auch mit TSI 3022A 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 aktuell eingesetzten Geräte TSI 3750 arbeiten nur im Einzelzählmodus und haben einen Messbereich bis 100'000 Partikel/cm³. An den Stationen Bern und Härkingen wird die Probeluft mit Hilfe einer speziellen Verdünnungseinheit TSI 3333-10 aufbereitet. Das Verdünnungsverhältnis in Bern und Härkingen beträgt 1:10. Eine geeignete Probenaufbereitung ist notwendig, da erhöhte Partikelkonzentrationen und/oder hohe absolute Luftfeuchten den Wartungsaufwand erhöhen bzw. Messausfälle verstärkt auftreten. Ein weiterer wichtiger Vorteil der Verdünnung ist, dass die

Geräte so weitestgehend im Einzelzählmodus betrieben werden können. Am Standort Lugano-Università betrug das Verdünnungsverhältnis bis November 2020 ca. 1:3, seither wird an diesem Standort keine Verdünnung mehr angewendet.

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). Ein wichtiges 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.

3.3 Gleichwertigkeit der kontinuierlichen Feinstaubmessungen

Der Einsatz von automatischen Feinstaubmessgeräten ermöglichte die Häufigkeit der gravimetrischen Feinstaubmessungen im NABEL zu reduzieren. Da sich bei automatischen Geräten das Messprinzip von automatischen Feinstaubmessgeräten stark vom gravimetrischen Referenzverfahren unterscheidet, müssen die mit automatischen Geräten gemessenen Feinstaubkonzentrationen umgerechnet bzw. korrigiert werden, um eine Gleichwertigkeit und Vergleichbarkeit der Messwerte zu gewährleisten. Um dies zu verifizieren, sind parallele Messungen mit beiden Messverfahren erforderlich. Die Mindestanforderung an parallele Messungen zum Nachweis der Gleichwertigkeit sind in der Norm SN EN 16450 (SN EN 2017) beschrieben. Das Partikelmessprogramm des NABEL übertrifft diese Mindestanforderungen (Tabellen 2 und 3).

Basierend auf den parallelen Messungen erfolgt eine Korrektur der automatisch gemessenen Feinstaub-Konzentrationen. Bis 2018 wurde diese Korrektur mit der in Gehrig et al. (2005) beschriebenen Methode durchgeführt, seit 2019 erfolgt die Datenkorrektur mit einer gleitenden Regressionsmethode (Müller und Hüglin, 2015).

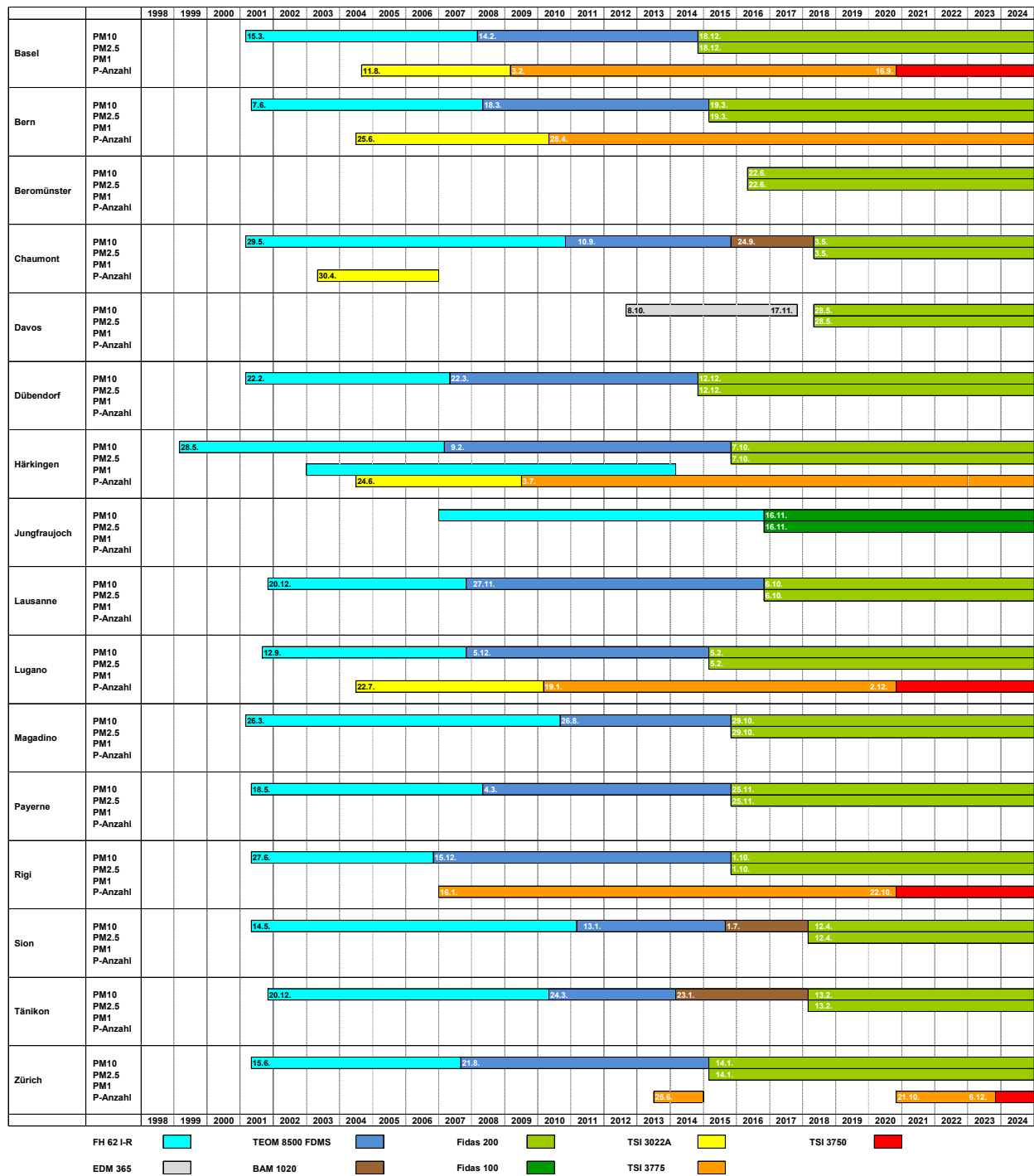
An der ländlichen und erhöht gelegenen NABEL-Station Davos-Seehornwald werden die Feinstaubmessungen 25 m über Grund auf einem Messturm nur mit einem automatischen Messgerät durchgeführt, sodass in Davos-Seehornwald keine gravimetrischen Feinstaubmessungen vorliegen. An den Stationen Beromünster, Chaumont und Jungfrauojoch fehlen gravimetrische Messungen von PM_{2.5}. An diesen Stationen werden die entsprechenden

kontinuierlich gemessenen Feinstaubkonzentrationen nicht korrigiert. Dies bedeutet, dass die Feinstaubwerte PM10 und PM2.5 von Davos-Seehornwald sowie PM2.5 von Beromünster, Chaumont und Jungfrauoch höhere Messunsicherheiten aufweisen und daher als orientierende Messwerte zu betrachten sind. Aufgrund der typischen Datenkorrektur der automatischen Feinstaubmessungen kann davon ausgegangen werden, dass die orientierenden Werte systematisch leicht zu hoch sind, die Messunsicherheit dieser orientierenden Werte kann mit etwa 25 % angegeben werden.

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



Tab. 3: Zeitlicher Überblick über das Programm der kontinuierlichen Partikelmessungen



4 Resultate der gravimetrischen Feinstaub- und der Partikelanzahlmessungen

Die Jahresmittelwerte 2024 der PM₁₀- und PM_{2.5}-Konzentrationen sowie der Partikelanzahlkonzentrationen sind in Tabelle 4 zusammengefasst. Einen grafischen Überblick über die Jahresmittel der Massenkonzentrationen und der Partikelanzahlkonzentrationen für das Jahr 2024 gibt Abbildung 1. Im Jahr 2024 sind die PM₁₀-Jahresmittelwerte aller Stationen deutlich unter dem Grenzwert von 20 µg/m³ (Abb. 2). Die höchsten Jahresmittelwerte aller Messstationen weisen die beiden stark verkehrsbelasteten Standorte Bern-Bollwerk (Strassenschlucht) und Sion-Aéroport-A9 (Autobahn) mit 14.6 und 14.4 µg/m³ auf. Die übrigen Messwerte der NABEL-Stationen liegen im Bereich von 3.0 (Jungfrauoch) bis 13.8 µg/m³ (Magadino-Cadenazzo).

An sämtlichen Messstationen wurden, wie bereits im Vorjahr, PM_{2.5}-Jahresmittelwerte registriert, die unterhalb des PM_{2.5}-Jahresgrenzwertes von 10 µg/m³ liegen. Die höchsten gemessenen PM_{2.5}-Jahresmittelwerte wurden im Jahr 2024 an den zwei Standorten auf der Alpensüdseite verzeichnet: an der städtischen Station Lugano-Università (9.3 µg/m³) und am ländlichen Standort Magadino-Cadenazzo (9.0 µg/m³). Die Messwerte der Stationen Rigi-Seebodenalp (4.2 µg/m³) und Tänikon (5.8 µg/m³) zeigen die tiefsten Werte, während die übrigen NABEL-Stationen PM_{2.5}-Jahresmittelwerte im Bereich von 6.5 bis 8.9 µg/m³ aufweisen. Bei den dargestellten PM_{2.5}-Jahresmittelwerten der Stationen Beromünster (6.3 µg/m³), Chaumont (4.1 µg/m³), Davos-Seehornwald (2.7 µg/m³) und Jungfrauoch (1.5 µg/m³) handelt es sich um orientierende Werte, die mittels optischer Feinstaubmessung bestimmt wurden. Eine Korrektur der kontinuierlich registrierten Messwerte mittels Vergleich zum gravimetrischen Referenzverfahren konnte nicht vorgenommen werden, da an den betreffenden Stationen keine gravimetrischen PM_{2.5}-Messungen vorhanden sind.

Im Vergleich zu den Massenkonzentrationen (PM₁₀ und PM_{2.5}) 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 8.5 gegenüber lediglich rund 1.9 für PM₁₀ und PM_{2.5}. Die entsprechenden Werte für die analogen Verhältnisse von Bern-Bollwerk und Rigi-Seebodenalp betragen 4.5 (mittlere Partikelanzahlkonzentrationen), 2.3 (PM₁₀) und 2.1 (PM_{2.5}). Diese vorliegenden Befunde illustrieren die räumlich grössere Variabilität der massenmässig nicht relevanten ultrafeinen Partikel (Partikeldurchmesser < 100 nm) in unmittelbarer Quellennähe (insbesondere Verkehr).

Tab. 4: Jahresmittelwerte 2024 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	11.3 →	7.4 →	6914 →	15591 →
Bern-Bollwerk	14.6 ↘	8.9 →	11486 →	25577 →
Beromünster	7.9 ↘	6.3* ↘		
Chaumont	5.7 ↘	4.1* ↘		
Davos-Seehornwald	5.1 →	2.7* ↘		
Dübendorf-Empa	11.1 →	7.2 →		
Härkingen-A1	11.8 →	7.9 →	21646 →	58889 →
Jungfrauoch	3.0 →	1.5* ↘		
Lausanne-César-Roux	12.3 →	7.9 →		
Lugano-Università	13.6 →	9.3 →	7980 ↘	17060 ↘
Magadino-Cadenazzo	13.8 →	9.0 →		
Payerne	9.8 →	6.5 →		
Rigi-Seebodenalp	6.3 ↘	4.2 →	2536 ↘	6448 ↗
Sion-Aéroport-A9	14.4 ↘	6.8 ↘		
Tänikon	9.4 ↘	5.8 ↘		
Zürich-Kaserne	11.8 →	8.0 →	7837 ↘	17512 →
Immissionsgrenzwert	20	10		

Die Pfeile geben die Veränderung gegenüber 2023 an.

*Bei den PM2.5 Jahresmittelwerten der Stationen Beromünster, Chaumont, Davos-Seehornwald und Jungfrauoch handelt es sich um orientierende Werte, welche mittels optischer Feinstaubmessung bestimmt wurden. Die kontinuierlich registrierten Messwerte wurden nicht mittels Vergleich zum gravimetrischen Referenzverfahren korrigiert, da an den betreffenden Stationen keine gravimetrischen PM2.5 Messungen vorhanden sind.

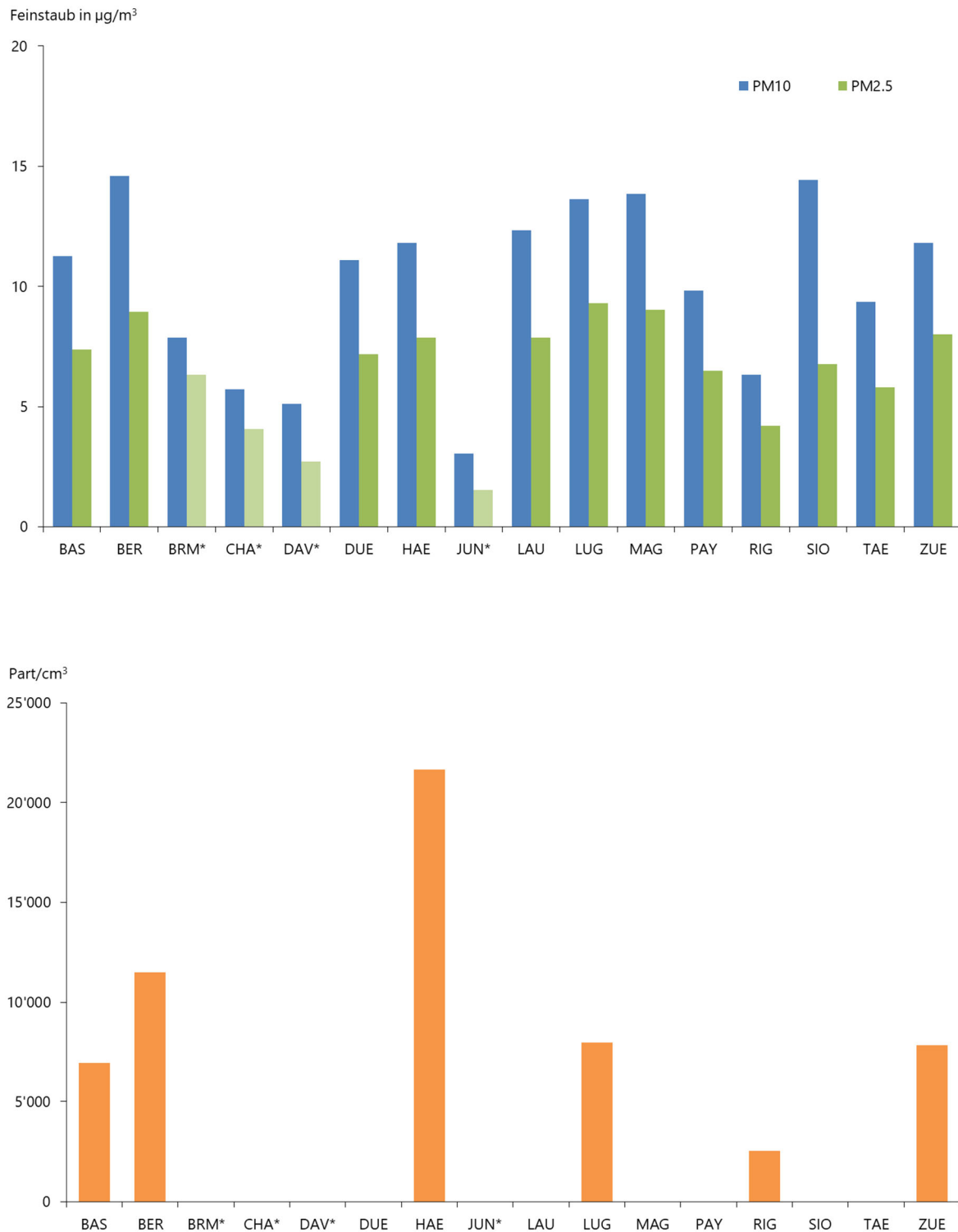


Abb. 1: Übersicht über die Jahresmittelwerte 2024 von PM10 und PM2.5 (oben;) und die Jahresmittelwerte 2024 der Partikelanzahlkonzentrationen (unten).

*Bei den PM2.5 Jahresmittelwerten der Stationen Beromünster, Chaumont, Davos-Seehornwald und Jungfraujoch handelt es sich um orientierende Werte, welche mittels optischer Feinstaubmessung bestimmt wurden. Die kontinuierlich registrierten Messwerte wurden nicht mittels Vergleich zum gravimetrischen Referenzverfahren korrigiert, da an den betreffenden Stationen keine gravimetrischen PM2.5 Messungen vorhanden sind.

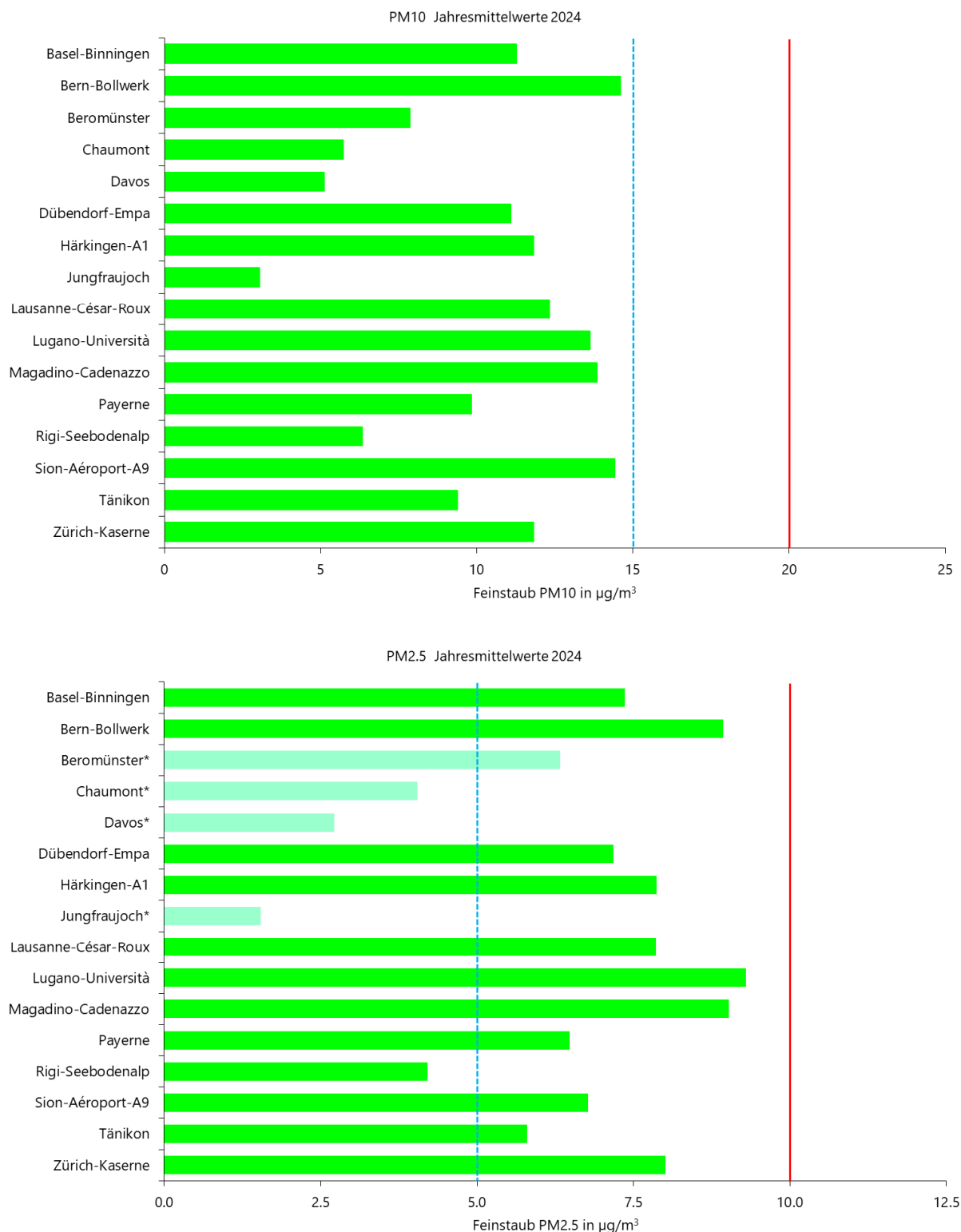


Abb. 2: Vergleich der Jahresmittelwerte 2024 von PM10 (oben) und PM2.5 (unten) mit den Immissionsgrenzwerten (rote Linie, PM10 Grenzwert: 20 µg/m³; PM2.5 Grenzwert: 10 µg/m³) und den WHO AQG 2021 (blau gestrichelte Linie, PM10: 15 µg/m³; PM2.5: 5 µg/m³)

*Bei den PM2.5 Jahresmittelwerten der Stationen Beromünster, Chaumont, Davos-Seehornwald und Jungfrauoch handelt es sich um orientierende Werte, welche mittels optischer Feinstaubmessung bestimmt wurden.

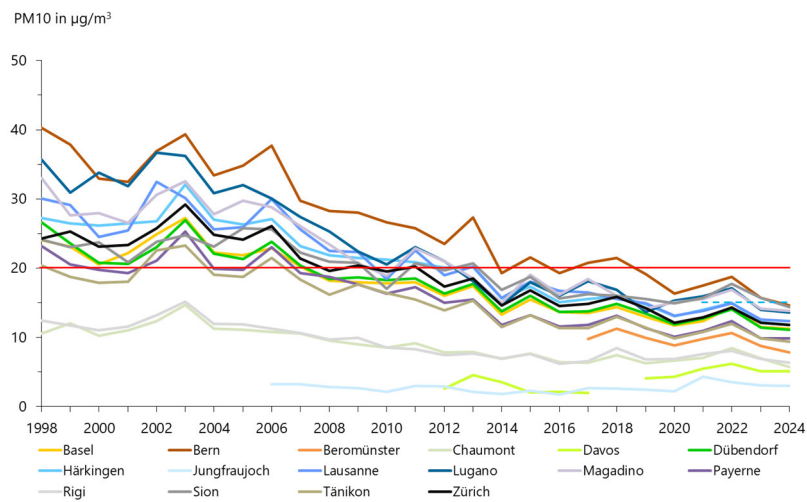
In Abbildung 3 ist als Vergleich der langjährige Verlauf der Jahresmittelwerte von PM₁₀, PM_{2.5} und PM₁ dargestellt, wobei die PM₁-Messungen an sämtlichen Stationen zum Ende des Jahres 2013 eingestellt wurden. An sämtlichen Standorten ist über den gesamten Beobachtungszeitraum ein deutlicher Rückgang der Feinstaubbelastung zu verzeichnen. In den Jahren 2003 und 2006 führten häufige Inversionslagen auf der Alpennordseite zu erhöhten PM-Belastungen.

Im Vergleich zu den hohen Werten im Jahr 2003 zeigen die aktuellen Jahresmittelwerte der Stationen eine Abnahme zwischen 42 % (Sion-Aéroport-A9) und 63 % (Bern-Bollwerk, Härkingen-A1). An der Station Bern-Bollwerk wurden in den Jahren 2014 - 2019 Messwerte jeweils knapp über oder unter dem Grenzwert registriert. Im Jahr 2024 wurden die tiefsten PM₁₀ Messwerte seit Beginn der Messreihe registriert. Der PM₁₀-Jahresmittelwert betrug an der Station Bern-Bollwerk 14.6 µg/m³. 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. In der Zeit 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 einer Zunahme des Verkehrs auf beinahe die ursprüngliche Verkehrsaktivität, die PM-Konzentrationen nicht erneut zunahmen, sondern bis 2012 weiter gesunken sind. Im Jahr 2013 führten umfangreiche Bauarbeiten in unmittelbarer Nähe der Messstation zu einem Anstieg der Massenkonzentrationen. An der Station Bern-Bollwerk wurden 2007 und 2008 zudem vergleichsweise tiefe Partikelanzahlkonzentrationen beobachtet (siehe Abb. 12). Die Konzentrationen nahmen auch an dieser Stelle nach Abschluss der Bauarbeiten nicht mehr signifikant zu, sondern stagnierten bis zum Jahr 2011. Seit 2011 nahmen die Partikelanzahlkonzentrationen kontinuierlich ab und liegen aktuell am Standort Bern-Bollwerk bei 11'486 Part/cm³. Gegenüber den Jahresmittelwerten am Anfang der Messreihen (2005, 2006) entspricht dies einer Reduktion der Konzentration um 67 %.

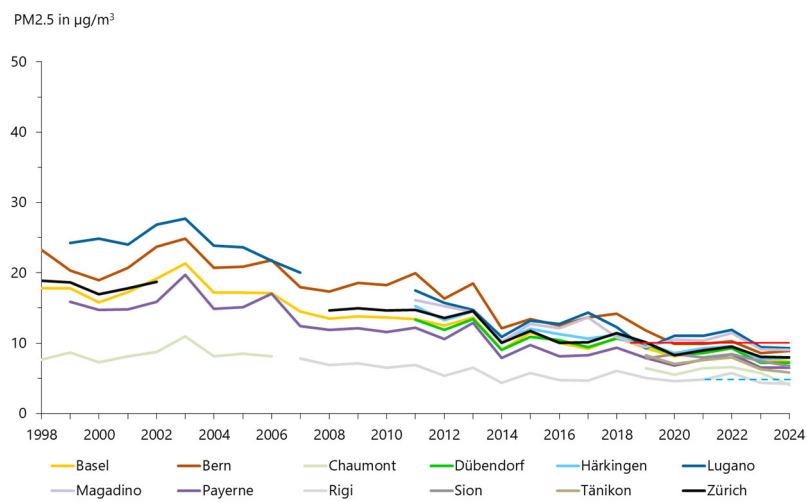
Auch am Messstandort Härkingen-A1 ist zu beachten, dass umfangreiche Bauarbeiten in unmittelbarer Nähe zur Station einen Einfluss auf die Messungen hatten (Ausbau der Autobahn auf sechs Fahrspuren; Oktober 2011 – März 2015).

Bei den Feinstaubbelastungen 2024 wurden an allen Messstationen ähnlich hohe Belastungen wie in den vergangenen Jahren gemessen.

PM10



PM2.5



PM1

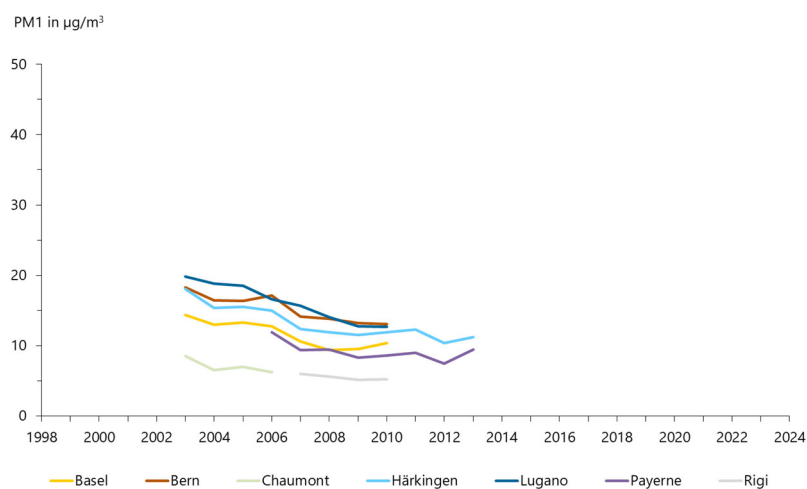


Abb. 3: Langjährige Verläufe der Jahresmittelwerte von PM10, PM2.5 und PM1 (rote Linie: IGW und blau gestrichelte Linie: WHO AQG 2021)

Die Veränderung der PM₁₀-Konzentrationen an allen Messstationen während der gesamten Messperiode 1998 – 2024 ist in Abbildung 4 dargestellt. Die Abnahme der PM₁₀ – Konzentration zwischen Beginn der Messreihe (Mittelwert 1998 – 2000) bis zum aktuellen Zeitpunkt (Mittelwert der vergangenen 3 Jahre, 2022 – 2024) liegt im Bereich zwischen 33% (Sion-Aéroport-A9) und 56% (Bern-Bollwerk).

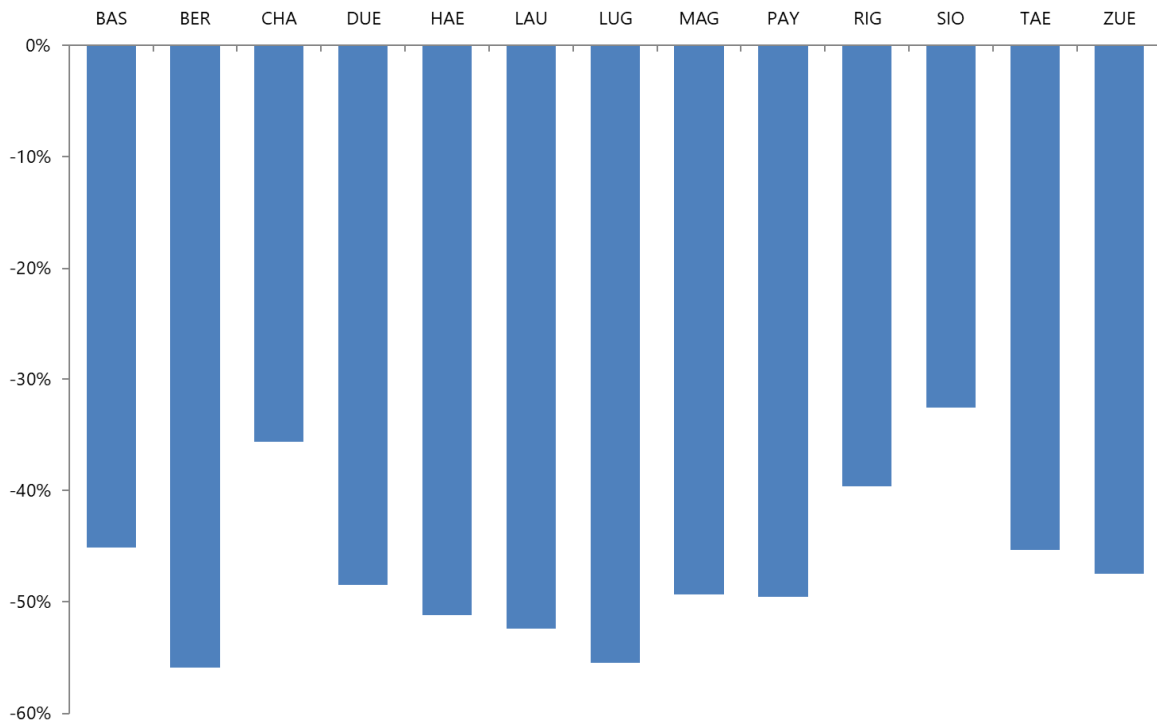


Abb. 4: Veränderung der PM₁₀-Konzentration zwischen Beginn der Messreihe (MW 1998-2000) und aktuellem Zeitpunkt (MW der vergangenen 3 Jahre 2022 – 2024)

Analog zu den Jahresmittelwerten ist auch bei der Anzahl von Überschreitungen des PM₁₀-Tagesgrenzwertes von 50 µg/m³ eine Abnahme im langjährigen Verlauf zu beobachten (Abb. 5). Im Jahr 2006 führten häufige Inversionswetterlagen im Winter auf der Alpennordseite zu zahlreichen Überschreitungen, seither hat die Anzahl der Grenzwertüberschreitungen generell abgenommen. Seit 2014 ist eine starke Abnahme an Überschreitungen zu verzeichnen, nur in den Jahren 2017 und 2021 wurde ein kleiner Anstieg gegenüber dem Vorjahr beobachtet. Im Jahr 2019 wurde mit einer Summe von 7 Überschreitungen der tiefste Wert an Grenzüberschreitungen verzeichnet. Im Jahr 2024 wurde an sämtlichen Standorten eine Gesamtzahl von 14 Überschreitungen verzeichnet, dies stellt eine leichte Zunahme im Vergleich zum Vorjahr (10 Grenzwertüberschreitungen) dar. An keinem Standort wurde die zulässige Anzahl von 3 Überschreitungen pro Jahr überschritten, wobei an den Standorten Jungfrauoch und Davos mit 3 Überschreitungen die maximal zulässigen Überschreitungen erreicht wurden. Alle Grenzwertüberschreitungen an der Messstation Jungfrauoch und zahlreiche Überschreitungen an

anderen NABEL-Stationen sind auf Saharastaubereignisse zurückzuführen. Die Gesamtzahl der Überschreitungen aller Messstationen hat sich seit Messbeginn von 269 (Mittelwert 2004 – 2006) auf 15 (Mittelwert von 2022 – 2024) kontinuierlich reduziert.

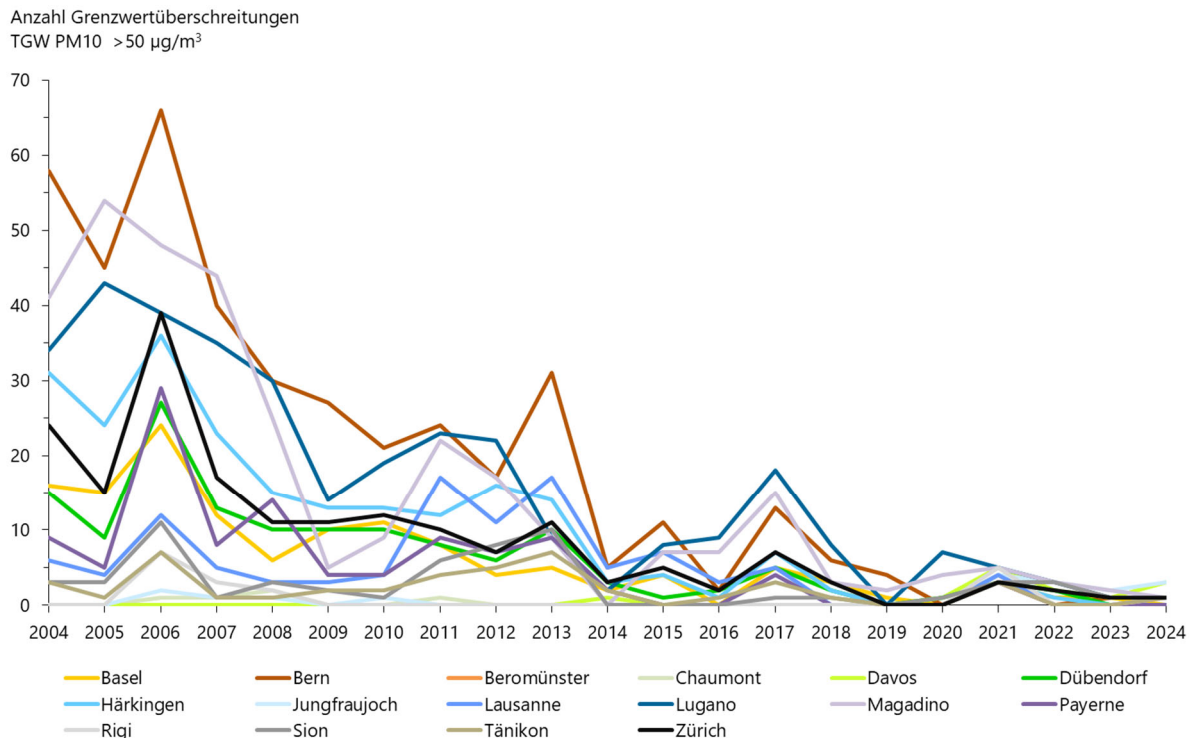


Abb. 5: Langjähriger Verlauf der jährlichen Anzahl Überschreitungen des Tagesgrenzwertes (50 µg/m³)

Die Abbildung 6 bietet eine Übersicht über die langjährigen Verläufe der durchschnittlichen PM2.5/PM10-Verhältnisse der Tageswerte respektive der Jahresmittelwerte. Als Vergleich dazu sind die entsprechenden Resultate der PM1/PM10-Verhältnisse der Tageswerte respektive der Jahresmittelwerte in Abbildung 7 dargestellt. Eine Zusammenfassung der analogen Einzelwerte ist in den Tabellen A1 bis A4 im Anhang zu finden. Die Resultate illustrieren die relativ geringe Bandbreite der Schwankungen dieser Verhältnisse von Station zu Station. Ausnahmen bilden die Strassenschlucht in Bern und der an der Autobahn gelegene Standort Sion-Aéroport-A9 mit einem höheren Anteil im Grössenbereich von 2.5 bis 10 µm und entsprechend tieferen PM2.5/PM10-Verhältnissen. In den Jahren 2009 bis 2013 war in Bern das PM2.5/PM10-Verhältnis aus unbekannten Gründen ungewöhnlich hoch und im Bereich der anderen NABEL-Stationen. In den Jahren 2014 bis 2023 wurde eine stetige Abnahme des Verhältnisses bis 0.54 verzeichnet, im Jahr 2024 wurde ein Anstieg auf 0.61 registriert. Auffallend sind auch die beobachteten Verhältnisse an der Messstation Sion-Aéroport-A9, welche direkt an der Autobahn liegt. Die hohe PM10-Belastung an der Station Sion-Aéroport ist auf die verkehrsbedingte Belastung durch den Standort selbst

und die vorherrschenden Windverhältnisse entlang der Talachse zurückzuführen. Ein weiterer Grund für die auffallenden Werte in Sion könnten auch die speziellen klimatischen Bedingungen am Standort sein. Ein ebenfalls etwas abweichendes Verhalten gegenüber den anderen Stationen wird in Payerne registriert. In den Jahren 2007 und 2008 wurde eine signifikante Abnahme des PM_{2.5}/PM₁₀-Verhältnisses der Tageswerte beobachtet, welches sich von 0.71 bis 0.78 auf 0.6 verringerte. In den Jahren 2009 bis 2013 konnte ein Anstieg des Verhältnisses auf den früheren Wert von 0.75 beobachtet werden. In der Folgezeit war ein kontinuierlicher Rückgang bis zum aktuellen Wert von 0.64 zu verzeichnen. 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. Die Auswertung der Daten in Abbildung 6 zeigt, dass das mittlere Verhältnis während der vergangenen 11 Jahre an allen Standorten, mit Ausnahme von Bern, relativ konstant geblieben ist. Das Verhältnis des Jahresmittels von PM_{2.5} zum Jahresmittel von PM₁₀ liegt im Jahr 2024 für die meisten Standorte im Bereich von 0.61 – 0.68, einzig am Verkehrsstandorten Sion-Aéroport-A9 wird ein tieferes Verhältnis von 0.47 registriert.

Die Analyse der langjährigen durchschnittlichen Jahresverläufe der Monatsmittelwerte der PM_{2.5}/PM₁₀-Verhältnisse (2003 – 2024) zeigt, dass an allen Stationen im Winter höhere Werte beobachtet werden, wenn auch in unterschiedlicher Ausprägung (siehe Abb. 8). Ähnlich, aber deutlich weniger ausgeprägt sind die Jahresgänge der durchschnittlichen PM₁/PM₁₀-Verhältnisse (siehe Abb. 9) in der Zeitperiode 2003 – 2013 (Messungen wurden 2013 beendet).

Der Vergleich des mittleren Jahresverlaufs der Monatswerte zu Beginn der Messreihe (Mittelwerte 2003 – 2009) und in den vergangenen Jahren (Mittelwerte 2018 – 2024) zeigen die Abbildung 10 (PM₁₀) und die Abbildung 11 (PM_{2.5}). Der Vergleich des mittleren Jahresverlaufs zwischen dem Beginn der Messreihe (obere Grafik) und den vergangenen Jahren zeigt deutlich den Rückgang der Konzentrationen um ca. 50 %. Für die nicht erhöht gelegenen Stationen zeigt sich der erwartete typische Verlauf mit höheren Konzentrationen in der kalten Jahreszeit. Dieser ist auf die im Winter im Durchschnitt stabilere Schichtung der bodennahen Luftmassen mit entsprechend schlechterer Verdünnung der emittierten Schadstoffe zurückzuführen. Die erhöhten Stationen Chaumont, Davos, Jungfrauoch und Rigi-Seebodenalp, welche im Winter häufig über der Inversionsgrenze liegen, weisen dagegen im Winter tiefere Werte auf als im Sommer.

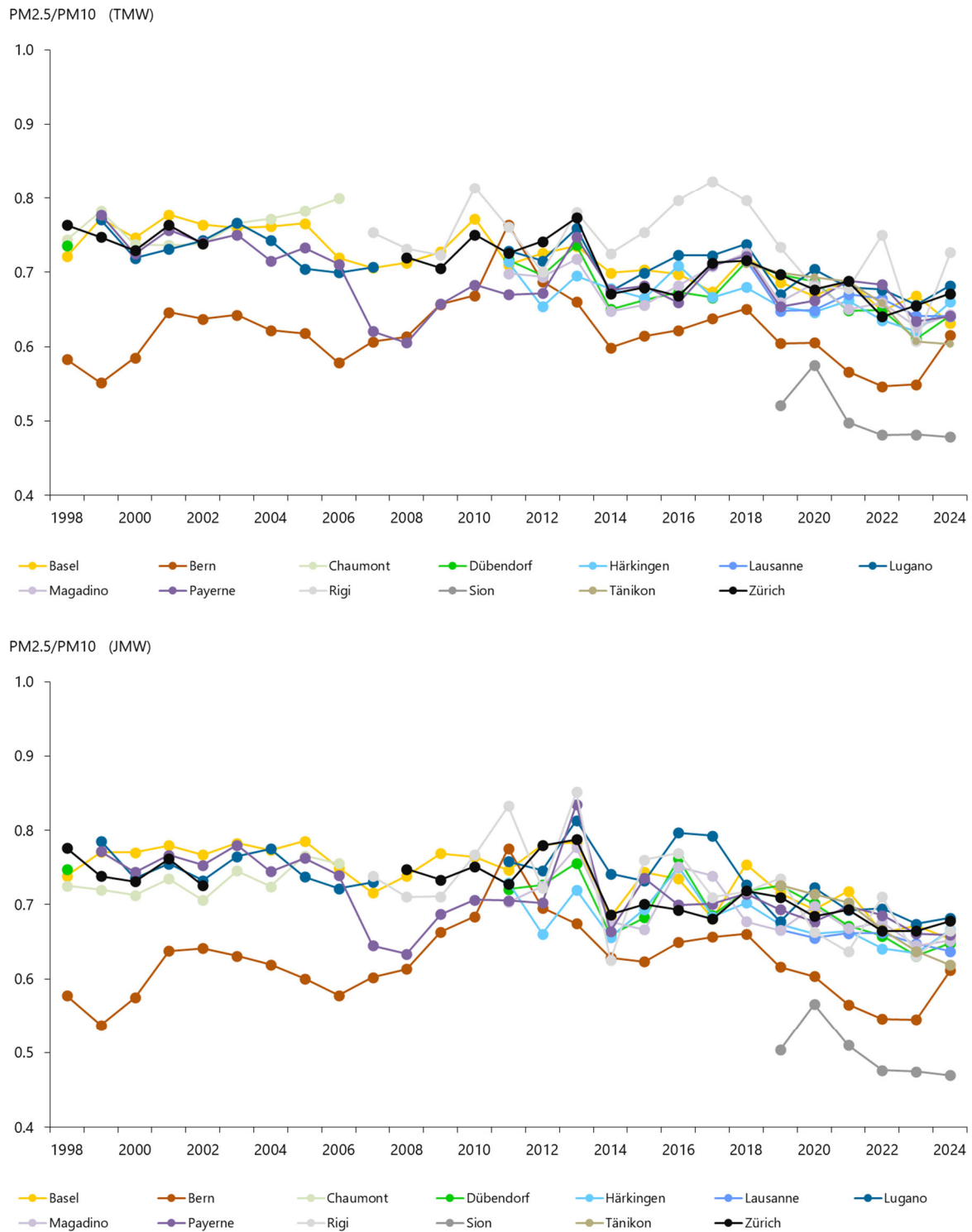


Abb. 6: Langjähriger Verlauf der mittleren PM_{2.5}/PM₁₀-Verhältnisse der Tageswerte (oben) und der PM_{2.5}/PM₁₀-Verhältnisse der Jahresmittelwerte (unten)

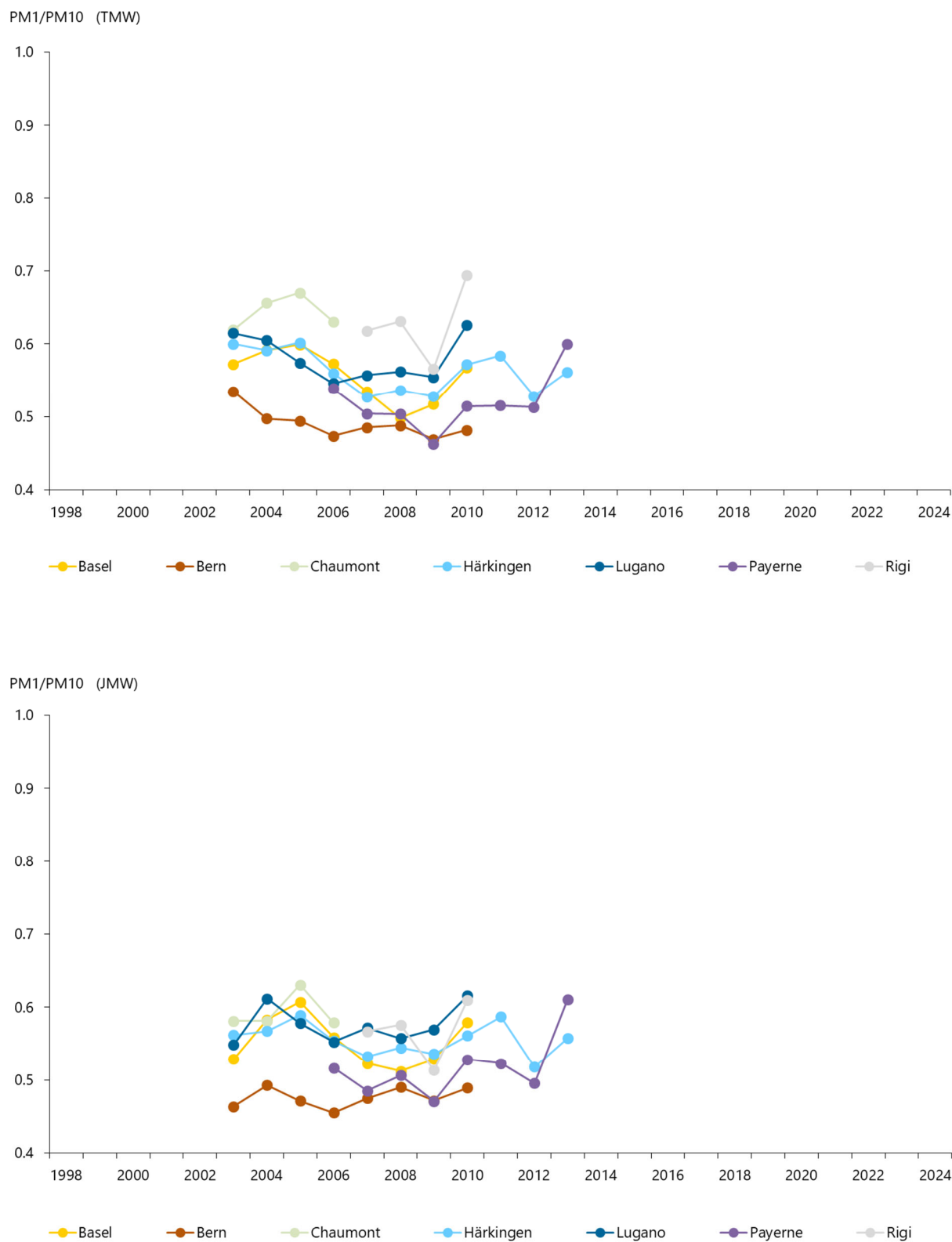


Abb. 7: Langjähriger Verlauf der mittleren PM1/PM10-Verhältnisse der Tageswerte (oben) und der PM1/PM10-Verhältnisse der Jahresmittelwerte (unten)

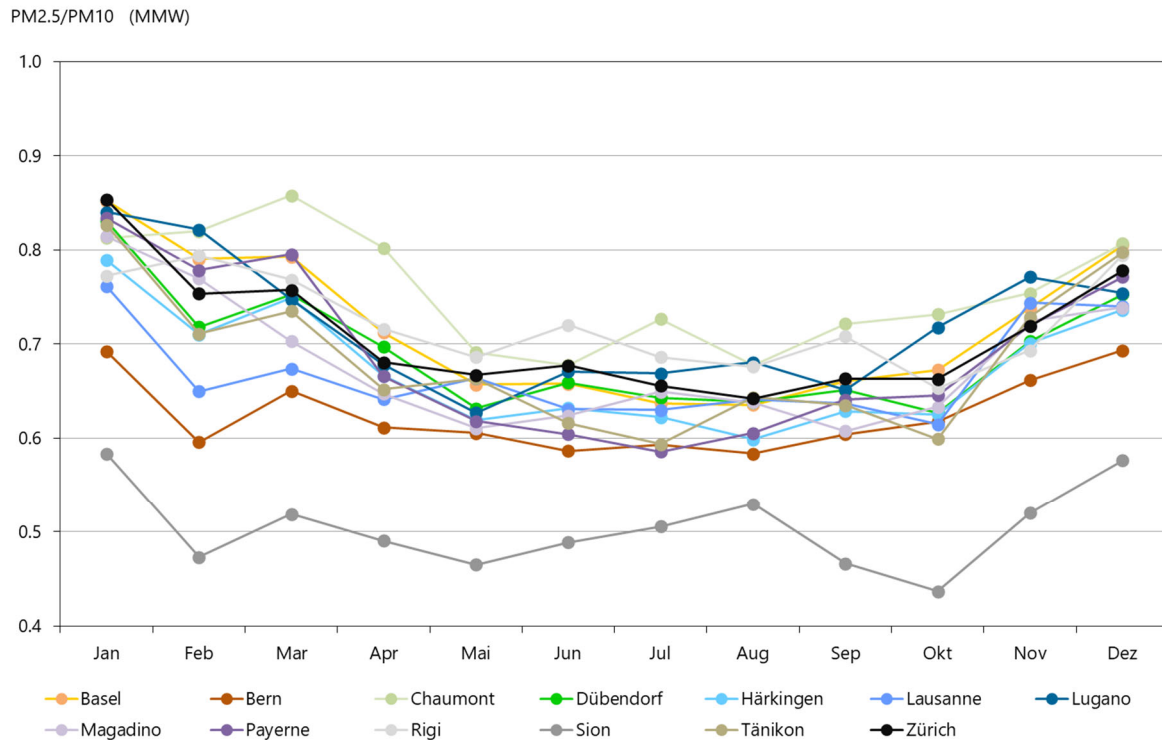


Abb. 8: Durchschnittlicher Jahresverlauf der Monatsmittelwerte der PM_{2.5}/PM₁₀-Verhältnisse in der Zeitperiode 2003- 2024

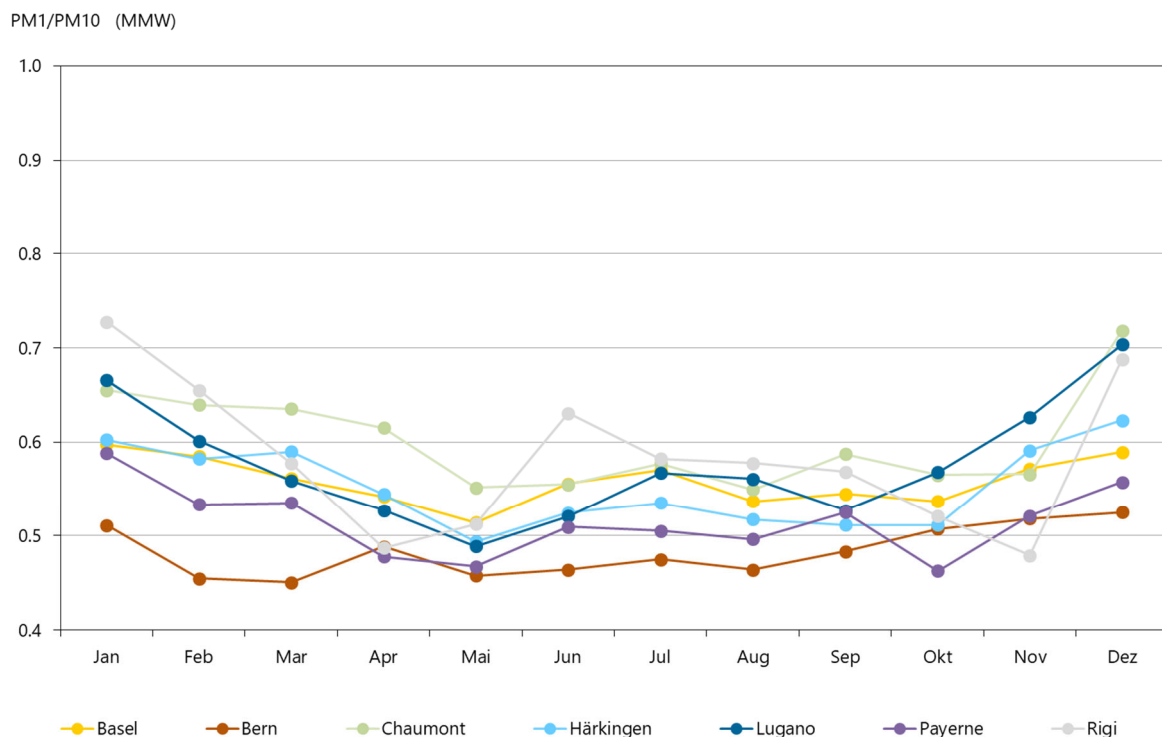


Abb. 9: Durchschnittlicher Jahresverlauf der Monatsmittelwerte der PM₁/PM₁₀-Verhältnisse in der Zeitperiode 2003- 2013

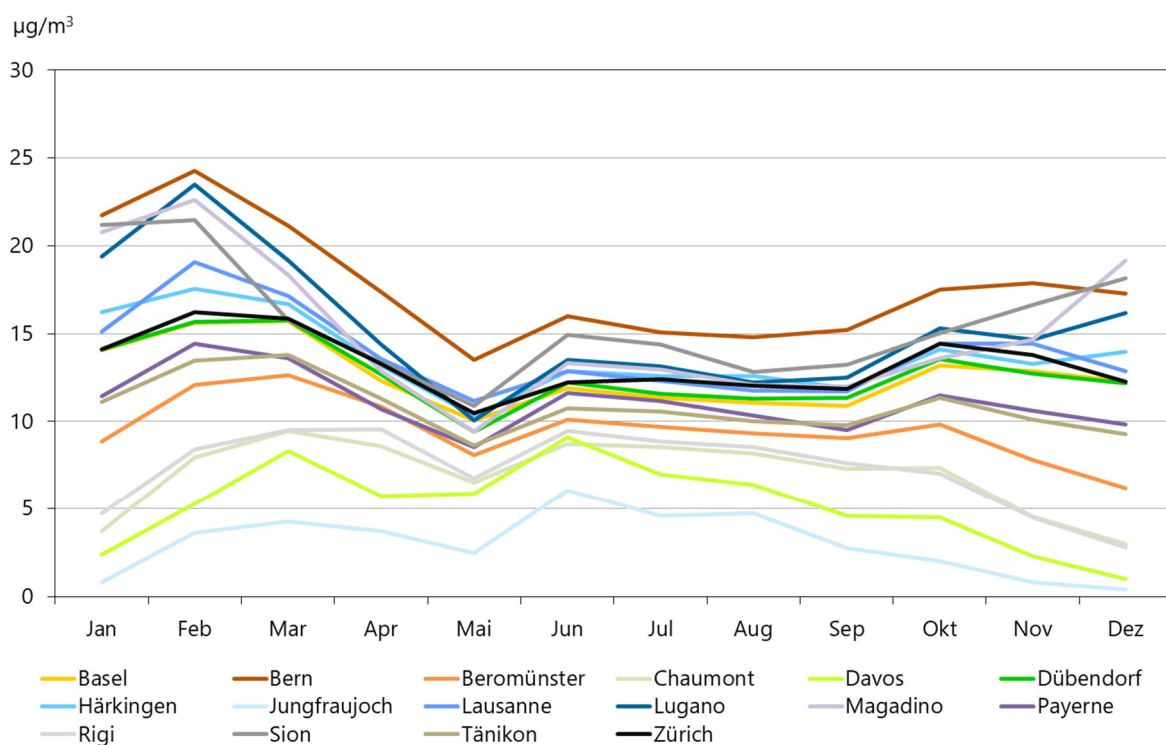
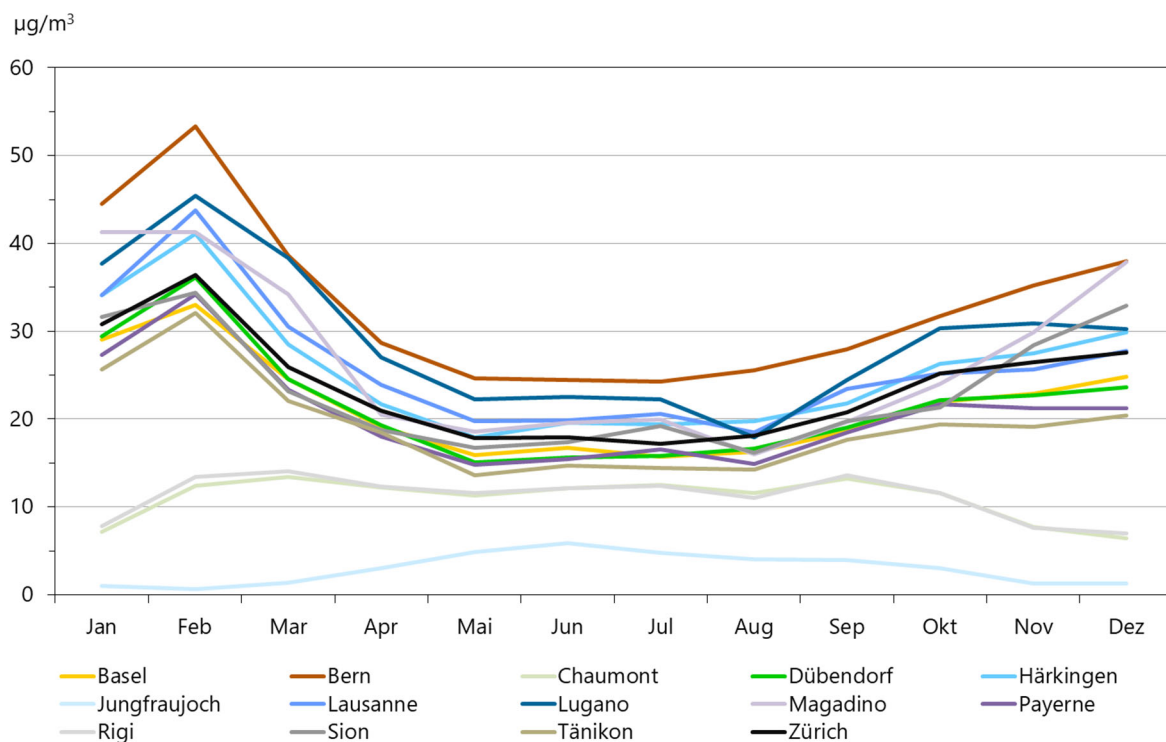


Abb. 10: Vergleich des mittleren Jahresverlaufs der Monatsmittelwerte der PM₁₀-Konzentration zwischen Beginn der Messreihe (MW 2003-2009; oben) und aktuellem Zeitpunkt (MW der Jahre 2018 – 2024; unten). Man beachte die unterschiedliche Skalierung der beiden Grafiken.

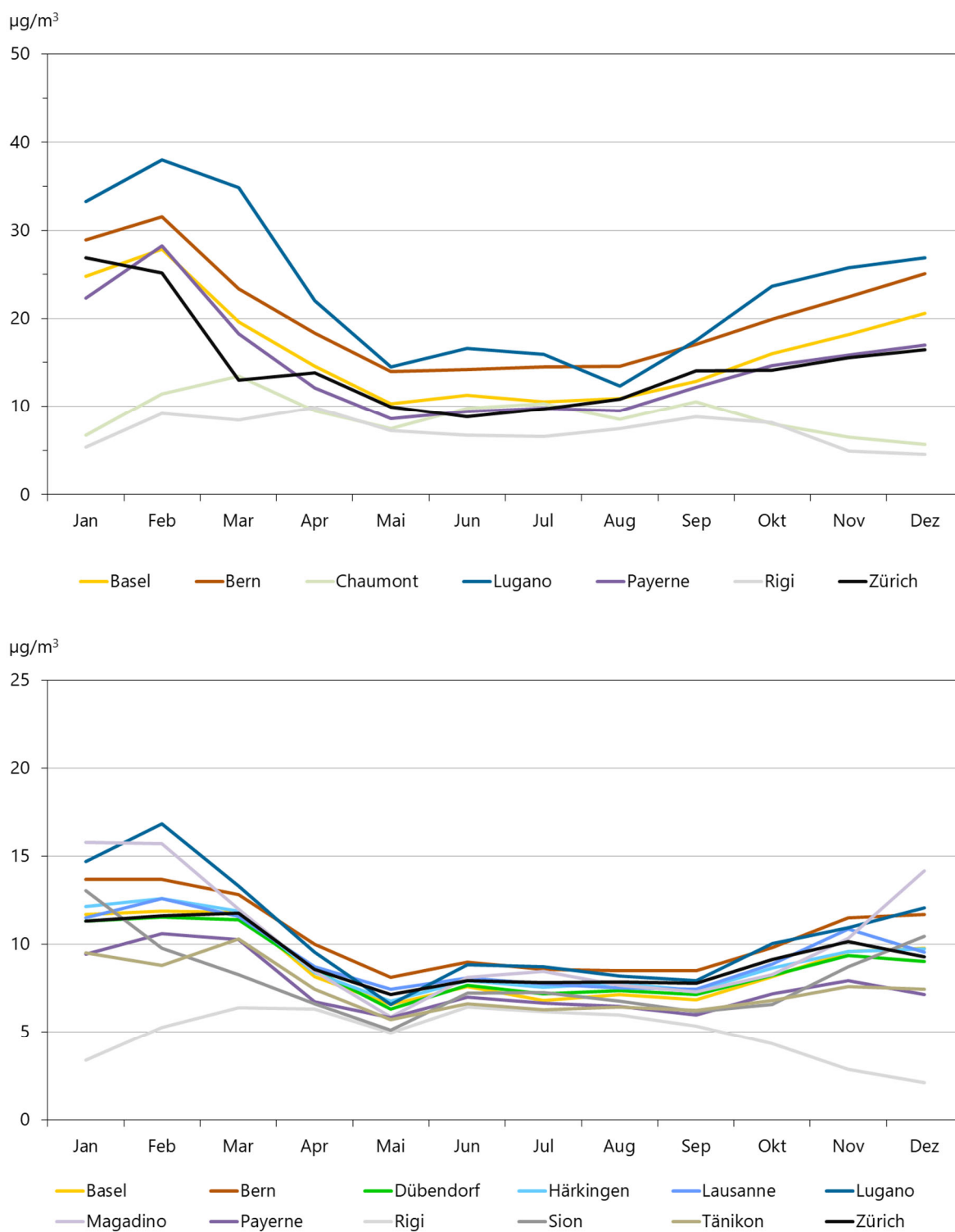


Abb. 11: Vergleich des mittleren Jahresverlaufs der Monatsmittelwerte der PM_{2.5}-Konzentration zwischen Beginn der Messreihe (MW 2003-2009; oben) und aktuellem Zeitpunkt (MW der Jahre 2018 – 2024; unten). Man beachte die unterschiedliche Skalierung der beiden Grafiken.

Der Verlauf der Jahresmittelwerte der Partikelanzahlkonzentrationen seit Beginn der Messreihen ist in Abbildung 12 dargestellt. Die Verläufe sind an den einzelnen Stationen etwas uneinheitlich, weisen jedoch generell eine markante Abnahme auf. Die Analyse der Daten für das Jahr 2024 zeigt kein einheitliches Bild. Während an den Standorten Basel, Bern, Lugano und Rigi die tiefsten je gemessenen Werte registriert wurden, wurden an den beiden Stationen Zürich und Härkingen die tiefsten Messerwerte in den Jahren 2021 bzw. 2022 registriert.

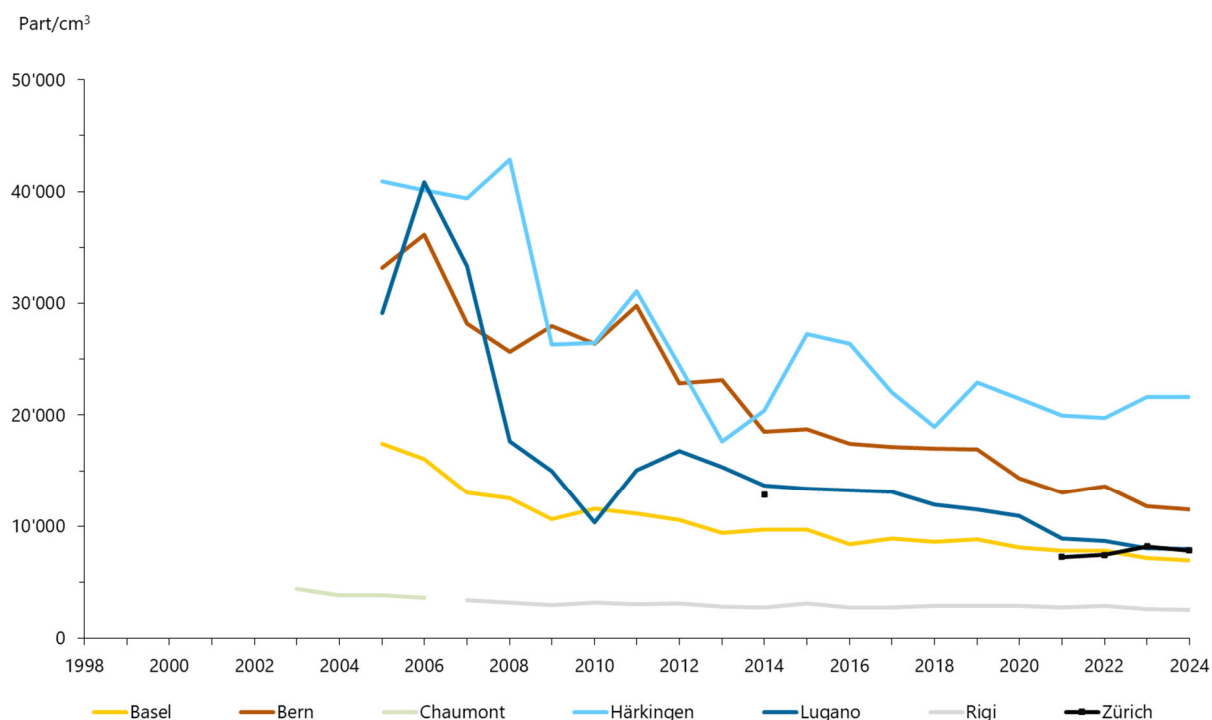


Abb. 12: Verlauf der Jahresmittelwerte der Partikelanzahl seit Beginn der Messreihen. An den quellennahen Standorten Bern, Lugano und Härkingen sind grosse Veränderungen der Partikelanzahlkonzentrationen innerhalb von wenigen Jahren zu beobachten. Vermutlich ist dies auf Änderungen der Aktivitäten von Emissionsquellen in unmittelbarer Nähe der Messstationen zurückzuführen.

Wie bereits im Kapitel 3.2.2 (Kontinuierliche Messungen) 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, Härkingen-A1 und Lugano-Università 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.

Die Erhebung von konsistenten langjährigen Messreihen der Partikelanzahlkonzentration ist schwierig, da aufgrund fehlender Kalibriermittel keine Möglichkeit besteht, die Partikelzähler während dem Einsatz auf den Stationen regelmässig zu kalibrieren. Es besteht demnach die Möglichkeit, dass allfällige messtechnische Probleme (beispielsweise Partikelverluste in der Ansaugleitung) über einen längeren Zeitraum hinweg unerkannt bleiben können. Diese Situation unterstreicht die Wichtigkeit der methodischen Standardisierung der Partikelanzahlmessung, wie sie seit 2024 in Form einer europäischen und schweizerischen Norm vorliegt (SN EN 2024).

Im Gegensatz zu allen anderen Messstationen, an denen eine langsame Abnahme der Jahresmittelwerte der Partikelanzahl in den letzten 10 Jahren registriert wurde, zeigt Härkingen-A1 im Jahr 2015 einen starken Anstieg, gefolgt von einem Rückgang. Der Jahresmittelwert weist seit 2017 eine geringe Variabilität auf und bewegt sich im Bereich von 21'000. Im Jahr 2024 wurde ein Jahresmittelwert von 21'641 erfasst. Die tiefsten Werte wurden am Standort Härkingen in den Jahren 2013 (17'630) und 2018 (18'909) registriert. 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).

Der Verlauf der Monatsmittelwerte der Partikelanzahlkonzentrationen im Jahr 2024 ist in Abbildung 13 dargestellt. Die Resultate der Station Härkingen-A1 zeigen für das Jahr 2024 einen untypischen Jahresgang, der durch den starken Einfluss von lokalen Emissionen an diesem Standort erklärt werden kann. Qualitativ gleichen die durchschnittlichen Jahresverläufe der Monatsmittelwerte der Partikelanzahlkonzentration an den verschiedenen Stationen (Abb. 14) denen der Massenkonzentrationen (Abb. 10). Eine Ausnahme bildet die Messreihe der Station Härkingen-A1, welche einen leicht deformierten Jahresgang aufweist. Dies ist auf die hohen Partikelanzahlkonzentrationen im Sommer/Herbst 2004 zurückzuführen, deren Ursachen nicht abschliessend geklärt werden konnten. Der Jahresgang der Station Basel-Binningen zeigt einen weit weniger ausgeprägten Jahresverlauf als die entsprechenden Jahresverläufe der strassennahen Standorte Bern-Bollwerk, Härkingen-A1 und Lugano-Università. Im mittleren Jahresverlauf der letzten Jahre (2018 - 2024) wurde in Basel kein ausgeprägter Jahresgang mehr beobachtet, während zu Beginn der Messreihe noch ein solcher erkennbar war. Die Resultate der seit Anfang 2007 durchgeführten zusätzlichen Partikelmessungen an der Station Rigi-Seebodenalp zeigen generell sehr ähnliche Charakteristika wie die früher an der Station Chaumont gemessenen Werte.

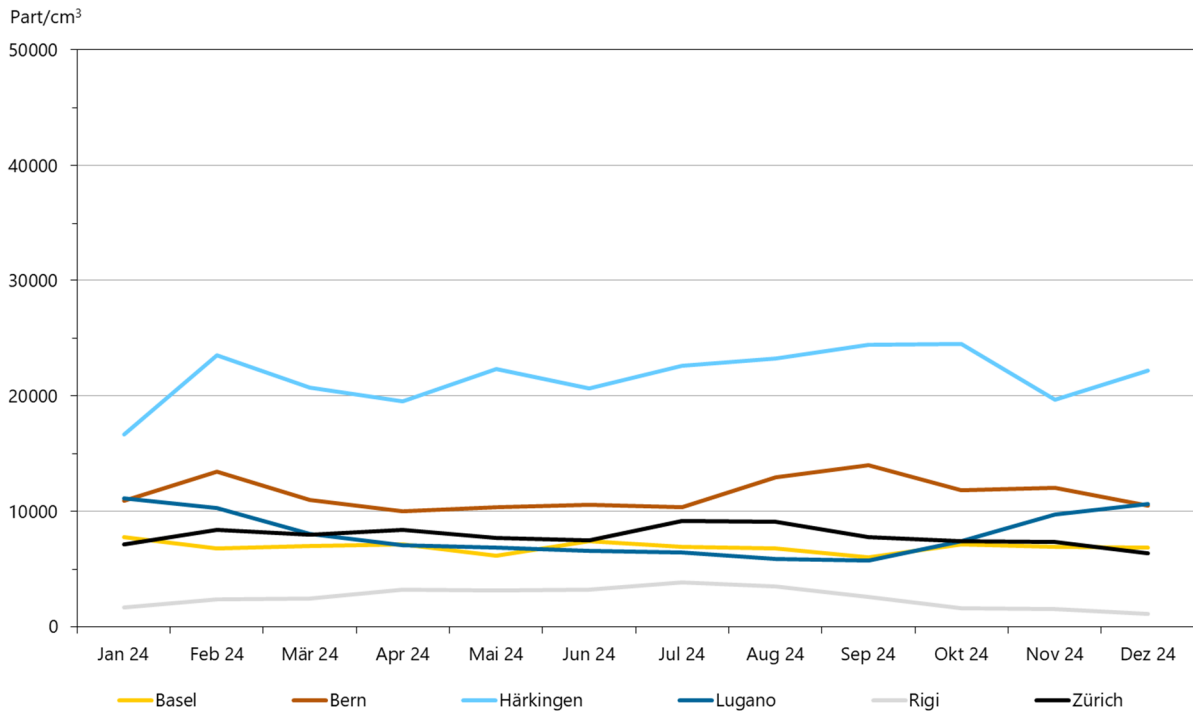


Abb. 13: Jahresverlauf der Monatsmittelwerte der Partikelkonzentration im Jahr 2024.

Resultate der gravimetrischen Feinstaub- und der Partikelanzahlmessungen

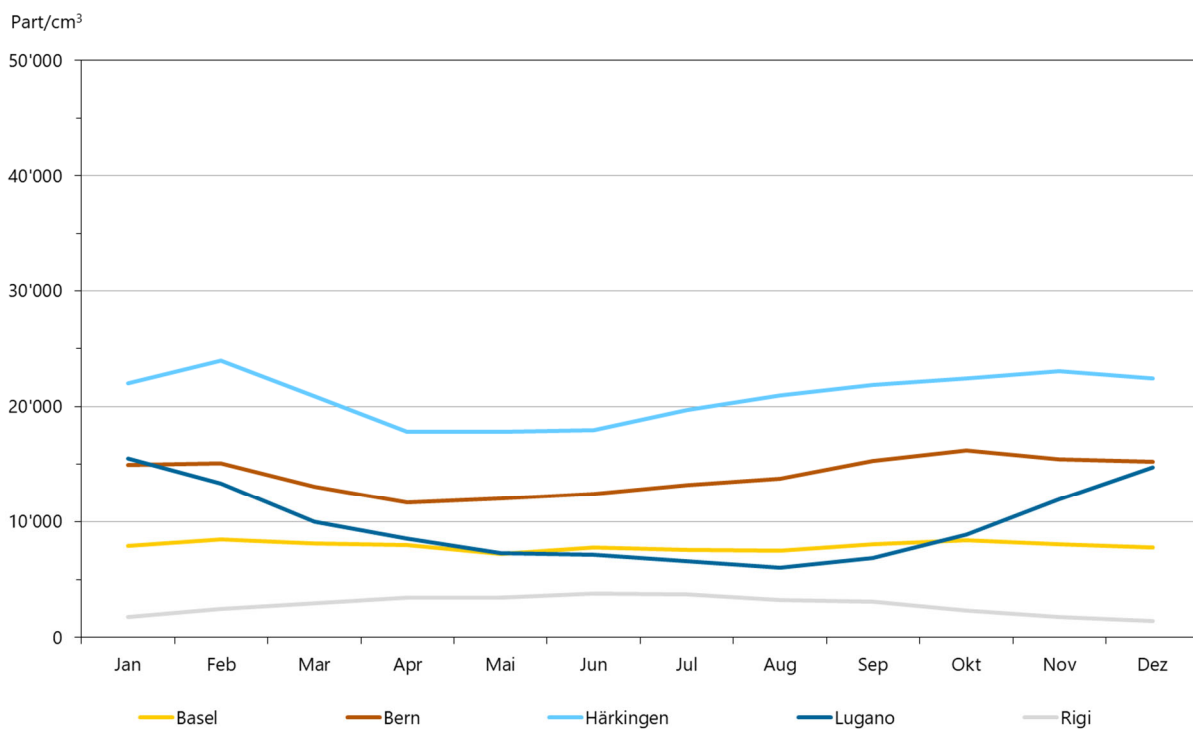
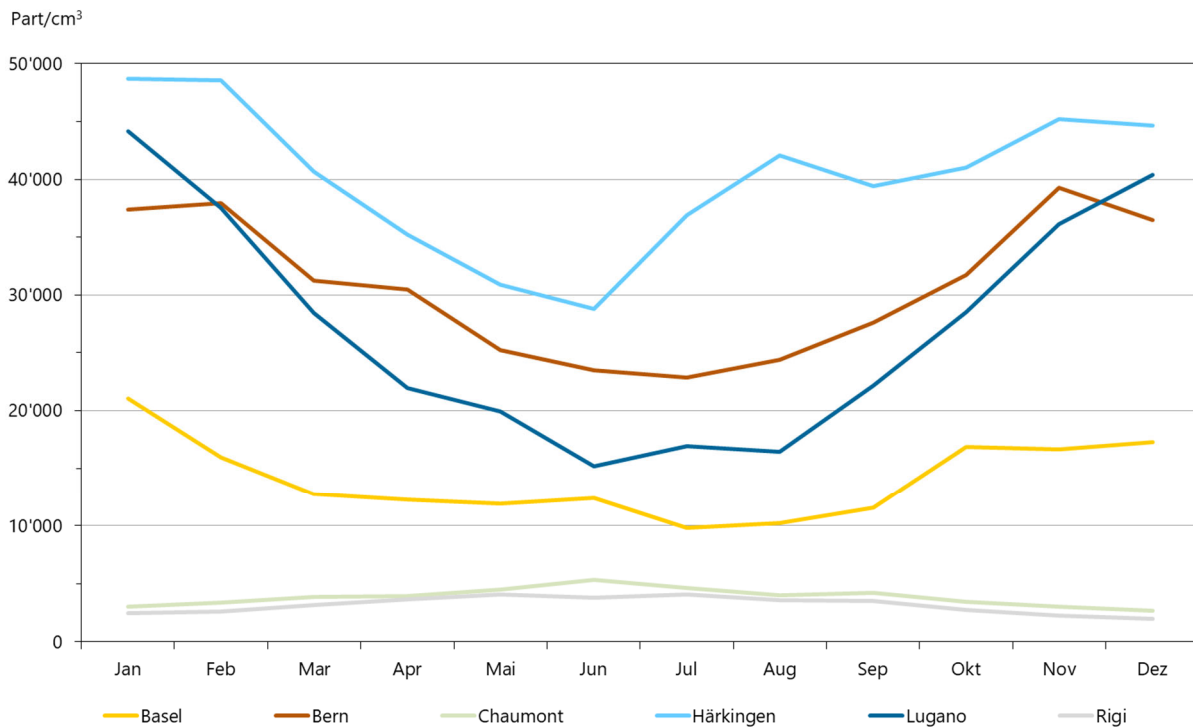


Abb. 14: Vergleich des durchschnittlichen Jahresverlaufs der Monatsmittelwerte der Partikelanzahlkonzentration zwischen Beginn der Messreihe (MW 2003-2009; oben) und aktuellem Zeitpunkt (MW der Jahre 2018 – 2024; unten).

5 Literaturverzeichnis

- Brunekreef B., Strak M., Chen J., Andersen Z.J., Atkinson R., Bauwelinck M., et al. (2021). Mortality and Morbidity Effects of Long-Term Exposure to Low-Level PM_{2.5}, BC, NO₂, and O₃: An Analysis of European Cohorts in the ELAPSE Project. Research Report 208. Boston, MA: Health Effects Institute.
- Chen J. and Hoek G. (2020). A Long-term exposure to PM and all-cause and cause-specific mortality: A systematic review and meta-analysis. *Environment Int.* 143: 105974.
- CFHA (2013). Les poussières fines en Suisse 2013. Commission fédérale de l'hygiène de l'air (CFHA). Berne. 66 p. <https://www.news.admin.ch/news/message/attachments/34122.pdf>.
- EEA (2023). Air Pollution and cardiovascular disease, European Environment Agency <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/beating-cardiovascular-disease-the-role-of-europes-environment/air-pollution>.
- EEA (2025). Air quality status report 2025, European Environment Agency <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/air-quality-status-report-2025>.
- EKL (2023). Die neuen WHO-Luftqualitätsrichtwerte 2021 und ihre Bedeutung für die Schweizer Luftreinhalte-Verordnung. Eidgenössische Kommission für Lufthygiene (EKL). Bern. 120 S., https://www ekl.admin.ch/inhalte/dateien/pdf/Taetigkeitsbericht_2020-2023.pdf.
- EKL (2013). Feinstaub in der Schweiz 2013. Eidgenössische Kommission für Lufthygiene (EKL). Bern. 63 S., https://www ekl.admin.ch/inhalte/ekl-dateien/themen/Feinstaub_in_der_Schweiz_2013.pdf.
- Empa (2024). Technischer Bericht zum Nationalen Beobachtungsnetz für Luftfremdstoffe (NABEL) 2024; Dübendorf, Schweiz; https://www.empa.ch/documents/56101/246436/Technischer_Bericht_2024/0d7b63e5-70a1-4fba-ad3a-599347447a32.
- 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.

- Hoffmann B., Boogaard H., de Nazelle A., Andersen Z., Abramson M., Brauer M., Brunekreef B., Forastiere F., Huang W., Kan H., Kaufman J., Katsouyanni K., Krzyzanowski M., Kuenzli N., Laden F., Nieuwenhuijsen M., Mustapha A., Powell P., Rice M., Roca-Barceló A., Roscoe C., Soares A., Straif K. and Thurston G. (2021). WHO Air Quality Guidelines 2021–Aiming for Healthier Air for all: A Joint Statement by Medical, Public Health, Scientific Societies and Patient Representative Organisations. *Int J Public Health* 66:1604465. doi: 10.3389/ijph.2021.1604465
- Liu C. et al. (2022). Coars Particulate Air Pollution and Daily Mortality; A Global Study in 205 Cities. *Am J Respir Crit Care Med*, 206(8), 999-1007. <https://doi.org/10.1164/rccm.202111-2657OC>.
- Müller M. und Hüglin Ch. (2015). Evaluation von Methoden zur Korrektur von kontinuierlichen Feinstaubmesswerten (PM10) im NABEL. Projektbericht. <https://www.empa.ch/documents/56101/246436/Korrektur+von+kontinuierlich+gemessenem+PM10/2ea8a30e-12a2-4938-8445-eccdb683ddbf>.
- Orellano P., Reynoso J., Quaranta N., Bardach A. and Ciapponi A. (2020). Short-term exposure to particulate matter (PM10 and PM2.5), nitrogen dioxide (NO2), and ozone (O3) and all-cause and cause-specific mortality: Systemic review and meta-analysis. *Environment Int.* 142: 105876.
- Orellano P., Kasdagli M., Velasco R.P. and Samoli E. (2024). Long-term Exposure to Particulate Matter and Mortality: An Update of the WHO Global Air Quality Guidelines Systematic Review and Meta-Analysis. *Int J Public Health*, 69:1607683. doi: 10.3389/ijph.2024.1607683.
- SN EN (2024). Aussenluft – Bestimmung der Partikelanzahlkonzentration des atmosphärischen Aerosols. SN EN 16976:2024.
- SN EN (2023). SN EN 12341:2023: Aussenluft - Gravimetrisches Standardmessverfahren für die Bestimmung der PM10 - oder PM2.5-Massenkonzentration des Schwebstaubes.
- SN EN (2017). SN EN 16450:2017-05: Aussenluft – Automatische Messeinrichtungen zur Bestimmung der Staubkonzentration (PM10; PM2.5).
- Stafoggia et al. (2022). Long-term exposure to low ambient air pollution concentrations and mortality among 28 million people: results from 7 large European cohorts within the ELAPSE project. *Lancet Planet Health*, Vol 6, e9 – 18.
- Swiss TPH (2022). LUDOK – Interaktive Grafik zu den Auswirkungen der Luftverschmutzung auf die Gesundheit [Interaktive Infografik]. <https://www.swisstph.ch/de/projects/ludok/healtheffects/>.

- WHO (2013a). Review of Evidence on Health Aspects of Air Pollution – REVIHAPP Project. Final Technical Report. WHO Regional Office for Europe. Copenhagen. <https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/341712/WHO-EURO-2013-4101-43860-61757-eng.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- 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.; <https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/153692/Health%20risks%20of%20air%20pollution%20in%20Europe%20e2%80%93%20HRAPIE%20project%20c%20Recommendations%20for%20concentration%e2%80%93response%20functions%20for%20cost%e2%80%93benefit%20analysis%20of%20particulate%20matter%2c%20ozone%20and%20nitrogen%20dioxide.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- WHO (2017). Evolution of WHO air quality guidelines: past, present and future. Copenhagen: WHO Regional Office for Europe; 2017. ISBN 978928905306. <https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/341912/9789289052306-eng.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- WHO (2024a). Ambient (outdoor) air pollution. Fact sheet 24. October 2024, World Health Organization [https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health).
- WHO (2024b). Health consequences of air pollution on populations, World Health Organization <https://www.who.int/news/item/25-06-2024-what-are-health-consequences-of-air-pollution-on-populations>.
- WHO (2021a). New WHO Global Air Quality Guidelines aim to save millions of lives from air pollution. 22. September 2021, World Health Organization (<https://www.who.int/news/item/22-09-2021-new-who-global-air-quality-guidelines-aim-to-save-millions-of-lives-from-air-pollution>).
- WHO (2021b). WHO global air quality guidelines: Particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. 22. September 2021, World Health Organization (<https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/345329/9789240034228-eng.pdf?sequence=1&isAllowed=y>).
- WHO (2025a). Air quality legislation and implications for health: technical brief. Geneva: World Health Organization: 2025 (WHO Air Quality, Energy and Health Science and Policy Summaries). <https://doi.org/10.2471/B09436>.

- WHO (2025b). Air pollution: tackling a critical driver of the global NCD crisis. UNHLM4 countdown campaign (WHO's countdown website for the Fourth High-level Meeting of the UN General Assembly on the prevention and control of NCDs and the promotion of mental health and wellbeing (HLM4) in September 2025). Geneva: World Health Organization: 2025. <https://www.who.int/news-room/commentaries/detail/air-pollution--tackling-a-critical-driver-of-the-global-ncd-crisis>.

Anhang

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

	BAS	BER	CHA	DUE	HAE	LAU	LUG	MAG	PAY	RIG	SIO	TAE	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		0.72				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	0.62	0.78				0.70		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	0.81			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			0.67
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	0.72	0.74	0.73	0.72	0.80		0.71	0.72
2019	0.69	0.60		0.70	0.65	0.65	0.67	0.66	0.65	0.73	0.52	0.70	0.70
2020	0.67	0.61		0.69	0.65	0.65	0.70	0.68	0.66	0.68	0.58	0.69	0.68
2021	0.69	0.57		0.65	0.66	0.67	0.68	0.65	0.69	0.68	0.50	0.69	0.69
2022	0.65	0.55		0.65	0.64	0.66	0.68	0.66	0.68	0.75	0.48	0.66	0.64
2023	0.67	0.55		0.61	0.62	0.64	0.66	0.63	0.63	0.61	0.48	0.61	0.66
2024	0.63	0.52		0.64	0.66	0.64	0.68	0.64	0.64	0.73	0.48	0.60	0.67

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

	BAS	BER	CHA	DUE	HAE	LAU	LUG	MAG	PAY	RIG	SIO	TAE	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	0.57	0.71				0.74		0.74				0.73
2001	0.78	0.64	0.73				0.75		0.77				0.76
2002	0.77	0.64	0.71				0.73		0.75				0.73
2003	0.78	0.63	0.75				0.76		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	0.76	0.68							0.71	0.77			0.75
2011	0.75	0.78		0.72	0.73		0.76	0.70	0.71	0.83			0.73
2012	0.78	0.70		0.73	0.66		0.75	0.72	0.70	0.72			0.78
2013	0.78	0.67		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	0.67	0.74	0.76			0.70
2016	0.73	0.65		0.76	0.75		0.80	0.75	0.70	0.77			0.69
2017	0.68	0.66		0.69	0.68		0.79	0.74	0.70	0.71			0.68
2018	0.75	0.66		0.72	0.70		0.73	0.68	0.71	0.72			0.72
2019	0.72	0.62		0.73	0.67	0.67	0.68	0.67	0.69	0.74	0.50	0.73	0.71
2020	0.69	0.60		0.70	0.66	0.66	0.72	0.70	0.68	0.66	0.57	0.71	0.68
2021	0.72	0.57		0.67	0.66	0.66	0.69	0.67	0.70	0.64	0.51	0.70	0.69
2022	0.66	0.55		0.66	0.64	0.66	0.69	0.68	0.69	0.71	0.48	0.67	0.66
2023	0.67	0.54		0.63	0.63	0.65	0.67	0.65	0.66	0.63	0.47	0.64	0.66
2024	0.67	0.54		0.63	0.63	0.65	0.67	0.65	0.66	0.63	0.47	0.64	0.66

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

	BAS	BER	CHA	HAE	LUG	PAY	RIG
2003	0.57*	0.53*	0.62	0.60	0.61*		
2004	0.59	0.50	0.66	0.59	0.61		
2005	0.60	0.49	0.67	0.60	0.57		
2006	0.57	0.47	0.63	0.56	0.55	0.54	
2007	0.53	0.48		0.53	0.56	0.50	0.62
2008	0.50	0.49		0.54	0.56	0.50	0.63
2009	0.52	0.47		0.53	0.55	0.46	0.57
2010	0.57	0.48		0.57	0.63	0.51	0.69
2011				0.58		0.52	
2012				0.53		0.51	
2013				0.56		0.60	
2014	**	**	**	**	**	**	**
2015	**	**	**	**	**	**	**
2016	**	**	**	**	**	**	**
2017	**	**	**	**	**	**	**
2018	**	**	**	**	**	**	**
2019	**	**	**	**	**	**	**
2020	**	**	**	**	**	**	**
2021	**	**	**	**	**	**	**
2022	**	**	**	**	**	**	**
2023	**	**	**	**	**	**	**
2024	**	**	**	**	**	**	**

* unvollständige Messreihen, siehe Tabelle 2

** 2014 PM1-Messungen eingestellt

Tab. A4: PM1/PM10-Verhältnisse der Jahresmittelwerte

	BAS	BER	CHA	HAE	LUG	PAY	RIG
2003	0.53*	0.46*	0.58	0.56	0.55*		
2004	0.58	0.49	0.58	0.57	0.61		
2005	0.61	0.47	0.63	0.59	0.58		
2006	0.56	0.46	0.58	0.55	0.55	0.52	
2007	0.52	0.47		0.53	0.57	0.49	0.57
2008	0.51	0.49		0.54	0.56	0.51	0.58
2009	0.53	0.47		0.54	0.57	0.47	0.51
2010	0.58	0.49		0.56	0.62	0.53	0.61
2011				0.59		0.52	
2012				0.52		0.50	
2013				0.56		0.61	
2014	**	**	**	**	**	**	**
2015	**	**	**	**	**	**	**
2016	**	**	**	**	**	**	**
2017	**	**	**	**	**	**	**
2018	**	**	**	**	**	**	**
2019	**	**	**	**	**	**	**
2020	**	**	**	**	**	**	**
2021	**	**	**	**	**	**	**
2022	**	**	**	**	**	**	**
2023	**	**	**	**	**	**	**
2024	**	**	**	**	**	**	**

* unvollständige Messreihen, siehe Tabelle 2

** 2014 PM1-Messungen eingestellt