

**Gegenüberstellung von
PM10-Immissionen und
meteorologischer sowie
emissionsseitiger
Einflussgrössen für Zürich
und Tänikon 2001-2016**

Dr. Jürg Thudium
Dr. Carine Chélala
03.05.2017 / 5906.70 V3

Oekoscience AG

Postfach 452
CH - 7001 Chur

Telefon: +4181 250 3310
Chelala@oekoscience.ch

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
2. Dokumentation des Immissionsverlaufs des PM10	2
2.1. Monatsmittelwerte von PM10	5
2.2. Abweichung der PM10-Immissionen von der Norm	8
3. Immissionsrelevante Klimaelemente für die Periode 2001-2016	9
3.1. Verlauf von meteorologischen Jahreswerten	9
3.1.1. Inversionen	9
3.1.2. Windgeschwindigkeit	11
3.1.3. Temperatur	14
3.2. Atmosphärische Inversionen und PM10-Immissionen	14
3.3. Temperatur und PM10-Immissionen	18
3.4. Windgeschwindigkeit und PM10-Immissionen	22
3.5. Windrichtung und PM10-Immissionen	27
4. Einfluss von Wetterlagen-Klassen auf die PM10-Immissionen	32
5. Beschreibung des PM10-Verlaufs an den Stationen Tänikon und Zürich-Kaserne mit linearer Regression	37
5.1. Wahl der Einflussvariablen für die lineare Regression	37
5.2. Ergebnisse der linearen Regression	40
5.3. Zwei offene Fragen	50
6. Belastungsepisode im Pariser Becken im Dezember 2016	51
7. Entwicklung der Grenzwertüberschreitungen beim PM10 in Deutschland	53
8. Zusammenfassung	54

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1: PM10-Verlauf (Monatsmittel) bei Tänikon und Zürich-Kaserne, 2001-2016.	2
Abbildung 2.2: Lage der Messstationen Tänikon und Zürich-Kaserne. Quelle: Messstationen des NABEL ,2013.	3
Abbildung 2.3: Entwicklung der Jahresmittelwerte von PM10, Jahres-90%-Perzentil der Tagesmittel, Tagesanzahl $>30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ bzw. $>40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ und Abweichung von der Norm (MW 2001-2016) bei Tänikon und Zürich-Kaserne, 2001-2016.	4
Abbildung 2.4: Entwicklung der Monatsmittelwerte von PM10 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] je Jahr bei Tänikon und Zürich-Kaserne, 2001-2016.	6
Abbildung 2.5: PM10-Verlauf in Monatswerten: Mittelwerte, 90%-Perzentil der Tagesmittel je Monat, Tagesanzahl $>30\mu\text{g}/\text{m}^3$ bei Tänikon und Zürich-Kaserne, 2001-2016.	7
Abbildung 2.6: Abweichung der PM10-Monatsmittel von der Norm (Mittelwerte je Monat 2001-2016), Tänikon und Zürich-Kaserne, 2001-2016.	8
Abbildung 3.1: Jahresmittelwerte der Bodeninversionshäufigkeit und der Inversionsstärke (Ausmass) im TP Mittelland, 2001-2016.	10
Abbildung 3.2: Jahresmittelwerte von PM10 bei Tänikon und Zürich-Kaserne je Inversionsaufkommen (Tage mit $\geq 50\%$ bzw. $<50\%$ Inversionshäufigkeit) im TP Mittelland, 2001-2016.	10
Abbildung 3.3: Jahresmittelwerte der Windgeschwindigkeit und ihre Abweichung von der Norm (Mittelwert 2001-2016), Tänikon und Zürich-Kaserne, 2001-2016.	11
Abbildung 3.4: Jahresmittelwerte der Abweichung der Windgeschwindigkeit von der Norm (Mittelwert 2001-2016) je Jahreszeit, Tänikon und Zürich-Kaserne, 2001-2016.	12
Abbildung 3.5: Jahresmittel der Windgeschwindigkeit und mittlere höchste und niedrigste Tagesmittel der Windgeschwindigkeit je Monat im Jahresmittel, Tänikon und Zürich-Kaserne, 2001-2016.	13
Abbildung 3.6: Jahresmitteltemperaturen und Jahressummen der Anzahl Tage $< 0^\circ\text{C}$ bei Tänikon und Zürich-Kaserne, 2001-2016.	14

Abbildung 3.7: Monatsmittelwerte der Gesamtinversions-Häufigkeit (426-1144m), der Häufigkeit von Bodeninversionen (426-556m) und der Stärke (Ausmass) der Inversion (426-1144m) im TP Mittelland, 2001-2016.	15
Abbildung 3.8: Häufigkeit der Gesamtinversionen (426-1144m) und der Bodeninversionen (426-556m) im TP Mittelland und PM10-Verlauf je Monat bei Tänikon und Zürich-Kaserne, 2001-2016.	16
Abbildung 3.9: Monatsmittelwerte von PM10 gegen Inversionsgrößen (Häufigkeit der Gesamtinversion bzw. der Bodeninversion und Stärke der Gesamtinversion) im TP Mittelland, 2001-2016.	17
Abbildung 3.10: Monatsmittel der Temperatur und von PM10 bei Tänikon und Zürich-Kaserne sowie Anzahl Tagesmittelwerte < -5°C (Tänikon) bzw. < -2°C (Zürich-Kaserne), 2001-2016.	18
Abbildung 3.11: Monatsmittel der Temperatur und von PM10 sowie Anzahl Tagesmittelwerte < 0°C bei Tänikon und Zürich-Kaserne, 2001-2016.	19
Abbildung 3.12: Abweichung der Temperatur-Monatsmittel von der Norm (16-jährige Mittelwerte je Monat 2001-2016), Tänikon und Zürich-Kaserne, 2001-2016.	20
Abbildung 3.13: Monatsmittel der täglichen Heizgradzahl (HGZ) und von PM10 bei Tänikon und Zürich-Kaserne, 2001-2016.	21
Abbildung 3.14: Monatsmittel der Windgeschwindigkeit und von PM10 sowie monatliche Anzahl Tagesmittelwerte < 0.6 bzw. < 1.1 m/s bei Tänikon bzw. Zürich-Kaserne, 2001-2016.	22
Abbildung 3.15 (letzte Seite): Saisonmittel der Windgeschwindigkeit (in Grafik * 5; violett) und von PM10 (blau bzw. Orange) sowie saisonale Anz. Tagesmittelwerte < 0.6 bzw. < 1.1 m/s (violette Säulen) bei Tänikon bzw. Zürich-Kaserne, 2001-2016.	24
Abbildung 3.16: Abweichung der Windgeschwindigkeit-Monatsmittel von der Norm (Mittelwerte je Monat 2001-2016), Tänikon und Zürich-Kaserne, 2001-2016.	25
Abbildung 3.17 (letzte Seite): Abweichung der Windgeschwindigkeit-Monatsmittel von der Norm (Mittelwerte je Monat 2001-2016), Tänikon und Zürich-Kaserne, 2001-2016, aufgeteilt in die vier Jahreszeiten.	27
Abbildung 3.18: Windrosen und PM10-Konzentrationswindrosen für Tänikon und Zürich-Kaserne, 2001-2016, jeweils 4 Jahre zusammengefasst.	28

Abbildung 3.19: Massenfluss (Mittel($c \cdot v$) * Häufigkeit) pro Windsektor für PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^2/\text{s}$) für 2001-2004 und 2013-2016 bei Tänikon. c: PM10-Konzentration; v: Windgeschwindigkeit (Halbstundenwerte).	29
Abbildung 3.20: Massenfluss (Mittel($c \cdot v$) * Häufigkeit) pro Windsektor für PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^2/\text{s}$) für 2001-2004 und 2013-2016 bei Zürich-Kaserne. c: PM10-Konzentration; v: Windgeschwindigkeit (Halbstundenwerte).	30
Abbildung 3.21: Mittlere Änderung pro Jahr der Windsektorenhäufigkeiten [Prozentpunkte] und mittlere relative Änderung pro Jahr der PM10-Konzentration je Windsektor (6-24 Uhr) bei Tänikon und Zürich-Kaserne, 2001-2016.	31
Abbildung 4.1: Häufigkeit der CAP-Klassen und PM10-Immissionen je CAP-Klasse bei Tänikon und Zürich-Kaserne, 2001-2016. MW: Episodenmittel 2001-2016; 2003, 2006, 2013, 2014, 2015: Jahresmittelwerte.	36
Abbildung 5.1: Monatsmittelwerte der gemessenen und mit linearer Regression berechneten PM10-Immissionen bei Tänikon und Zürich-Kaserne, 2001 - 2016. PM10 Reg.: PM10-Verlauf berechnet aus dem Regressionsmodell. PM10 meteorober.: PM10-Verlauf bei meteorologischen Einflussgrößen gemäß der Norm 2001-2016.	41
Abbildung 5.2: Monatswerte der gemessenen und mit linearer Regression berechneten 90%-Werte der PM10-Tagesmittel bei Tänikon und Zürich-Kaserne, 2001 - 2016. Reg.: 90%-Werte berechnet aus dem Regressionsmodell. Meteorober.: 90%-Werte bei meteorologischen Einflussgrößen gemäß der Norm 2001-2016.	42
Abbildung 5.3: Monatssummen der gemessenen und mit linearer Regression berechneten Anzahl Tage mit im Mittel $> 30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ PM10 bei Tänikon und Zürich-Kaserne, 2001-2016. Reg.: Anzahl Tage $> 30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ berechnet aus dem Regressionsmodell. Meteorober.: Anzahl Tage $> 30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ bei meteorologischen Einflussgrößen gemäß der Norm 2001-2016.	43
Abbildung 5.4: Jahreswerte der gemessenen und berechneten Kenngrößen von PM10 bei Tänikon und Zürich-Kaserne, 2001-2016. PM10 Reg.: PM10-Kenngrößen berechnet aus dem Regressionsmodell. PM10 meteorober.: PM10-Kenngrößen bei meteorologischen Einflussgrößen gemäß der Norm (Mittelwerte je Monat 2001-2016).	44
Abbildung 5.5: Beispiele aus Abbildung 5.4 mit eingesetzter Regressionsgerade für die Jahreswerte der Messungen.	46
Abbildung 6.1: Verlauf von PM10 und NO_2 (Tagesmittel) vom 1.11.-12.12.2016 auf den Champs-Élysées (Paris; CHE), an der Route Nationale 2 (nordöstlich von Paris; RN2) und bei Zürich-Kaserne (ZHKas). Relative Verläufe: 100% = Episodenmittel 1.-21.11.2016 je Station und Komponente. <i>Datenquelle für CHE und RN2: Airparif, Paris.</i>	52

Abbildung 7.1: Prozentualer Anteil der Messstationen in Deutschland mit mehr als 35 Überschreitungen des PM10-Tagesmittelgrenzwertes, 2000-2015. *Quelle: Umweltbundesamt, Berlin.*

53

Tabellenverzeichnis

Tabelle 4.1: Zusammenfassung der CAP-Klassen:	32
Tabelle 4.2: Häufigkeit der CAP-Klassen (Jahresmittel) und ihr Trend 2001-2016.	33
Tabelle 4.3: Häufigkeit der CAP-Klassen und ihr Trend 2001-2016, Jahresmittel für den Winter (Januar, Februar und Dezember).	33
Tabelle 4.4: PM10-Episodenmittelwerte und relativer Trend [%/Jahr] je CAP-Klasse bei Tänikon, 2001-2016, ganzes Jahr und Winter (Januar, Februar und Dezember).	34
Tabelle 4.5: PM10-Episodenmittelwerte und relativer Trend [%/Jahr] je CAP-Klasse bei Zürich-Kaserne, 2001-2016, ganzes Jahr und Winter (Januar, Februar und Dezember)..	34
Tabelle 5.1: Auflistung der auf ihre Eignung als unabhängige Variable für die PM10-Kennzahlen untersuchten Parameter:	38
Tabelle 5.2: Meteorologische Anteile am PM10-Rückgang je Kennzahl und Zeitraum. 100% = gemessener PM10-Rückgang im entsprechenden Zeitraum:	45
Tabelle 5.3: Regressionskoeffizienten für PM10-Kenngrößen bei Tänikon, 2001-2016. p: Irrtumswahrscheinlichkeit, dass ein gefundener Zusammenhang sich nur zufällig eingestellt hat. Beschreibung der Variablen: S. Kap. 5.1.	47
Tabelle 5.4: Regressionskoeffizienten für PM10-Kenngrößen bei Zürich-Kaserne, 2001-2016. p: Irrtumswahrscheinlichkeit, dass ein gefundener Zusammenhang sich nur zufällig eingestellt hat. Beschreibung der Variablen: S. Kap. 5.1.	48

1. Einleitung

In den letzten Jahren haben sich die PM10-Immissionen weiter stark reduziert. Die Werte haben insgesamt deutlich abgenommen, und auch die Ausschläge nach unten und oben haben sich reduziert.

In dieser Studie wurde evaluiert, ob sich ein meteorologischer Anteil an diesem deutlichen PM10-Rückgang erkennen lässt. In der Studie "PM10-Belastungsphasen in der Ost- und Zentralschweiz; Winterhalbjahre 2001-2012", Oekoscience, 2013, wurden meteorologische Einflüsse auf die PM10-Immissionen untersucht. Erhöhte PM10-Werte kamen überwiegend bei 3 von insgesamt 9 verschiedenen Grosswetterlagen ('CAP-Klassen') vor. Sie gingen mehrheitlich mit tieferer Temperatur, tieferer Windgeschwindigkeit und verstärktem Inversionsvorkommen einher. Es wurde von diesen Studienergebnissen ausgegangen, wobei dies auch der zur Verfügung stehenden Datenbasis entsprach.

Es wurden die PM10-Konzentrationen an den beiden Stationen Zürich-Kaserne und Tänikon von 2001 bis 2016 betrachtet.

Der Verlauf der PM10-Immissionen und von meteorologischen Einflussgrössen wurde auf Basis von Tageswerten (Inversionen: Stundenwerten) zusammengefasst in Monatswerten betrachtet.

2. Dokumentation des Immissionsverlaufs des PM10

Seit 2001 haben sich die PM10-Immissionen praktisch fortlaufend reduziert bei beiden Messstationen Tänikon und Zürich-Kaserne. Der maximale Monatsmittelwert stellte sich bei Tänikon im Januar 2006 mit $48.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ und der minimale mit $5.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ im Dezember 2011 ein. Bei Zürich-Kaserne betrug das Maximum $55.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ im Februar 2003 und das Minimum $7.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ im Juni 2016.

Beide Stationen zeigen das gleiche Verhalten im Schnitt, das heisst dass die Quellen des PM10 grundsätzlich die gleichen sind und dass sich das 'PM10-Phänomen' auf das gesamte Gebiet erstreckt.

Ausnahmen sind die Monate November 2003, Oktober 2005 und Dezember 2013: da gab es Peaks bei Zürich-Kaserne aber nicht bei Tänikon.

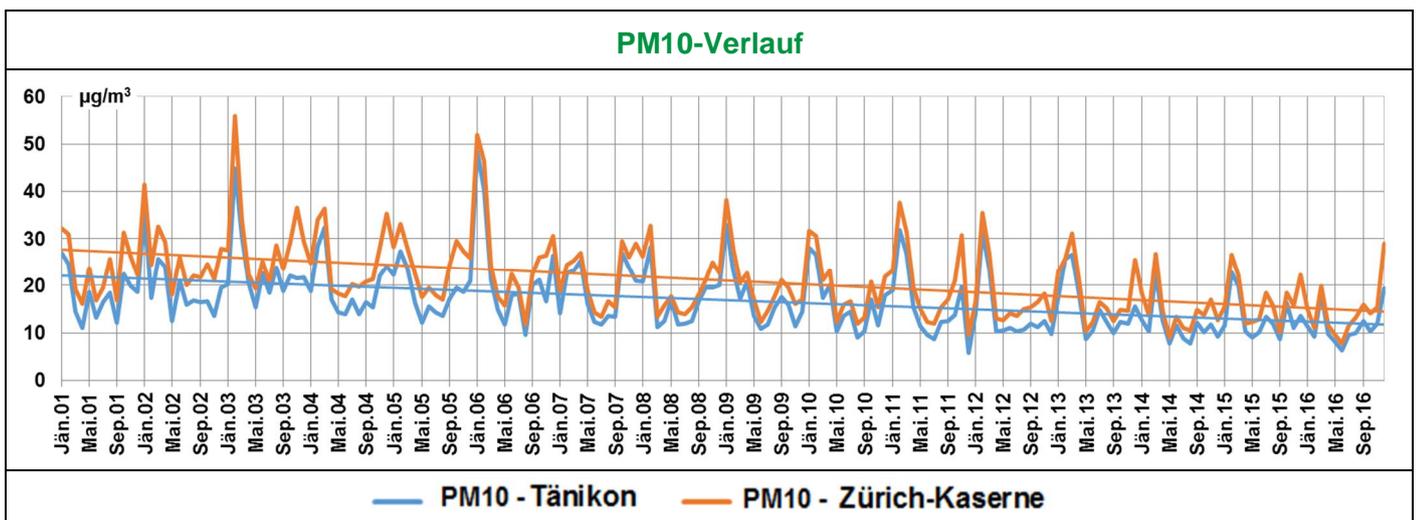


Abbildung 2.1: PM10-Verlauf (Monatsmittel) bei Tänikon und Zürich-Kaserne, 2001-2016.

Bei den Monatsmittelwerten war Tänikon immer weniger belastet als Zürich-Kaserne. Bei den Tagesmittelwerten hingegen war Tänikon zu 11% der Zeit höher oder etwa gleich belastet wie Zürich-Kaserne.

Im Dezember 2016 kam es . mitteleuropäisch . zu einem meteorologisch bedingten Wiederanstieg der PM10-Konzentrationen. Die $29 \mu\text{g}/\text{m}^3$ bei Zürich-Kaserne sind dort im März 2013 letztmals übertroffen worden. Die $19 \mu\text{g}/\text{m}^3$ bei Tänikon wurden im März 2015 letztmals übertroffen, im März 2016 fast erreicht. Die Pm10-Werte im ausserordentlich milden März 2017 waren übrigens nicht erhöht.

Die Station Zürich-Kaserne repräsentiert städtischen Hintergrund, Tänikon ländliches Gebiet.

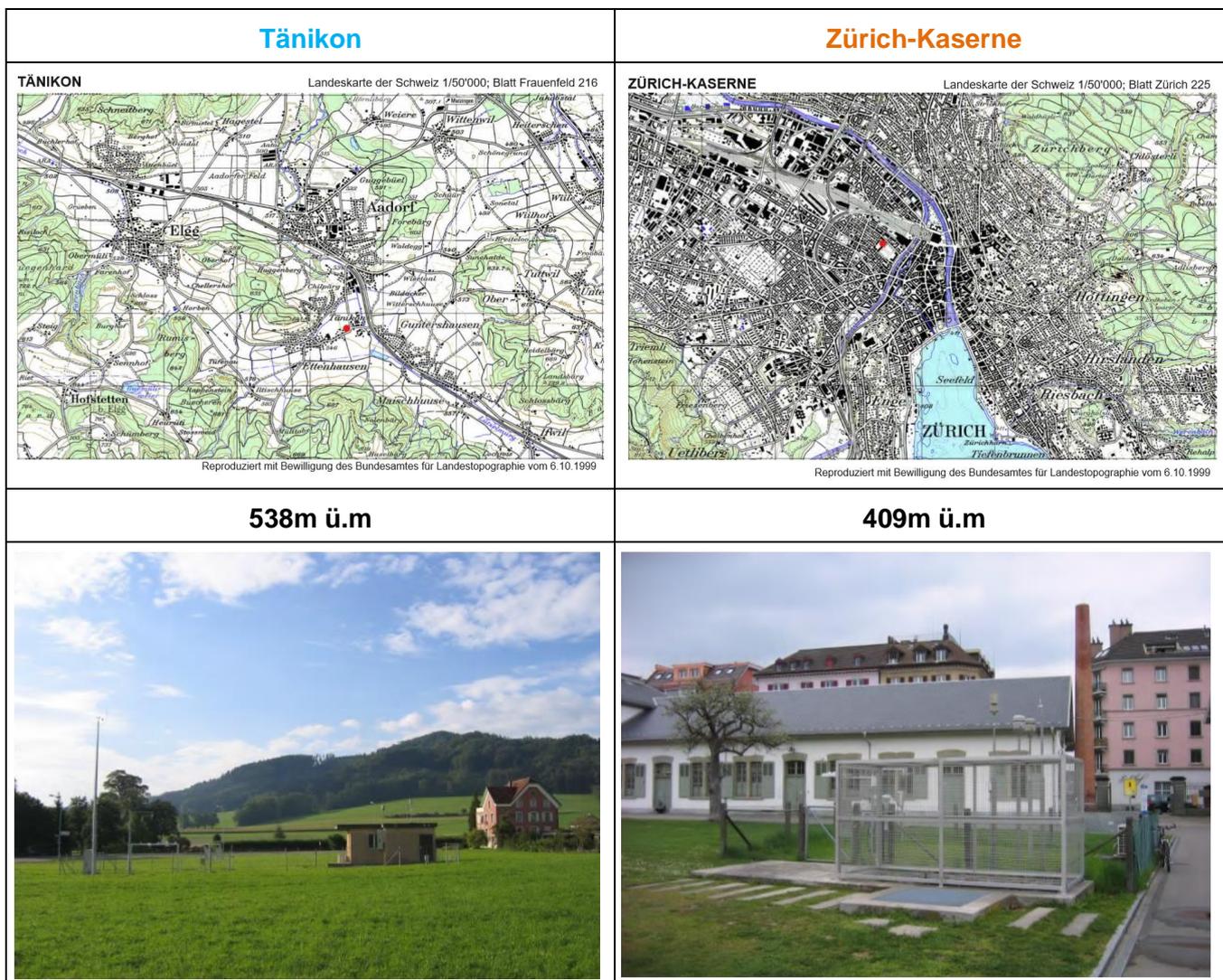


Abbildung 2.2: Lage der Messstationen Tänikon und Zürich-Kaserne. Quelle: Messstationen des NABEL, 2013.

Im Folgenden werden Jahreswerte von PM10-Kennzahlen von 2001-2016 betrachtet.

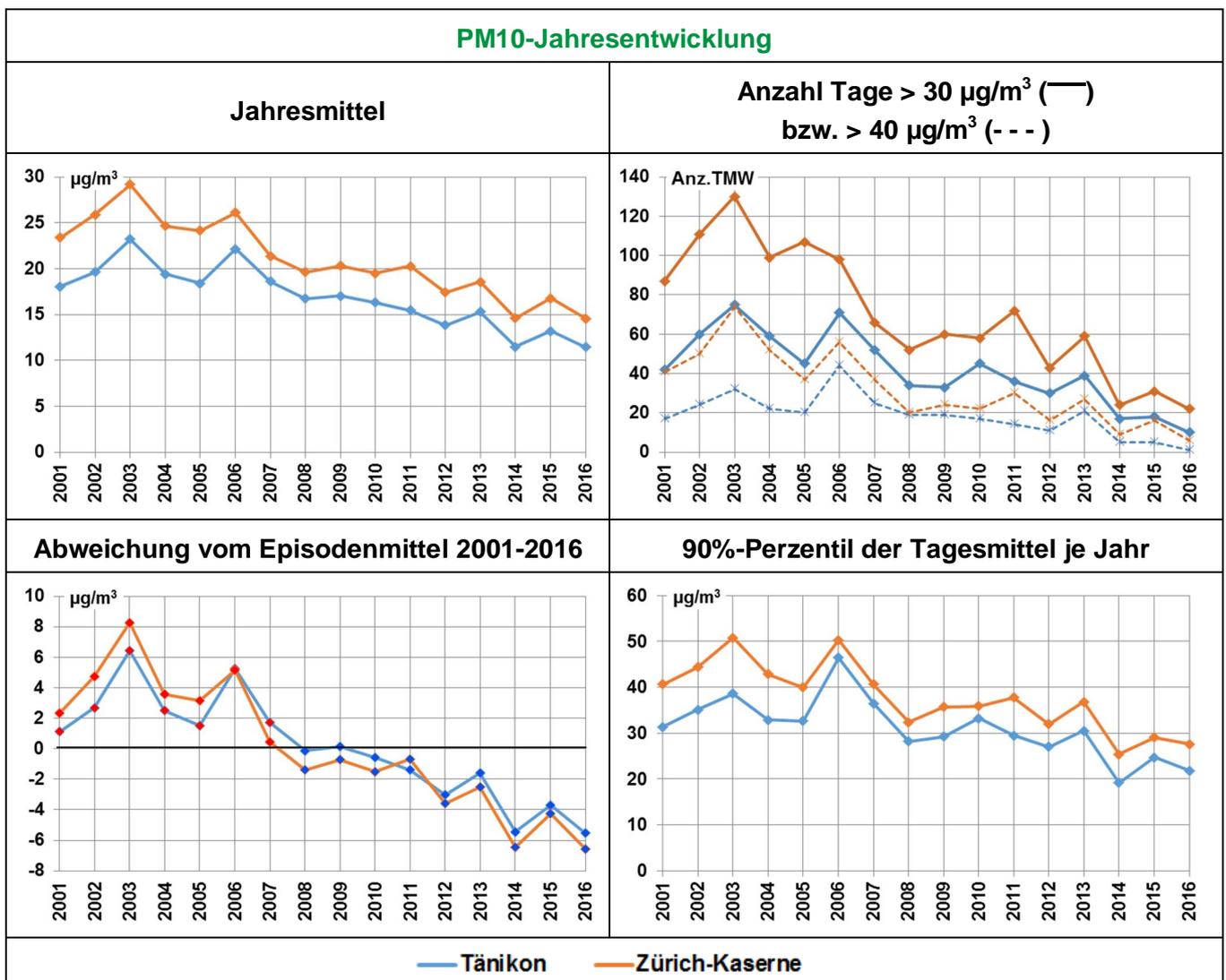


Abbildung 2.3: Entwicklung der Jahresmittelwerte von PM10, Jahres-90%-Perzentil der Tagesmittel, Tagesanzahl >30 µg/m³ bzw. >40 µg/m³ und Abweichung von der Norm (MW 2001-2016) bei Tänikon und Zürich-Kaserne, 2001-2016.

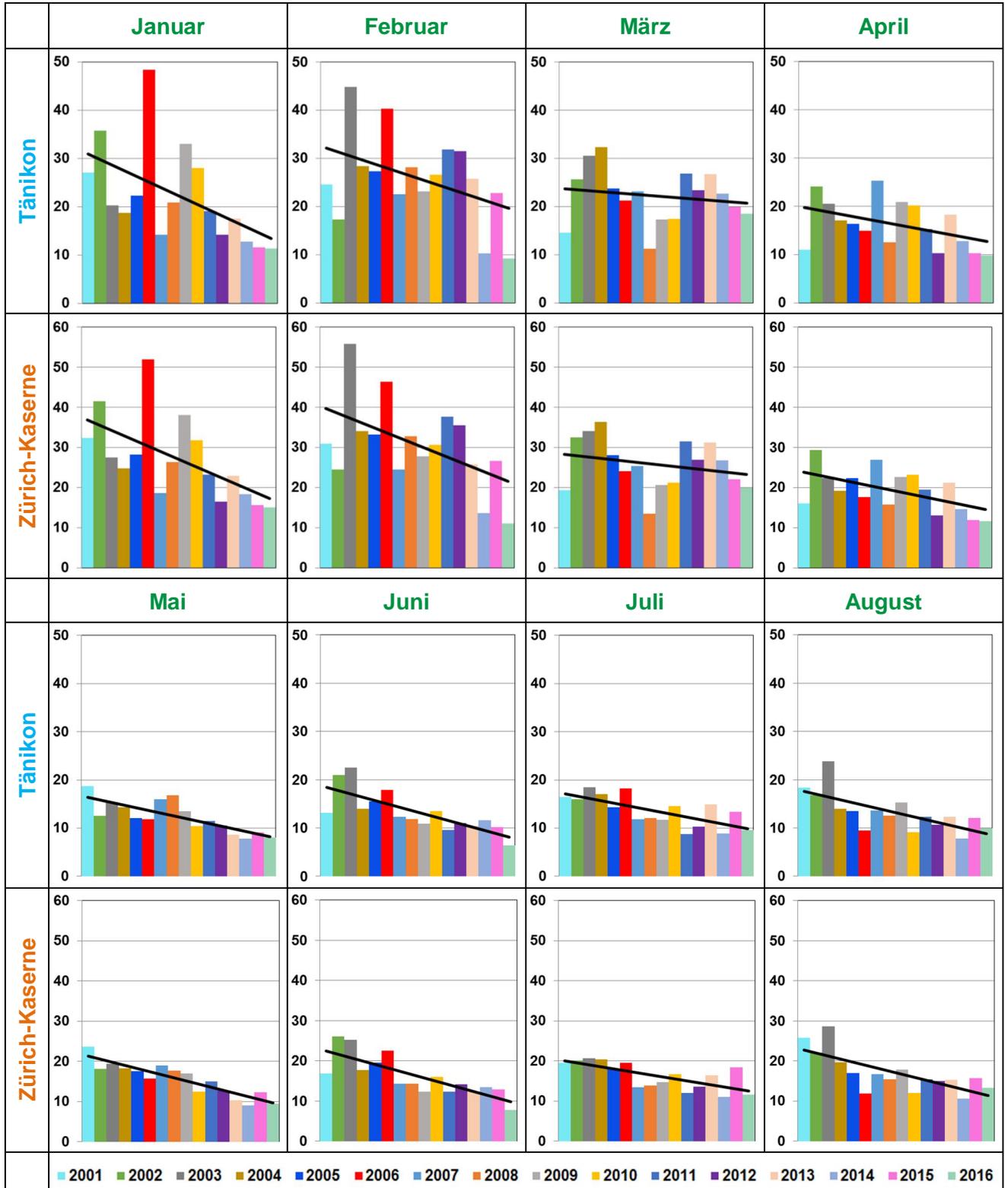
Das Maximum im Jahresmittel stellte sich im 2003 ein, das Maximum im 90%-Perzentil aber 2006: Das bedeutet dass es im 2006 eine sehr hohe Belastungsphase gab, aber insgesamt mehr hohe Konzentrationen im 2003.

Ab 2008 ist die Abweichung von der Norm (Mittelwert 2001-2016) durchwegs negativ. beide Stationen zeigen von 2013 auf 2014 einen markanten Sprung abwärts. Die PM10-Belastung hat sich kontinuierlich abwärts entwickelt, allerdings gab es von 2008 bis 2011 eine Phase mit nahezu konstanten Werten.

Der Wiederanstieg der PM10-Kennzahlen für 2015 hat sich im 2016 wieder zurückgebildet, trotz der erhöhten Werte im Dezember.

2.1. Monatsmittelwerte von PM10

Alle Monate zeigen einen abnehmenden Trend der PM10-Konzentration.



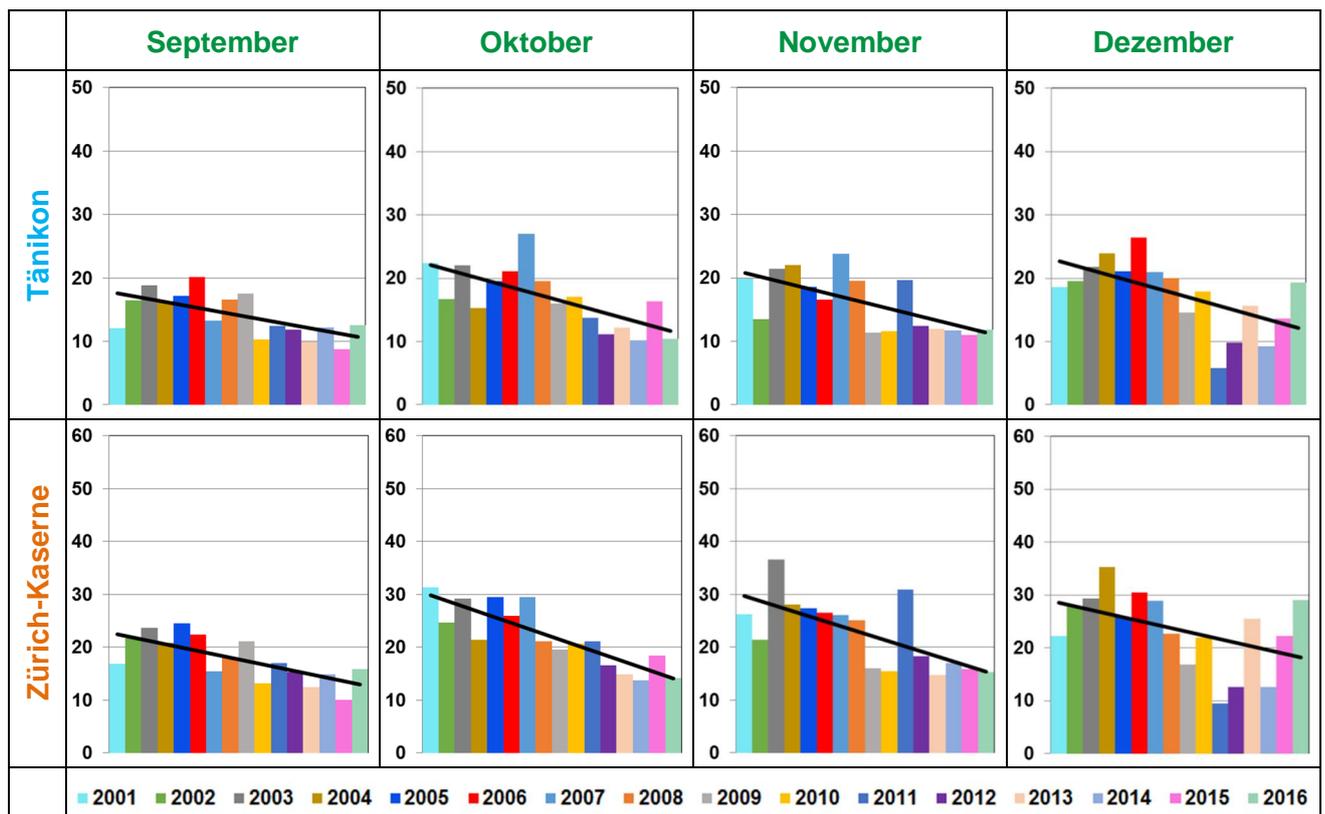


Abbildung 2.4: Entwicklung der Monatsmittelwerte von PM10 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] je Jahr bei Tänikon und Zürich-Kaserne, 2001-2016.

Der März zeigt von allen Monaten die geringste Abnahme von 2001-2016 (absolut und prozentual), der Januar die grösste absolute. Prozentual zeigen 8 Monate jährliche Abnahmen zwischen -4% und -5%, Februar, April und Juli knapp -3%, der März knapp -1%.

Die abnehmende Tendenz in allen PM10-Verläufen zeigt sich auch in der folgenden Grafik. Dargestellt sind die Monatsmittelwerte, die monatlichen 90%-Perzentile der Tagesmittel sowie die Anzahl Tage mit $>30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ PM10. Besonders deutlich ist die 'Ausdünnung' mit Tagen $> 30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ PM10 in den letzten Jahren, nur mit der Ausnahme vom Dezember 2016 bei Zürich-Kaserne.

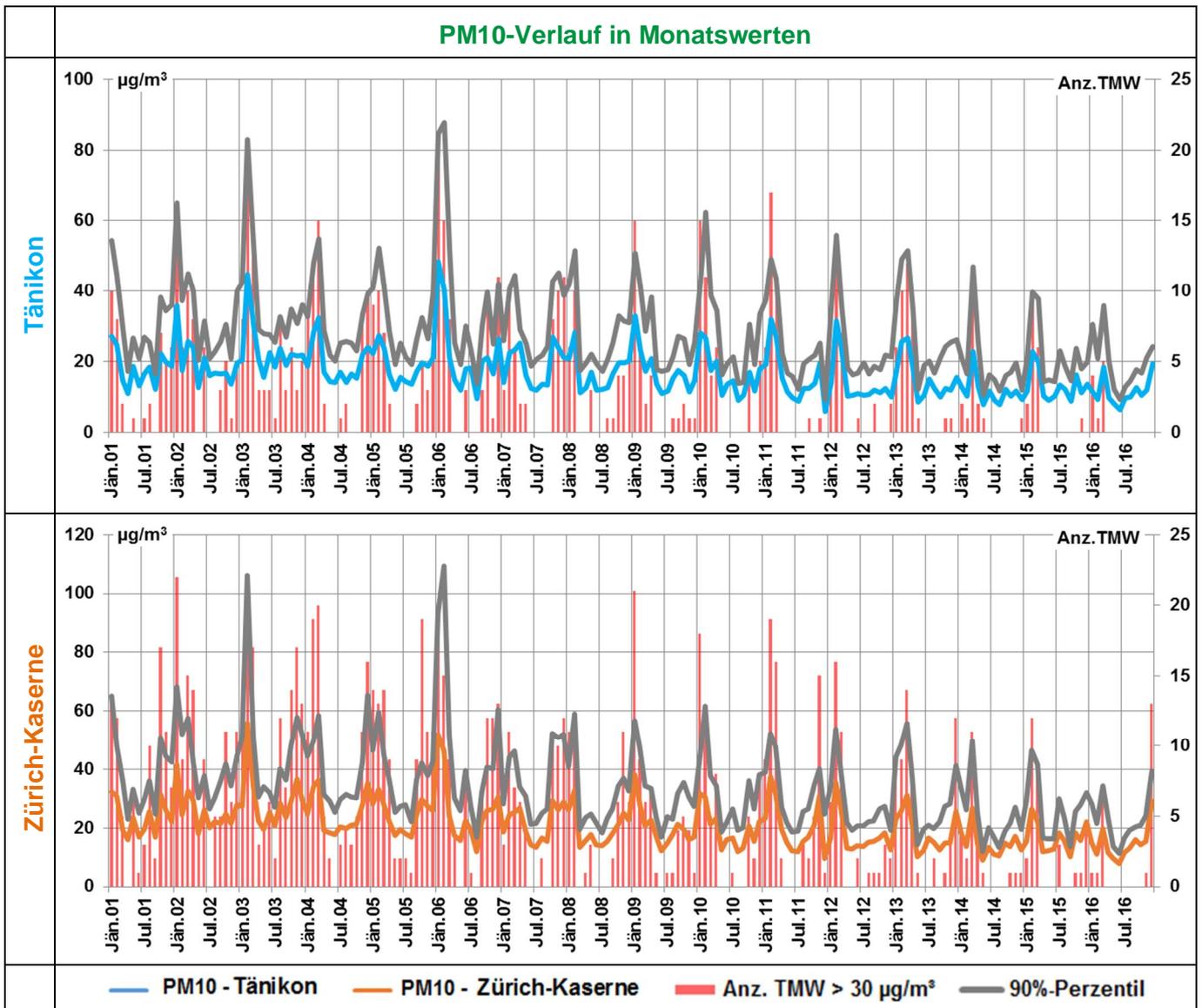


Abbildung 2.5: PM10-Verlauf in Monatswerten: Mittelwerte, 90%-Perzentil der Tagesmittel je Monat, Tagesanzahl >30µg/m³ bei Tänikon und Zürich-Kaserne, 2001-2016.

2.2. Abweichung der PM10-Immissionen von der Norm

Die folgende Darstellung wird auch für Klimaelemente gewählt werden: Gezeigt werden die monatlichen Abweichungen von der monatlichen Norm, was hier der Mittelwert von 2001-2016 ist. Positive Abweichungen werden rot gezeichnet, negative blau.

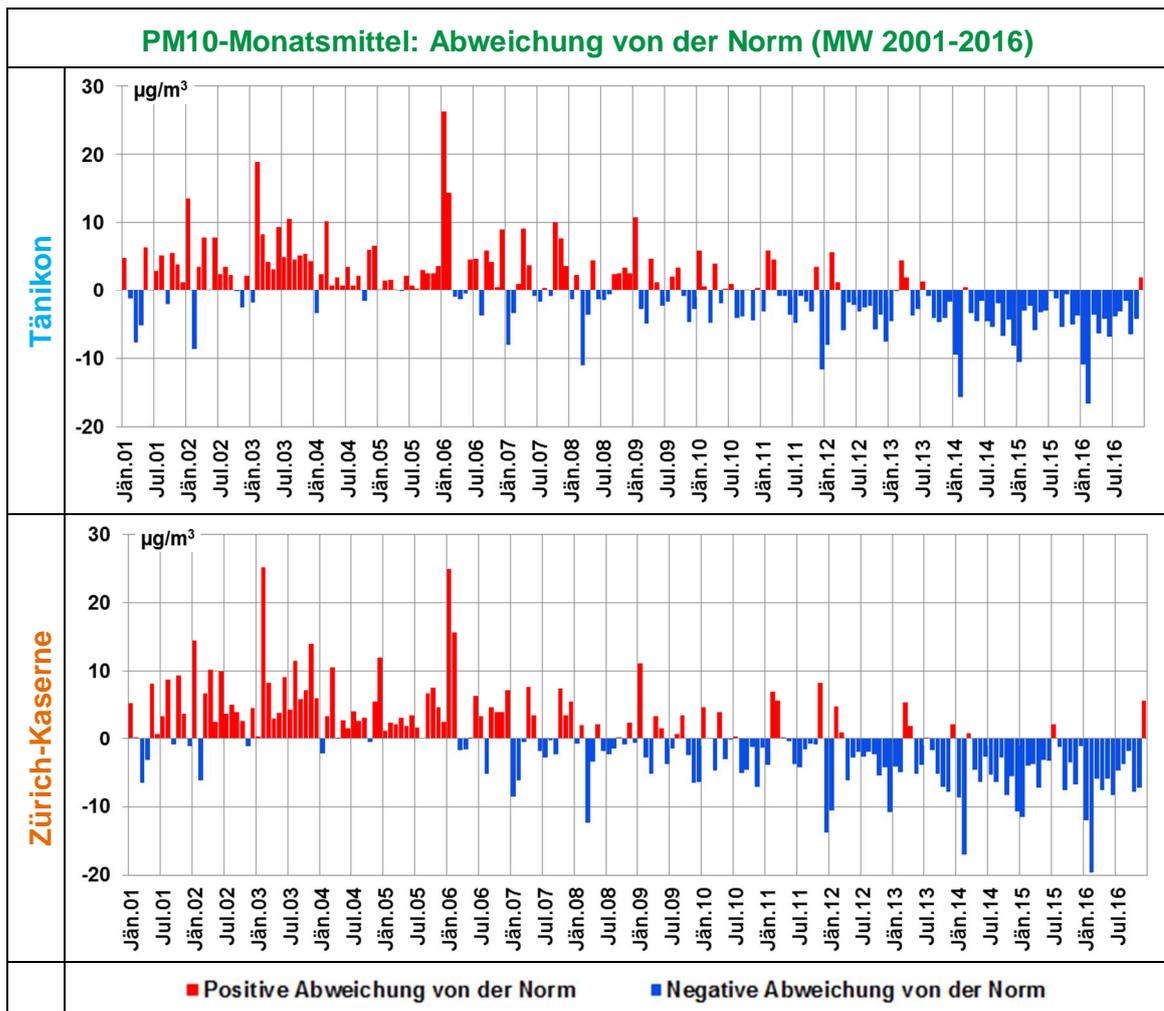


Abbildung 2.6: Abweichung der PM10-Monatsmittel von der Norm (Mittelwerte je Monat 2001-2016), Tänikon und Zürich-Kaserne, 2001-2016.

In der Darstellung von Abbildung 2.6 wird der PM10-Verlauf augenscheinlich: Maximum 2003-2006, relativ stabile Phase um die Norm herum 2008-2011, markante Abnahme seit 2013.

3. Immissionsrelevante Klimaelemente für die Periode 2001-2016

In diesem Kapitel wird der Verlauf der immissionsrelevanten Klimaelemente Inversionen, Temperatur und Wind betrachtet. Bezüge zum PM10-Verlauf werden hergestellt.

Die atmosphärischen Inversionen wurden anhand des Temperaturprofils Kloten (426 m) . Fluntern [Meteo-Schweiz] (556 m) . Lägern (873 m) . Hörnli (1144 m) bestimmt. Fortan werden die folgenden Begriffe verwendet:

- Inversion: Positive Umkehr der potentiellen (höhenbereinigten) Temperatur von mehr als 1.5 °C in der Schicht zwischen Kloten und Hörnli (426 . 1144 m).
- Bodeninversion: Die wie oben beschrieben ermittelte Inversion besteht auch oder nur in der untersten Schicht (Kloten . Fluntern, 426 . 556 m).
- Inversionsstärke = Inversionsausmass: Positive Differenz der potentiellen Temperaturen innerhalb der inversiven Schicht (426 . 1144 m).
- Inversionshäufigkeit: Prozentualer Anteil von Stunden in einem Monat mit Inversion.

3.1. Verlauf von meteorologischen Jahreswerten

In den folgenden Abbildungen wird der Jahresverlauf einiger meteorologischer Grössen gezeigt, welche relevant für die PM10-Immissionen sind.

3.1.1. Inversionen

Die Inversionsgrössen Ausmass und Bodeninversionshäufigkeit zeigen einen leicht abnehmenden Trend von 2001-2016.

Inversionen wirken immissionserhöhend für bodennah emittierte Luftschadstoffe. Teilt man alle Tage eines Jahres in solche mit $\geq 50\%$ Inversionshäufigkeit und solche mit $< 50\%$ auf, so ist der PM10-Mittelwert für alle Tage der oberen Häufigkeitsklasse deutlich höher als derjenige für die untere Häufigkeitsklasse. Von 2001 bis 2016 haben die Mittelwerte beider Klassen abgenommen, wobei das Verhältnis der beiden Mittelwerte etwa gleich geblieben ist; d.h. die Wirksamkeit von Inversionen hat sich nicht verändert, die Rückhalteprozesse spielen sich einfach auf niedrigerem PM10-Niveau ab.

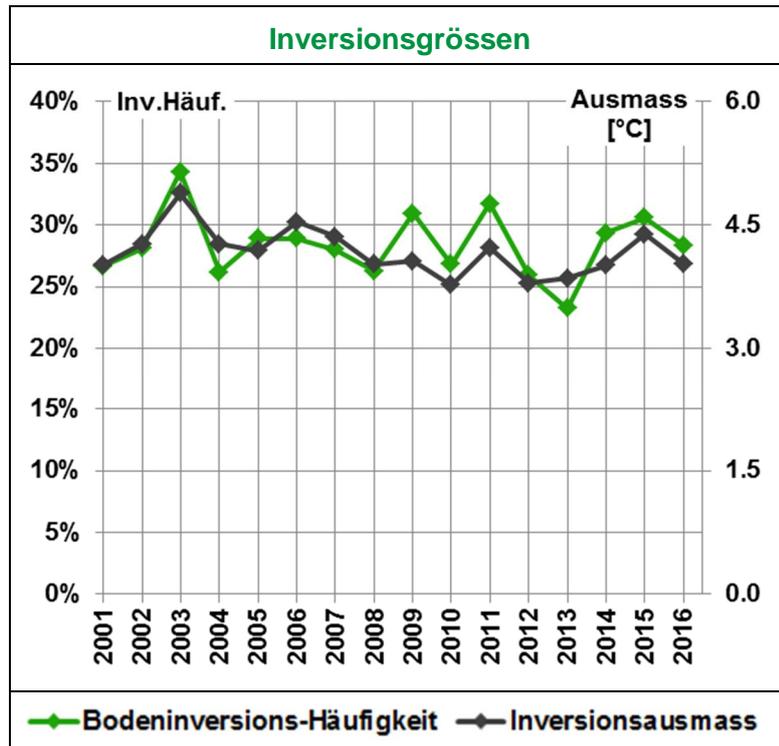


Abbildung 3.1: Jahresmittelwerte der Bodeninversionshäufigkeit und der Inversionsstärke (Ausmass) im TP Mittelland, 2001-2016.

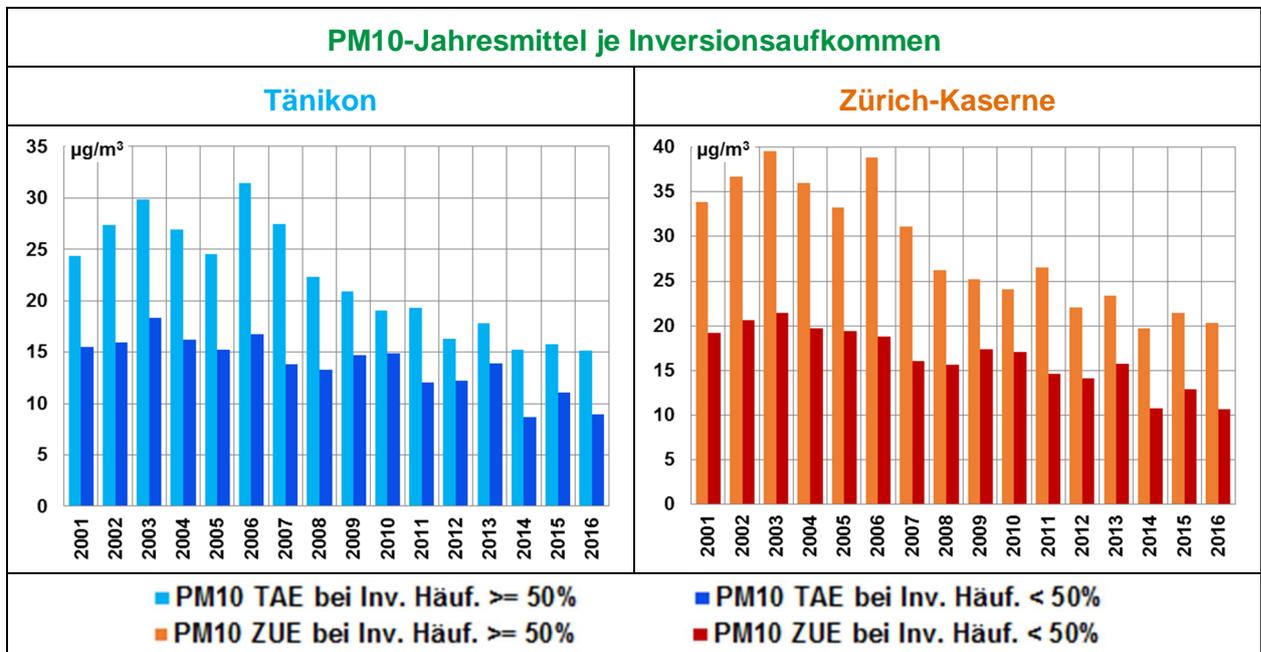


Abbildung 3.2: Jahresmittelwerte von PM10 bei Tänikon und Zürich-Kaserne je Inversionsaufkommen (Tage mit $\geq 50\%$ bzw. $< 50\%$ Inversionshäufigkeit) im TP Mittelland, 2001-2016.

3.1.2. Windgeschwindigkeit

Die Windgeschwindigkeit hat deutlich abgenommen von 2001-2016. Gezeigt werden die Jahresmittel der Windgeschwindigkeit und ihre Abweichung von der Norm (= Mittelwert 2001-2016).

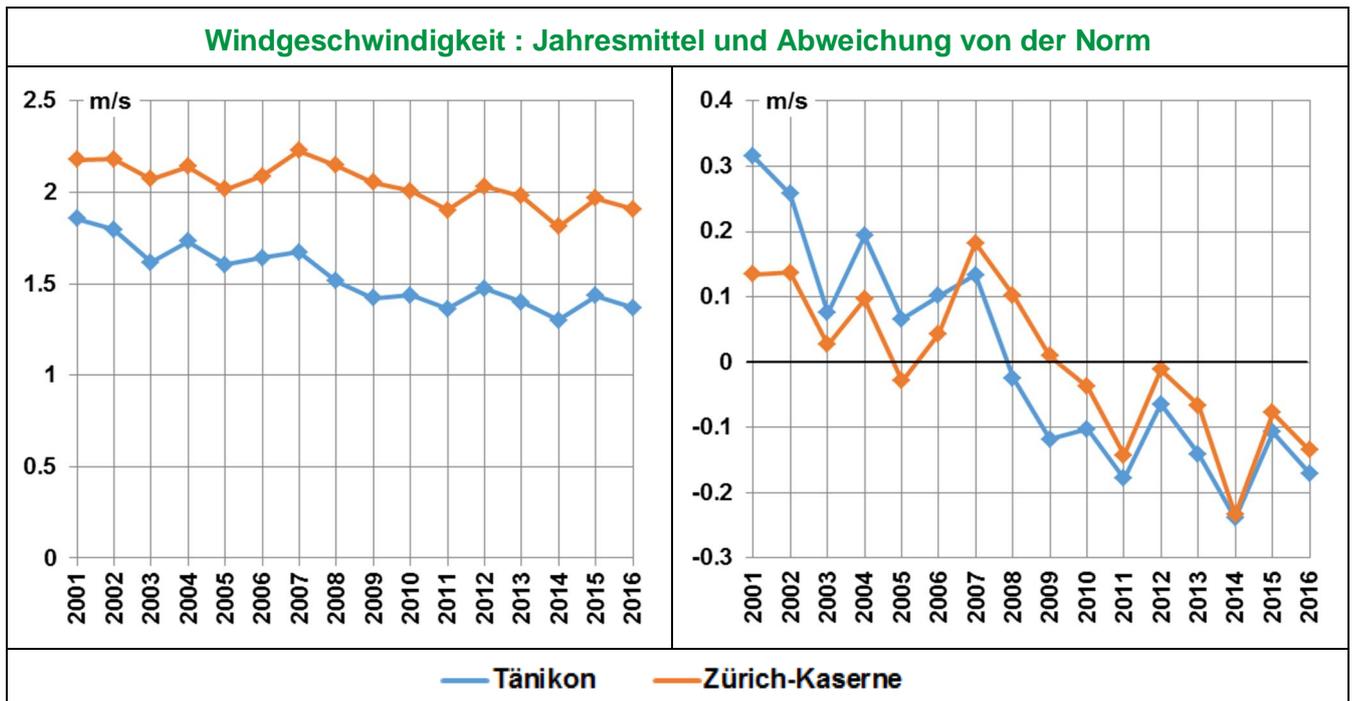


Abbildung 3.3: Jahresmittelwerte der Windgeschwindigkeit und ihre Abweichung von der Norm (Mittelwert 2001-2016), Tänikon und Zürich-Kaserne, 2001-2016.

Die Windgeschwindigkeiten haben in allen Jahreszeiten abgenommen, im Sommer etwas weniger als in den übrigen Jahreszeiten.

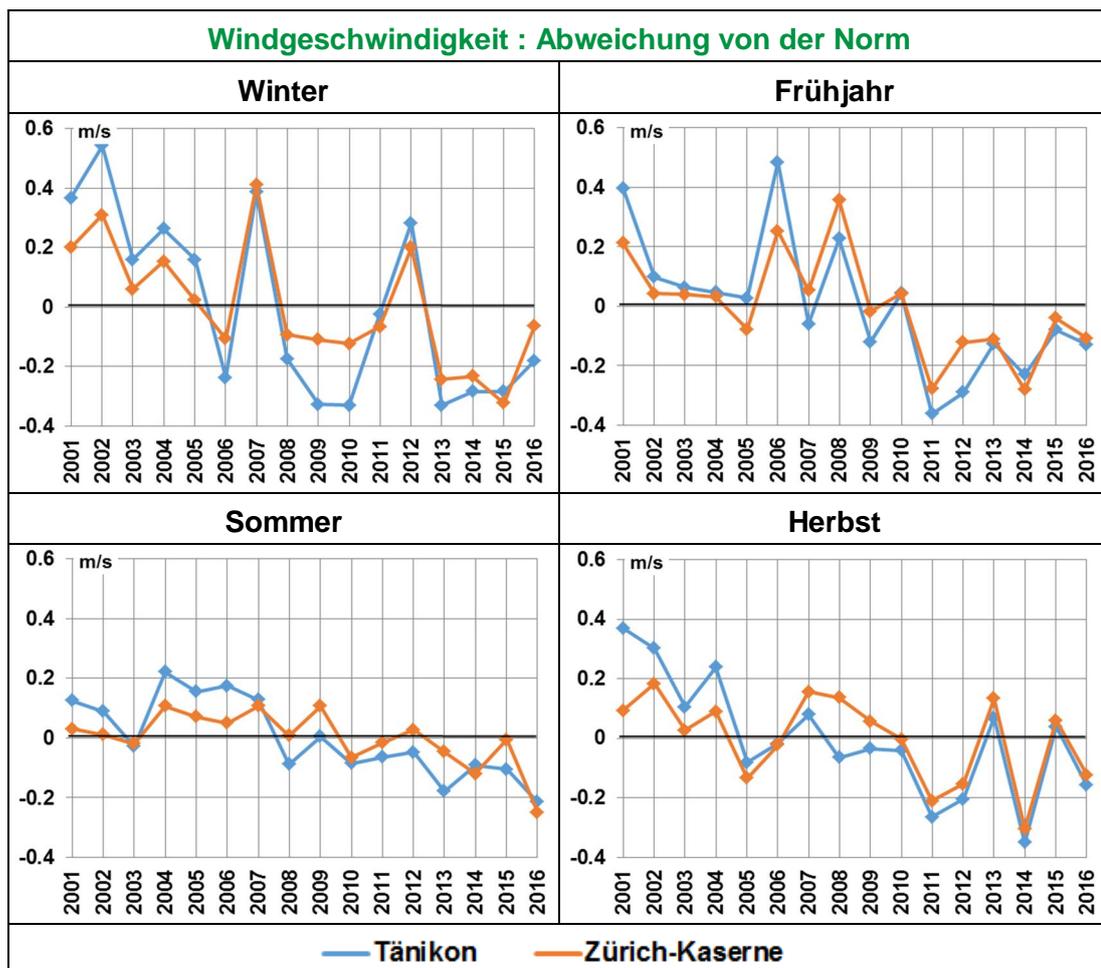


Abbildung 3.4: Jahresmittelwerte der Abweichung der Windgeschwindigkeit von der Norm (Mittelwert 2001-2016) je Jahreszeit, Tänikon und Zürich-Kaserne, 2001-2016.

Eine generelle Abnahme der Windgeschwindigkeit wurde auch andernorts schon beobachtet und als 'Global Stilling' bezeichnet.

Dieses Phänomen ist auf dem Kontinent gemessen worden, aber nicht auf der Oberfläche von Ozeanen. Bislang ist es schwierig, es einzuordnen, da verschiedene Aspekte eine Rolle spielen könnten. Es sind dies z.B. die Gültigkeit von Messungen, Probleme (wie Reibung) bei älteren Schalenkreuzanemometern, Änderung in der Nahumgebung der Messstationen (Bäume, Bautenö), Erhöhung der Oberflächenrauigkeit durch verstärktes Pflanzenwachstum infolge Klimawandels etc. Das Phänomen ist aber auch lufthygienisch wichtig, was die Verdünnung der Luftschadstoffe betrifft.

Etwas mehr Aufschluss über 'Global Stilling' erhält man, wenn man für Tänikon und Zürich-Kaserne nicht nur die Jahresmittel der Windgeschwindigkeit, sondern

auch die mittleren höchsten und niedrigsten Tagesmittel je Monat im Jahresmittel darstellt.

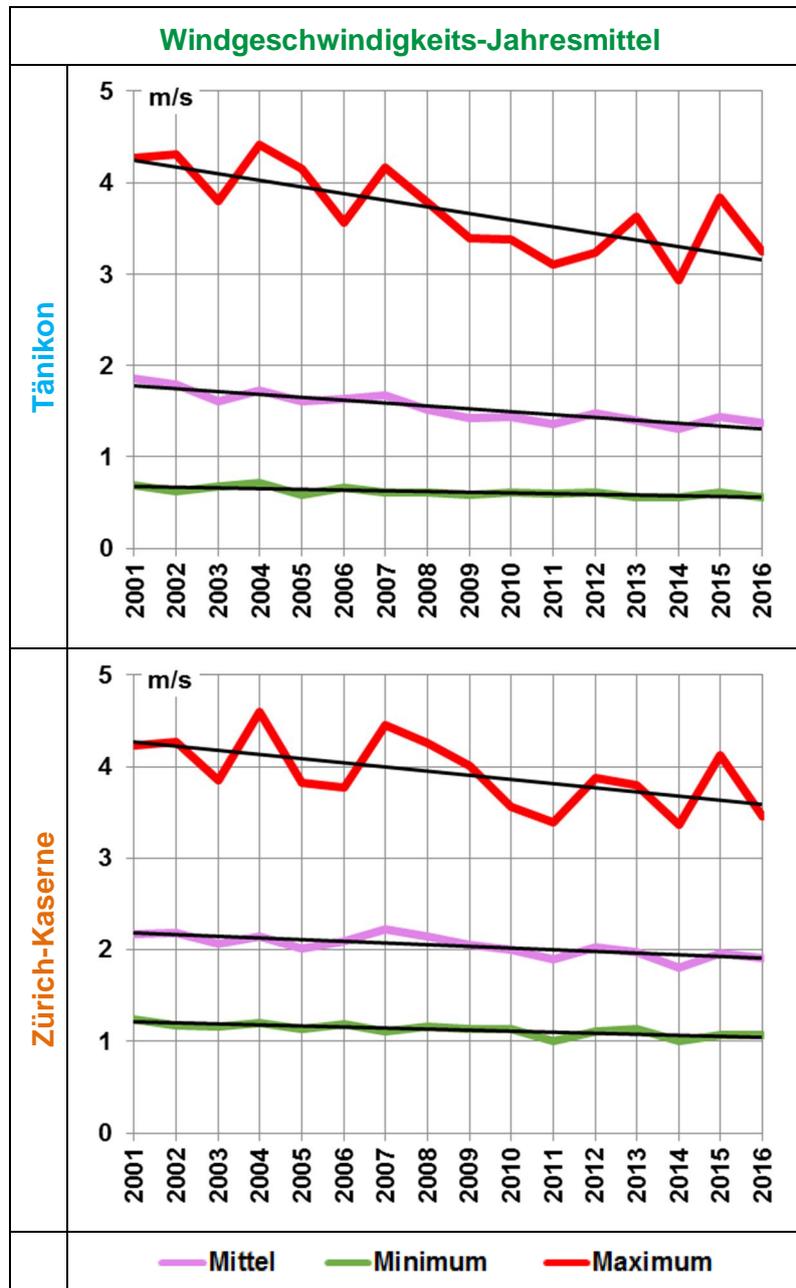


Abbildung 3.5: Jahresmittel der Windgeschwindigkeit und mittlere höchste und niedrigste Tagesmittel der Windgeschwindigkeit je Monat im Jahresmittel, Tänikon und Zürich-Kaserne, 2001-2016.

Die mittleren höchsten Tagesmittel der Windgeschwindigkeit haben am meisten abgenommen, wo auch ältere Instrumente am wenigsten Probleme hatten. Dennoch erscheint die Abnahme über nur 16 Jahre als erheblich, vor allem bei Tänikon. Dieses Phänomen sollte nicht unbeachtet bleiben.

3.1.3. Temperatur

In der Stadt Zürich ist es wärmer als in Tänikon, im Jahresmittel etwa um 2.5 °C. Die Schwankungsbreite in den Jahresmitteltemperaturen betrug an beiden Orten in den letzten 16 Jahren knapp 2 °C.

Die Anzahl der kalten Tage (Tagesmittel < 0 °C) hat bei Zürich-Kaserne seit 2014 markant abgenommen, bei Tänikon war diese Anzahl nur 2014 rekordtief. Jedoch hat auch in Tänikon die Anzahl sehr kalter Tage (Tagesmittel < -5 °C, s. Abbildung 3.10) seit 2014 markant abgenommen.

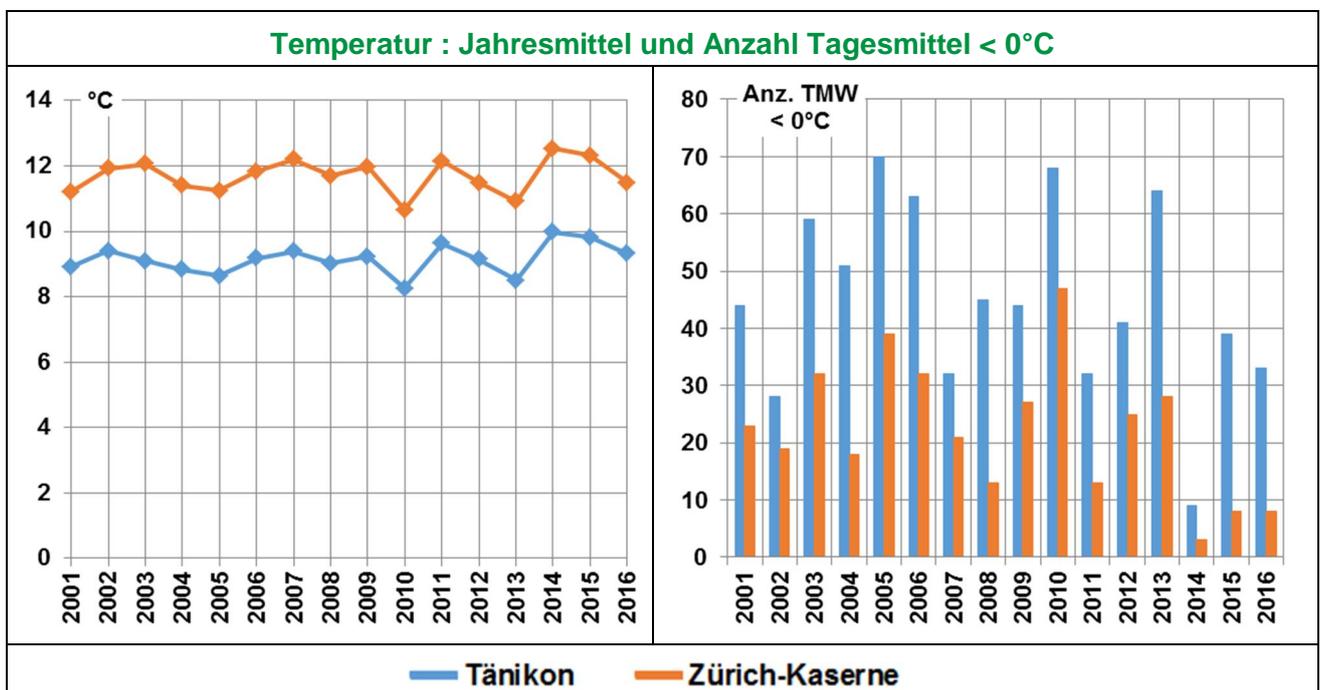


Abbildung 3.6: Jahresmitteltemperaturen und Jahressummen der Anzahl Tage < 0°C bei Tänikon und Zürich-Kaserne, 2001-2016.

3.2. Atmosphärische Inversionen und PM10-Immissionen

Im Folgenden wird das Inversionsvorkommen dem PM10-Verlauf auf Basis von Monatswerten gegenübergestellt.

Die Inversionshäufigkeit insgesamt (426-1144m) ist in den letzten 16 Jahren im zeitlichen Mittel konstant geblieben, der Anteil der Bodeninversionen hat aber abgenommen: die rote Fläche (= Mass für abgehobene Inversionen) in Abbildung

3.7 nimmt mit den Jahren stets zu. Die Bodeninversionen wirken sich unmittelbar auf die Rückhaltung bodennah freigesetzter Luftschadstoffe aus.

Auch die Stärke der Inversionen (das Inversionsausmass) hat mit den Jahren abgenommen. Es wäre interessant zu untersuchen, ob die Abnahmen der Inversionsstärke und der Häufigkeit von Bodeninversionen in Zusammenhang stehen mit dem Klimawandel.

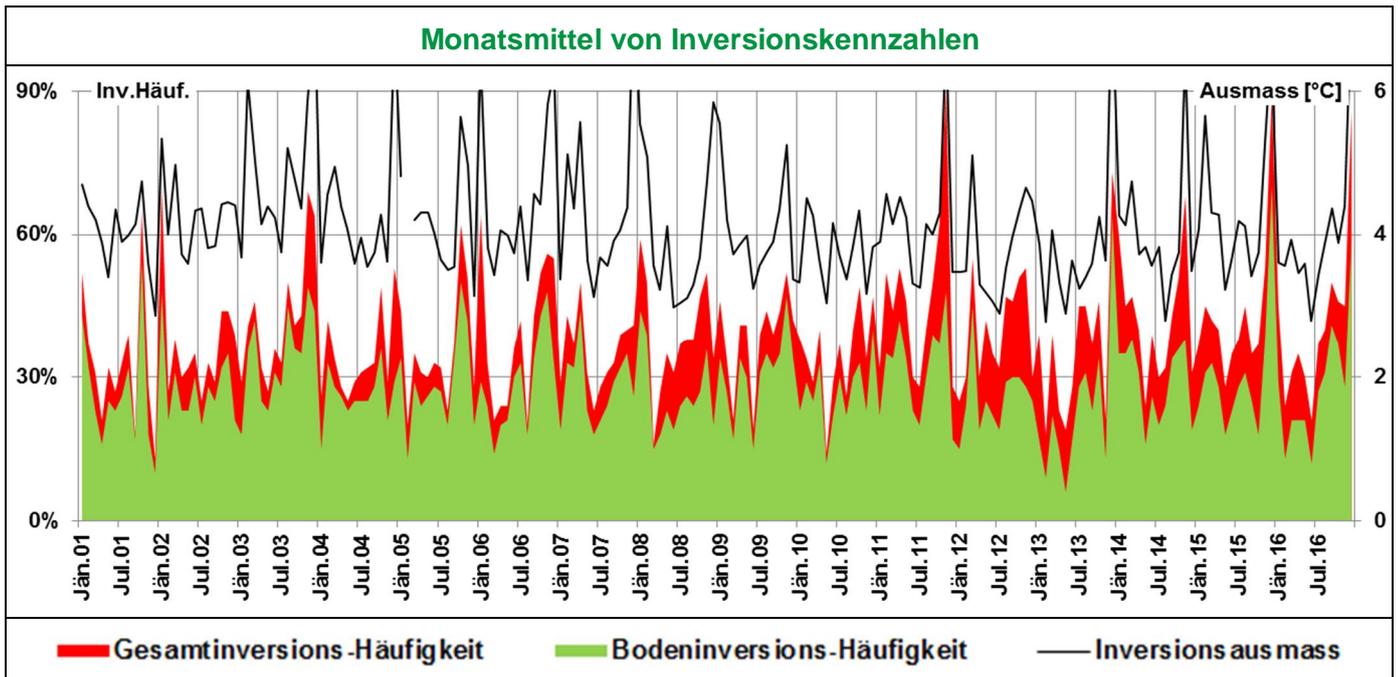


Abbildung 3.7: Monatsmittelwerte der Gesamtinversions-Häufigkeit (426-1144m), der Häufigkeit von Bodeninversionen (426-556m) und der Stärke (Ausmass) der Inversion (426-1144m) im TP Mittelland, 2001-2016.

In der nächsten Abbildung ist zu sehen, dass die PM10-Immissionen nicht im Einklang zur gesamten Inversionshäufigkeit (zwischen 426 und 1144 m) verlaufen, eher im Einklang mit der Häufigkeit der Bodeninversionen (zwischen 426 und 556 m). Nun könnten aber diese beiden Grössen (PM10 und Bodeninversionshäufigkeit) aus unterschiedlichen Gründen zeitliche Parallelen aufweisen. Es ist die Aufgabe der in Kap. 5 vorgestellten Regression, den Einfluss der Bodeninversionen gegen andere Einflüsse auf die PM10-Immissionen abzuwägen.

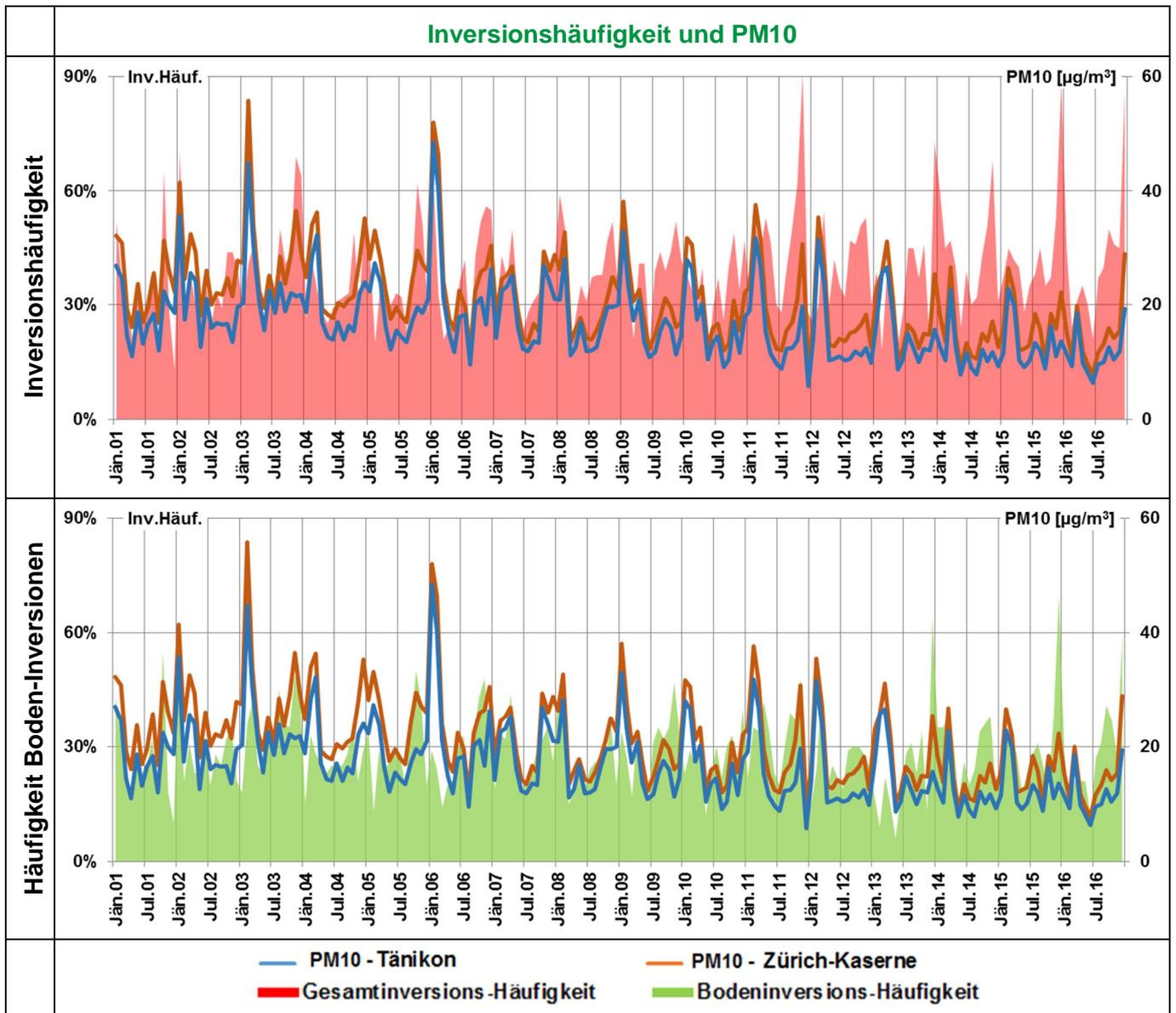


Abbildung 3.8: Häufigkeit der Gesamtinversionen (426-1144m) und der Bodeninversionen (426-556m) im TP Mittelland und PM10-Verlauf je Monat bei Tänikon und Zürich-Kaserne, 2001-2016.

Die folgenden Streudiagramme zeigen die PM10-Monatsmittel gegen die Inversionshäufigkeit und die Inversionsstärke. Die Breite der Punktwolken zeigt, dass mannigfache Einflüsse die PM10-Konzentration bestimmen. Jedoch gehen höhere Inversionshäufigkeit und höhere Inversionsstärke grundsätzlich mit höherer PM10-Immission einher, bei Zürich-Kaserne ausgeprägter als bei Tänikon, bei der Inversionsstärke und der Bodeninversionshäufigkeit ausgeprägter als bei der gesamten Inversionshäufigkeit.

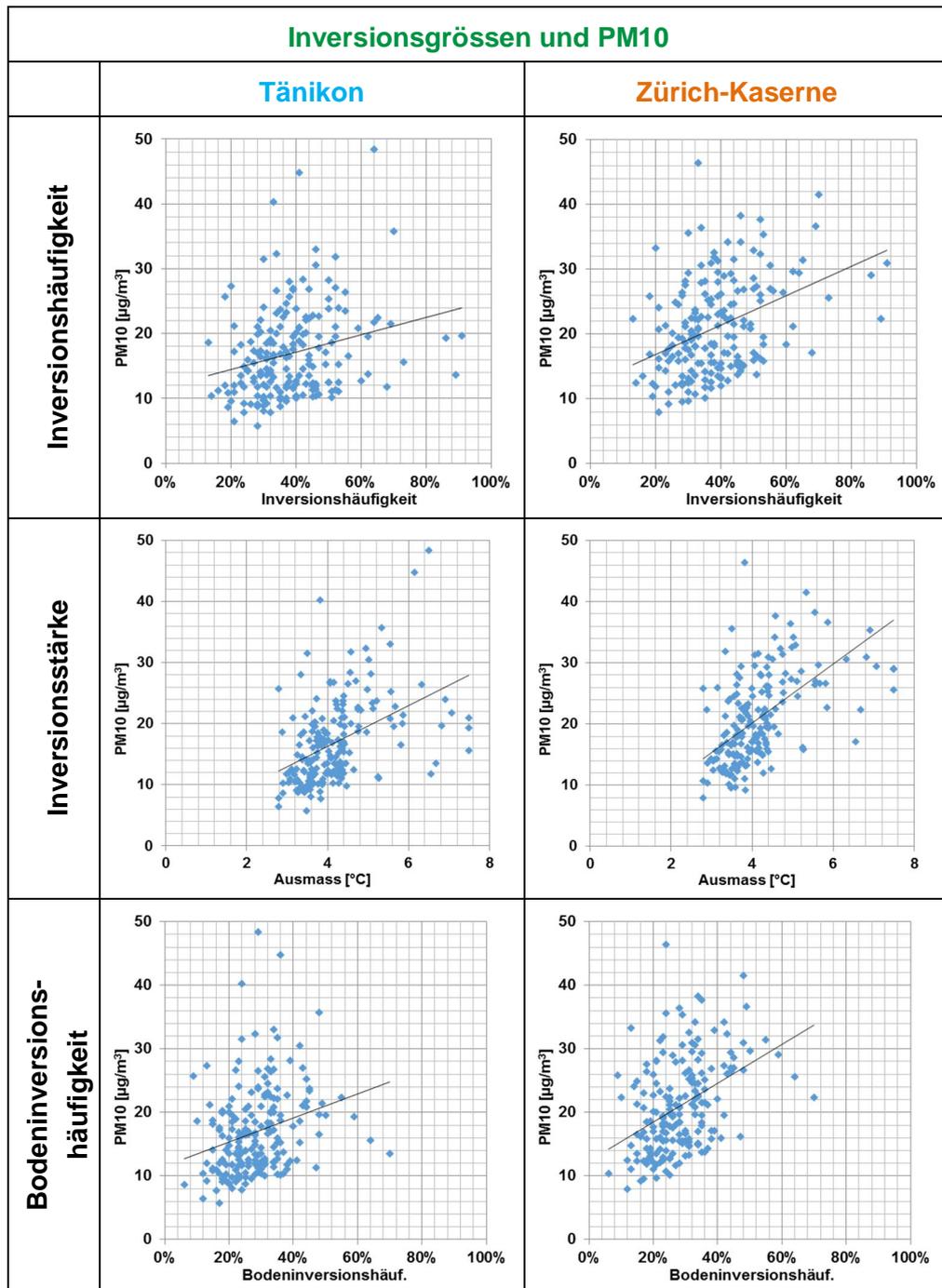


Abbildung 3.9: Monatsmittelwerte von PM10 gegen Inversionsgrößen (Häufigkeit der Gesamtinversion bzw. der Bodeninversion und Stärke der Gesamtinversion) im TP Mittelland, 2001-2016.

Das 'TP Mittelland' steht aufgrund der Lage der Temperaturmesspunkte eher für die Region Zürich als für die Region bei Tänikon, deshalb zeigen sich die Zusammenhänge bei Zürich-Kaserne ausgeprägter.

3.3. Temperatur und PM10-Immissionen

Bei der Temperatur kann auf standortspezifische Daten für Tänikon und Zürich-Kaserne zurückgegriffen werden. Die folgenden beiden Grafiken zeigen wiederum Monatswerte: PM10-Immissionen, Temperatur und Anzahl Tage mit einer Mitteltemperatur unter einem bestimmten Schwellenwert.

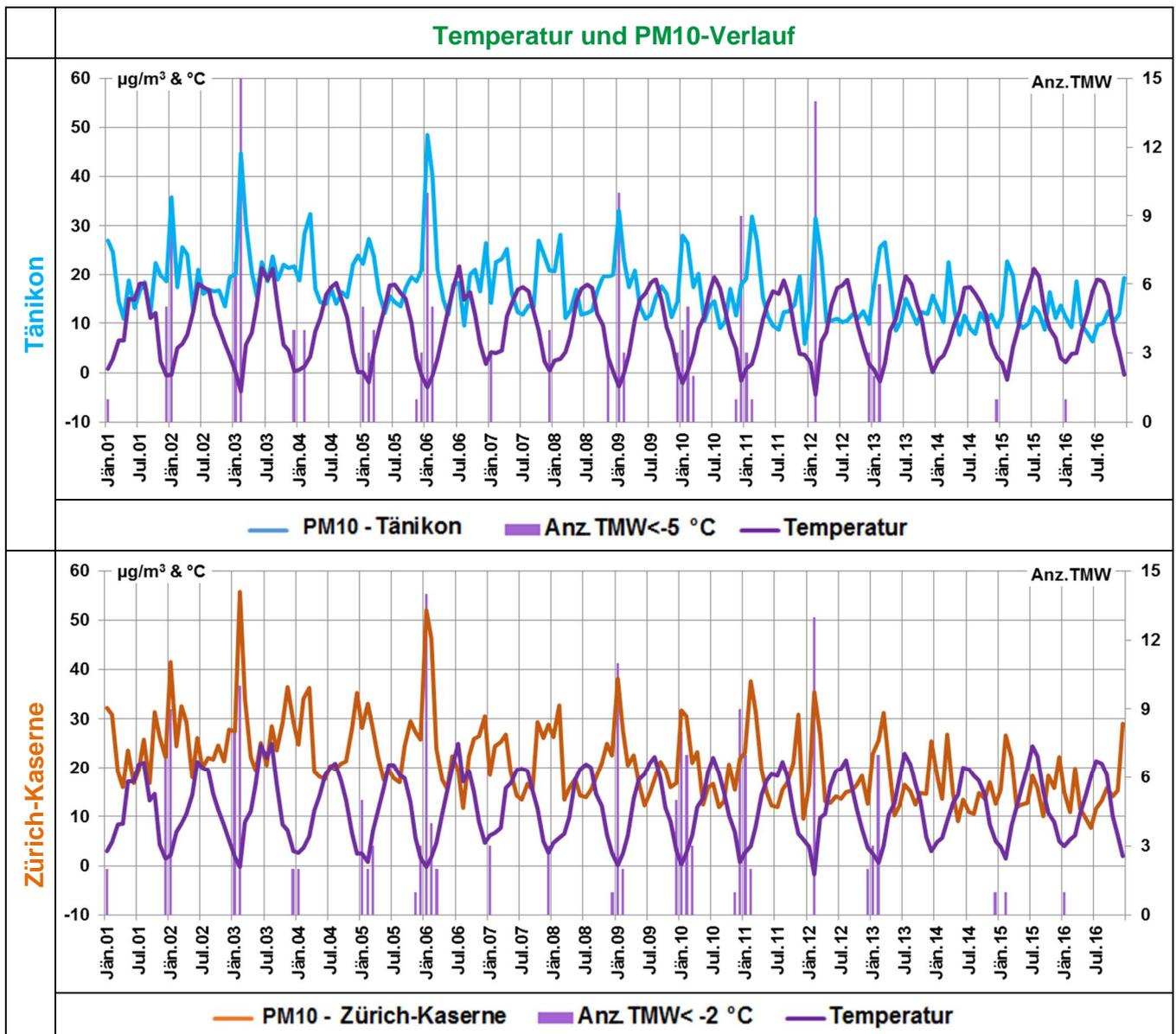


Abbildung 3.10: Monatsmittel der Temperatur und von PM10 bei Tänikon und Zürich-Kaserne sowie Anzahl Tagesmittelwerte $<-5^\circ\text{C}$ (Tänikon) bzw. $<-2^\circ\text{C}$ (Zürich-Kaserne), 2001-2016.

Kalte Tage (Tagesmittel unter Schwellenwert) kommen seit 2014 praktisch nicht mehr vor. Setzt man die Schwelle höher ($< 0^\circ\text{C}$), kommen kalte Tage häufiger vor, aber auch dann ist die Abnahme seit 2014 besonders bei Zürich-Kaserne

deutlich zu sehen. Kalte Tage gehen oft mit Stagnation der Atmosphäre einher, was immissionserhöhend wirkt.

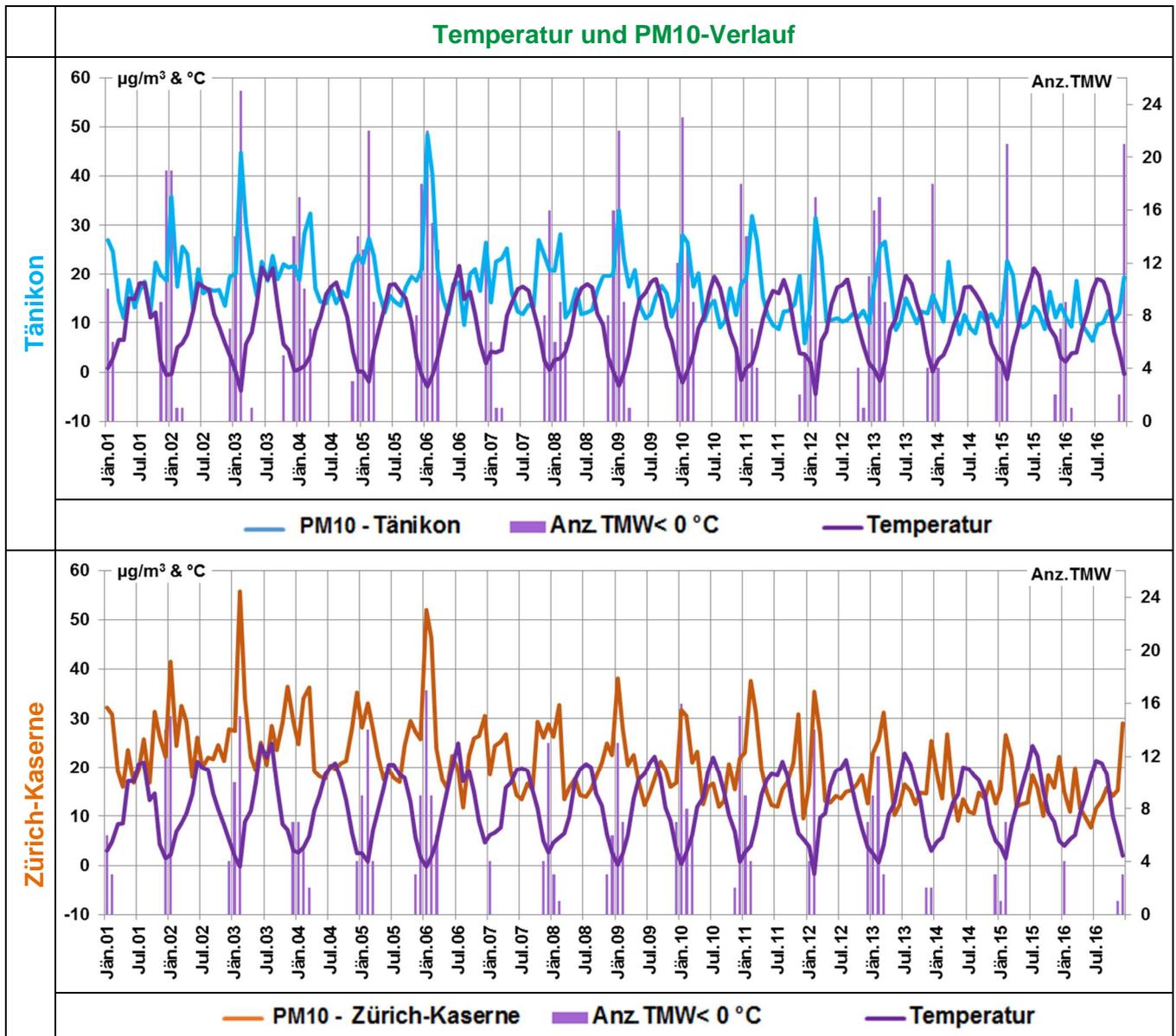


Abbildung 3.11: Monatsmittel der Temperatur und von PM10 sowie Anzahl Tagesmittelwerte < 0°C bei Tänikon und Zürich-Kaserne, 2001-2016.

In der nächsten Abbildung werden die monatlichen Abweichungen der Temperatur von der monatlichen Norm gezeigt, was hier der Mittelwert je Monat von 2001-2016 ist. Positive Abweichungen werden rot gezeichnet, negative blau. Das Bild ist keineswegs so eindeutig wie beim PM10. Dennoch ist gut zu erkennen, dass die Anzahl zu warmer Monate seit 2014 zugenommen und die Anzahl der zu kalten Monate entsprechend abgenommen hat.

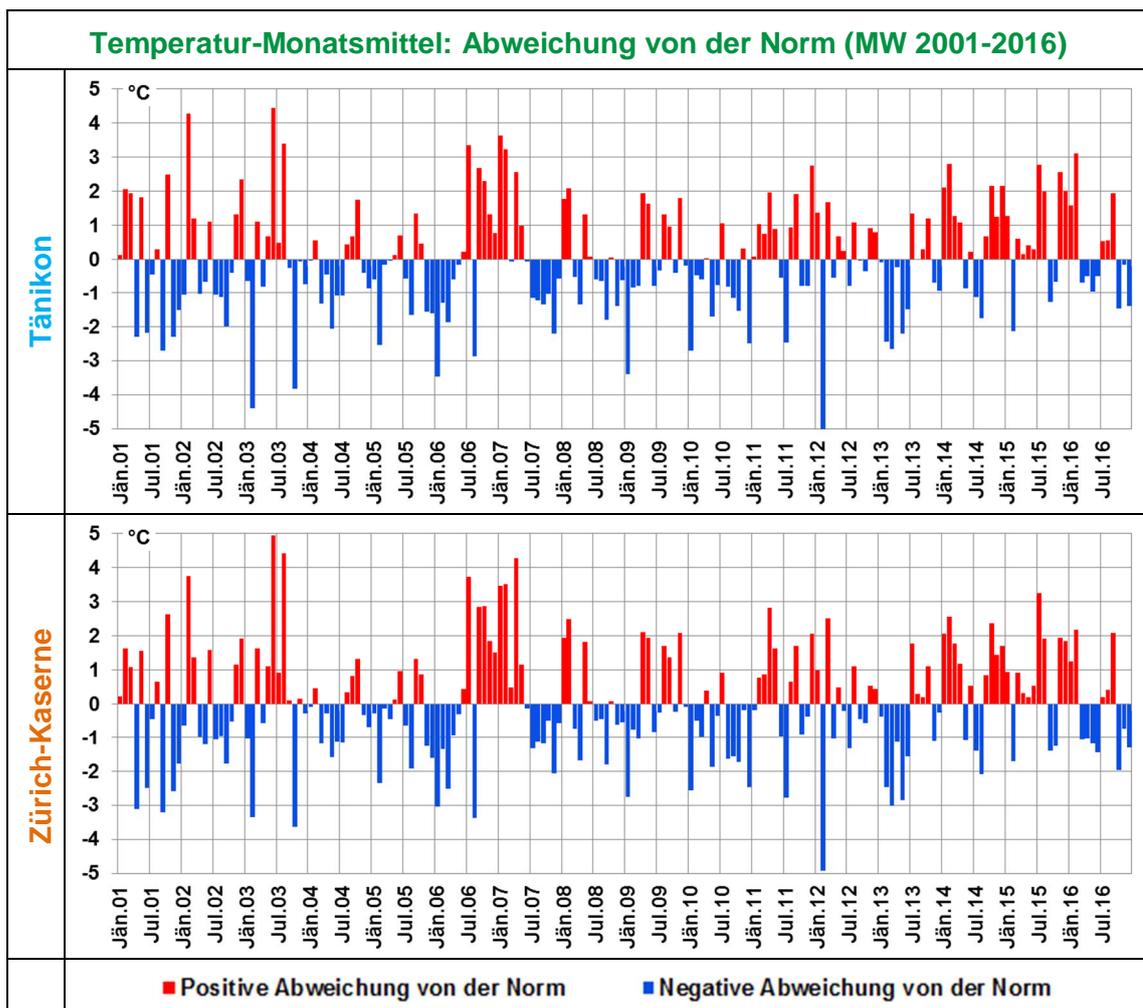


Abbildung 3.12: Abweichung der Temperatur-Monatsmittel von der Norm (16-jährige Mittelwerte je Monat 2001-2016), Tänikon und Zürich-Kaserne, 2001-2016.

Kalte Temperaturen führen nicht nur über vermehrte Stagnation der Atmosphäre zu erhöhten Immissionen, im Falle des PM10 führen sie wegen verstärkter Heiztätigkeit auch zu erhöhten Emissionen. Ein Mass dafür ist die Heizgradzahl: Die Heizgradzahl eines Tages ist die positiv genommene Differenz der Tagesmitteltemperatur zu 12 °C, sofern das Tagesmittel unter 12 °C liegt; ansonsten ist sie null. Der Verlauf der Heizgradzahlen (s. nächste Abbildung) lässt eine Modulation des PM10-Verlaufs erahnen, aber auch nicht mehr. Vielleicht noch interessanter ist der Umstand, dass die Heizgradzahlen ein Mass für die 'mittlere Kälte' - seit 2014 weniger zurückgegangen sind als die Anzahl wirklich 'kalter Tage', so wie beim PM10 die Mittelwerte weniger zurückgegangen sind als die Anzahl von Tagen mit $> 30 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Hier kann ein Zusammenhang vermutet werden.

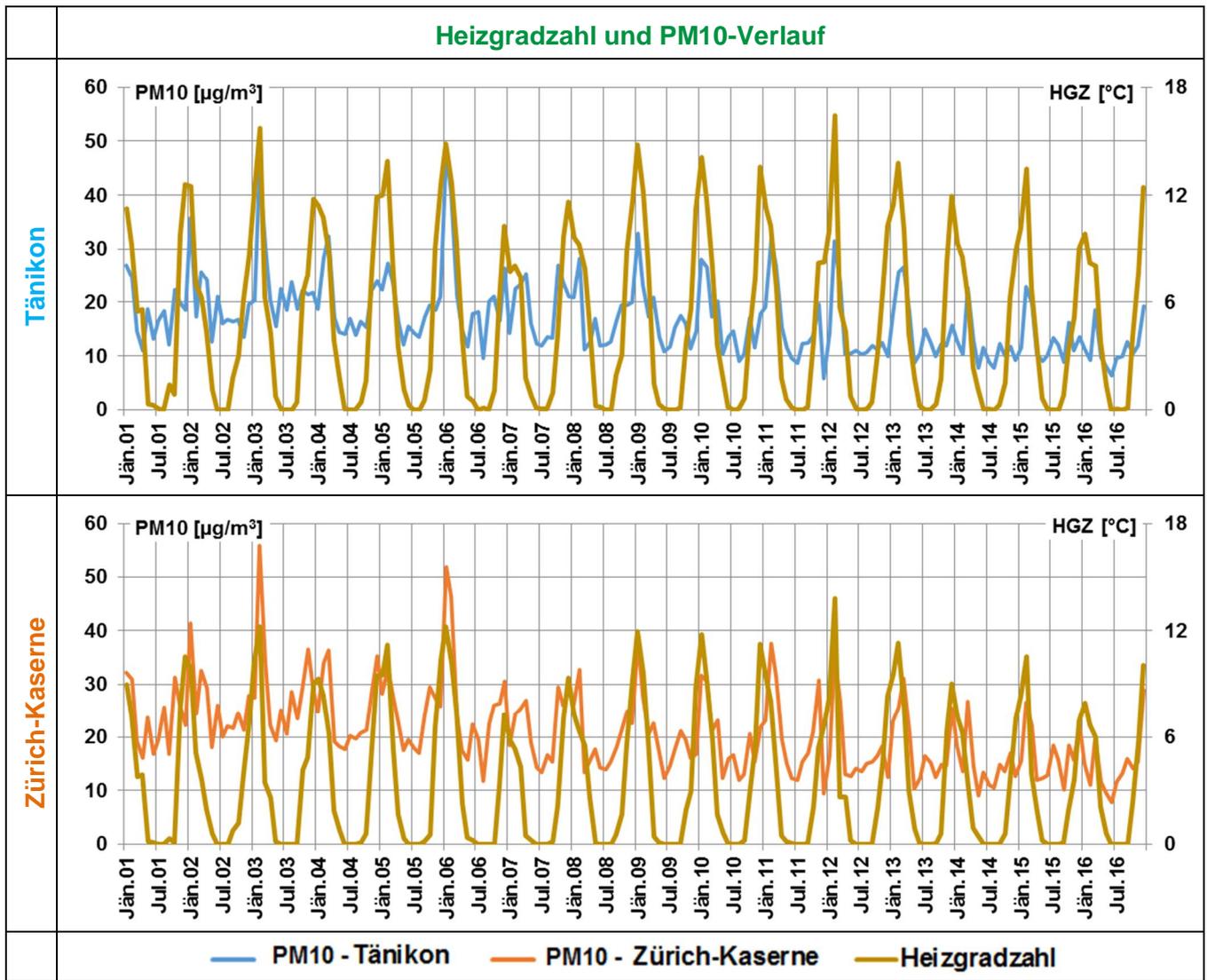


Abbildung 3.13: Monatsmittel der täglichen Heizgradzahl (HGZ) und von PM10 bei Tänikon und Zürich-Kaserne, 2001-2016.

3.4. Windgeschwindigkeit und PM10-Immissionen

Die Windgeschwindigkeit hat bei Zürich-Kaserne und noch deutlicher bei Tänikon von 2001-2016 abgenommen. Die Anzahl Schwachwindtage (Tage mit mittlerer Windgeschwindigkeit < 0.6 m/s bei Tänikon [5.3% aller Tage] bzw. < 1.1 m/s bei Zürich-Kaserne [3.3% aller Tage]) hat im gleichen Zeitraum zugenommen. Dies ist doch überraschend. Da die beiden Stationen von Meteo-Schweiz betrieben werden, scheiden messtechnische Effekte wohl aus. Schwachwindtage sollten durchschnittlich einen Tag pro Monat ausmachen, wie in Zürich. Bei Tänikon wurde aus messtechnischen Gründen eine höhere Schwelle verwendet.

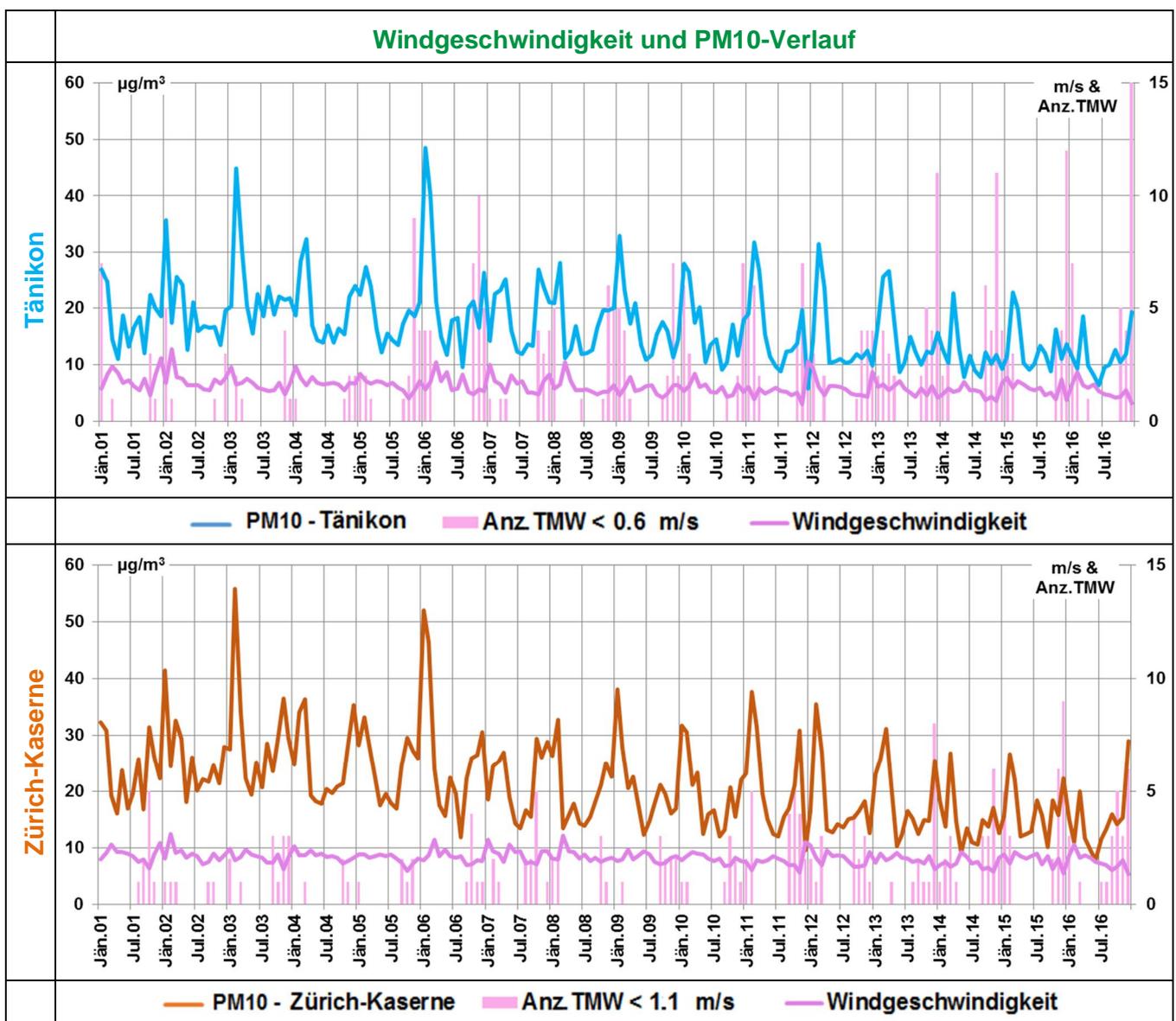


Abbildung 3.14: Monatsmittel der Windgeschwindigkeit und von PM10 sowie monatliche Anzahl Tagesmittelwerte < 0.6 bzw. <1.1 m/s bei Tänikon bzw. Zürich-Kaserne, 2001-2016.

Die Abnahme der Windgeschwindigkeit zeigt sich in allen Jahreszeiten:

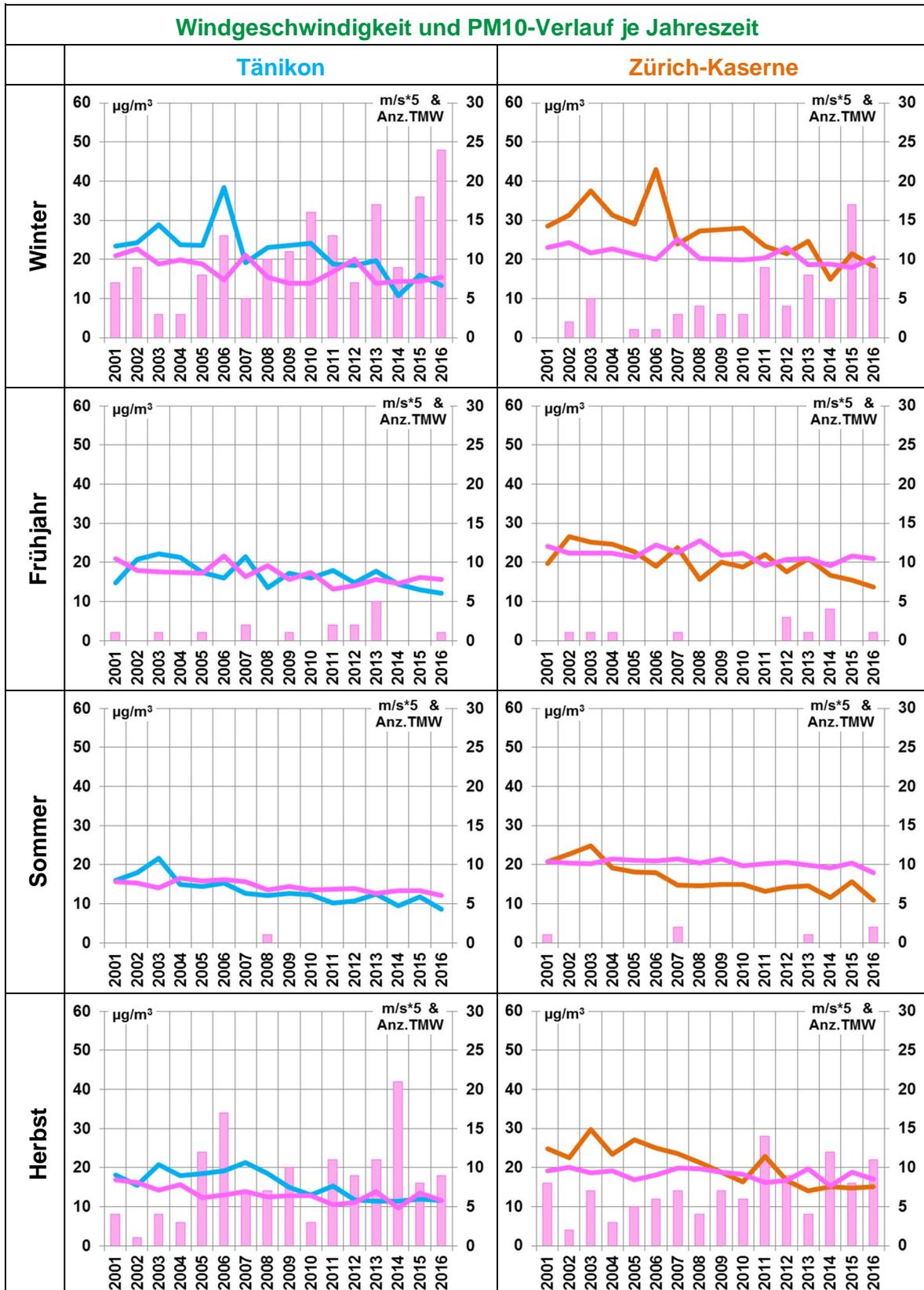


Abbildung 3.15 (letzte Seite): Saisonmittel der Windgeschwindigkeit (in Grafik * 5; violett) und von PM10 (blau bzw. Orange) sowie saisonale Anz. Tagesmittelwerte <0.6 bzw. <1.1 m/s (violette Säulen) bei Tänikon bzw. Zürich-Kaserne, 2001-2016.

Die Abnahme der Windgeschwindigkeit ist im Sommer am geringsten. Schwachwindtage treten vor allem im Herbst und Winter auf und sind von 2001-2016 zahlreicher geworden. Ein direkter Zusammenhang zwischen den Verläufen von PM10 und Windgeschwindigkeit ist visuell nicht zu erkennen, tendenziell jedoch zwischen der Anzahl Schwachwindtage und PM10 im Herbst und Winter. Grundsätzlich aber . und das wird auch die Regression in Kap. 5 zeigen . bedeutet tiefere Windgeschwindigkeit höhere PM10-Immission. Diese meteorologische Einflussvariable hat also zu einer Erhöhung der PM10-Immissionen im Laufe der letzten 16 Jahre geführt, wobei die immissionsvermindernden Einflüsse insgesamt natürlich bedeutender waren.

In der nächsten Abbildung werden die monatlichen Abweichungen der Windgeschwindigkeit von der monatlichen Norm gezeigt, was hier der Mittelwert je Monat von 2001-2016 ist. Positive Abweichungen werden rot gezeichnet, negative blau.

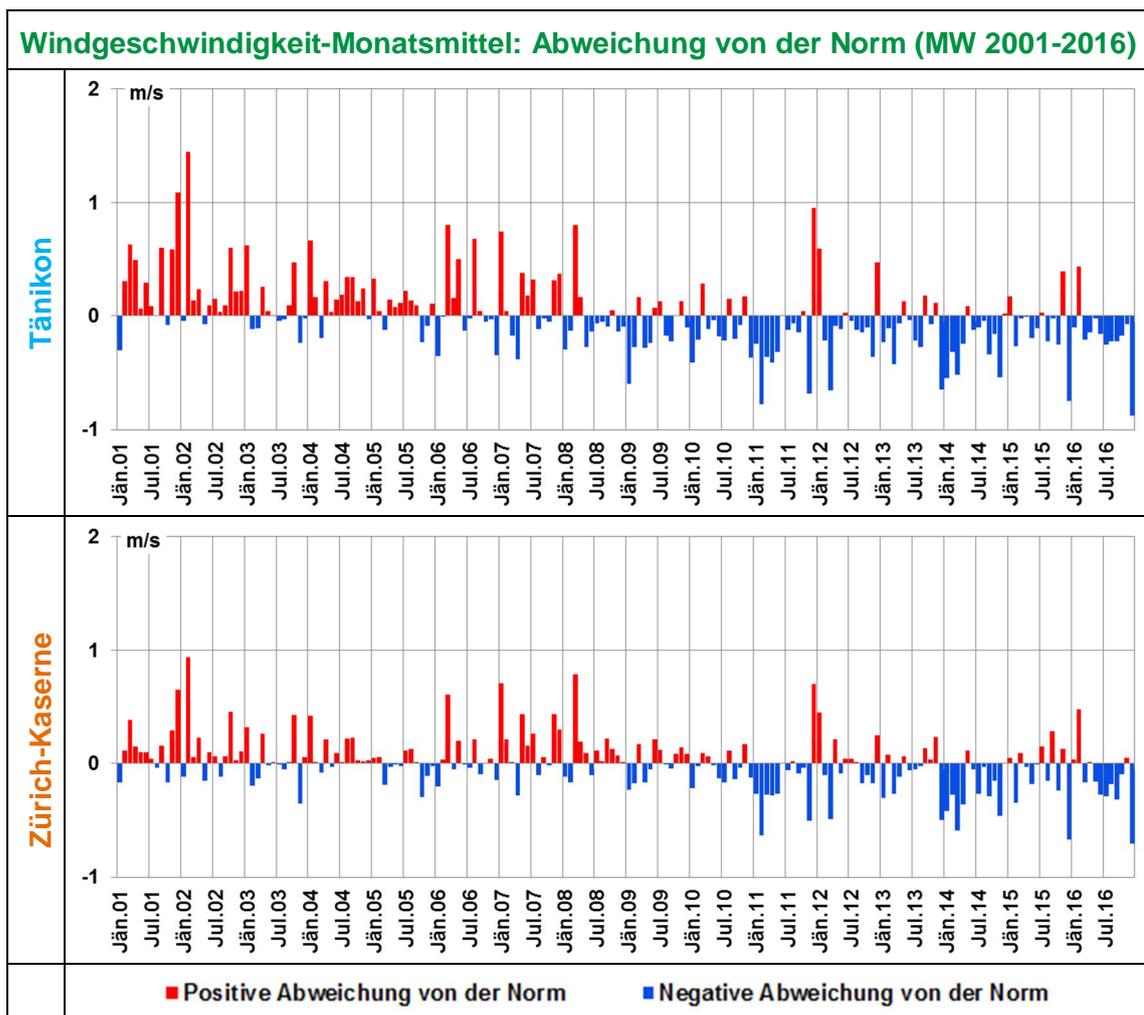


Abbildung 3.16: Abweichung der Windgeschwindigkeit-Monatsmittel von der Norm (Mittelwerte je Monat 2001-2016), Tänikon und Zürich-Kaserne, 2001-2016.

Die gleichen Daten wie oben, aber aufgeteilt in die 4 Jahreszeiten, ergeben ähnliche Bilder: In jeder Jahreszeit hat die Windgeschwindigkeit abgenommen.

In allen Jahreszeiten und für das Gesamtjahr hat die Anzahl windschwacher Monate vor allem von 2008-2011 zugenommen, davor und danach verblieb diese Anzahl etwa auf stabilem Niveau. War das der Grund für die Plafonierung der PM10-Immissionen von 2008-2011? Die Anzahl der zu windstarken Monate hat sich entsprechend gegenläufig verhalten.

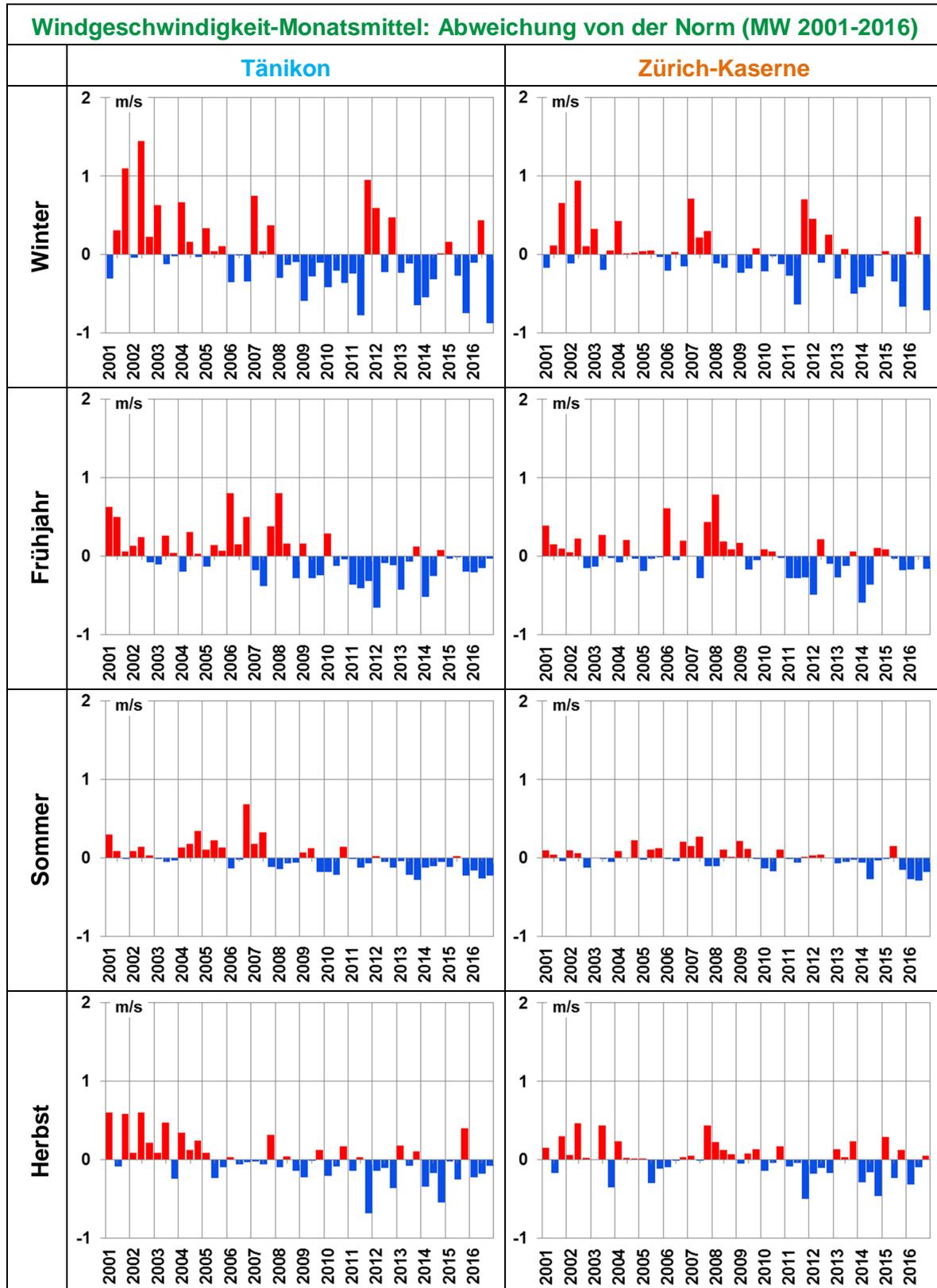


Abbildung 3.17 (letzte Seite): Abweichung der Windgeschwindigkeit-Monatsmittel von der Norm (Mittelwerte je Monat 2001-2016), Tänikon und Zürich-Kaserne, 2001-2016, aufgeteilt in die vier Jahreszeiten.

3.5. Windrichtung und PM10-Immissionen

In diesem Abschnitt wird untersucht, ob sich die Verteilung der Windrichtungen (Windrose) zwischen 2001 und 2016 geändert hat und auch, ob die PM10-Abnahme allfällig unterschiedlich je nach Windrichtung erfolgt ist.

Zunächst werden die Windrosen und mittleren PM10-Konzentrationen je Windrichtung für Tänikon und Zürich-Kaserne betrachtet, wobei immer vier Jahre zusammengefasst werden.

Die Windrosen bleiben bei beiden Standorten über den gesamten Zeitraum erhalten; lediglich der bei Zürich-Kaserne von 2013-2016 weniger häufig gewordene Wind aus NNW fällt auf. Das kann mit Bauten zusammenhängen und sollte keinen grossen Einfluss auf Pm10 gehabt haben.

Bei den Konzentrationswindrosen ist die PM10-Abnahme deutlich zu erkennen, die grundsätzlich alle Windrichtungssektoren betrifft. Ob es dennoch Unterschiede in der PM10-Abnahme je Windrichtung gegeben hat, wird im Folgenden untersucht.

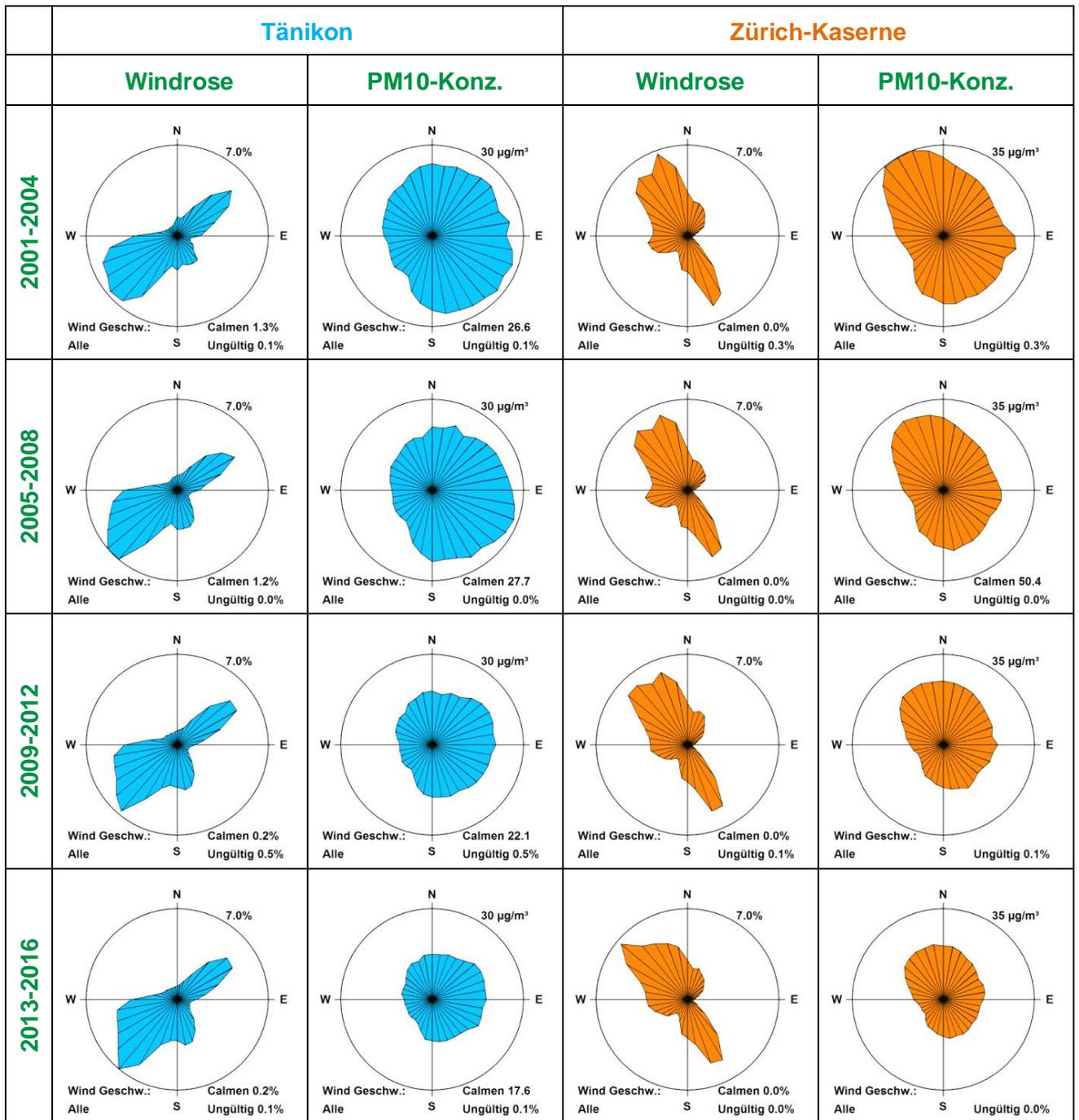


Abbildung 3.18: Windrosen und PM10-Konzentrationswindrosen für Tänikon und Zürich-Kaserne, 2001-2016, jeweils 4 Jahre zusammengefasst.

Die Befrachtung des Windes mit PM10 kann durch den mit der Häufigkeit gewichteten Massenfluss $c \cdot v$ (Konzentration mal Windgeschwindigkeit) ausgedrückt werden. Dies ist ein Mass für die Menge PM10, die am Standort pro Sekunde aus jedem der vier zusammengefassten Windsektoren 'vorbeigeschickt' wurde.

An beiden Standorten hat sich der relative Massenfluss (Summe aller Flüsse je Tagesstunde = 100%) von 2001-2004 bis 2013-2016 wenig geändert. Bei einer Änderung im Quellenfeld (Kamin, Strasse ö) könnte das anders sein.

Der absolute Massenfluss zeigt natürlich die PM10-Abnahme und darüber hinaus etwa konstante Verhältnisse zwischen den vier Windsektoren (da die relativen Massenflüsse sich nur wenig geändert haben). Eine Änderung im gesamten Tagesgang fällt allerdings auf: An b e i d e n Standorten zeigt sich von 2001-2004 eine sekundäre Spitze morgens um 1 Uhr, die von 2013-2016 fehlt. Könnte dies ein messtechnischer Effekt sein??

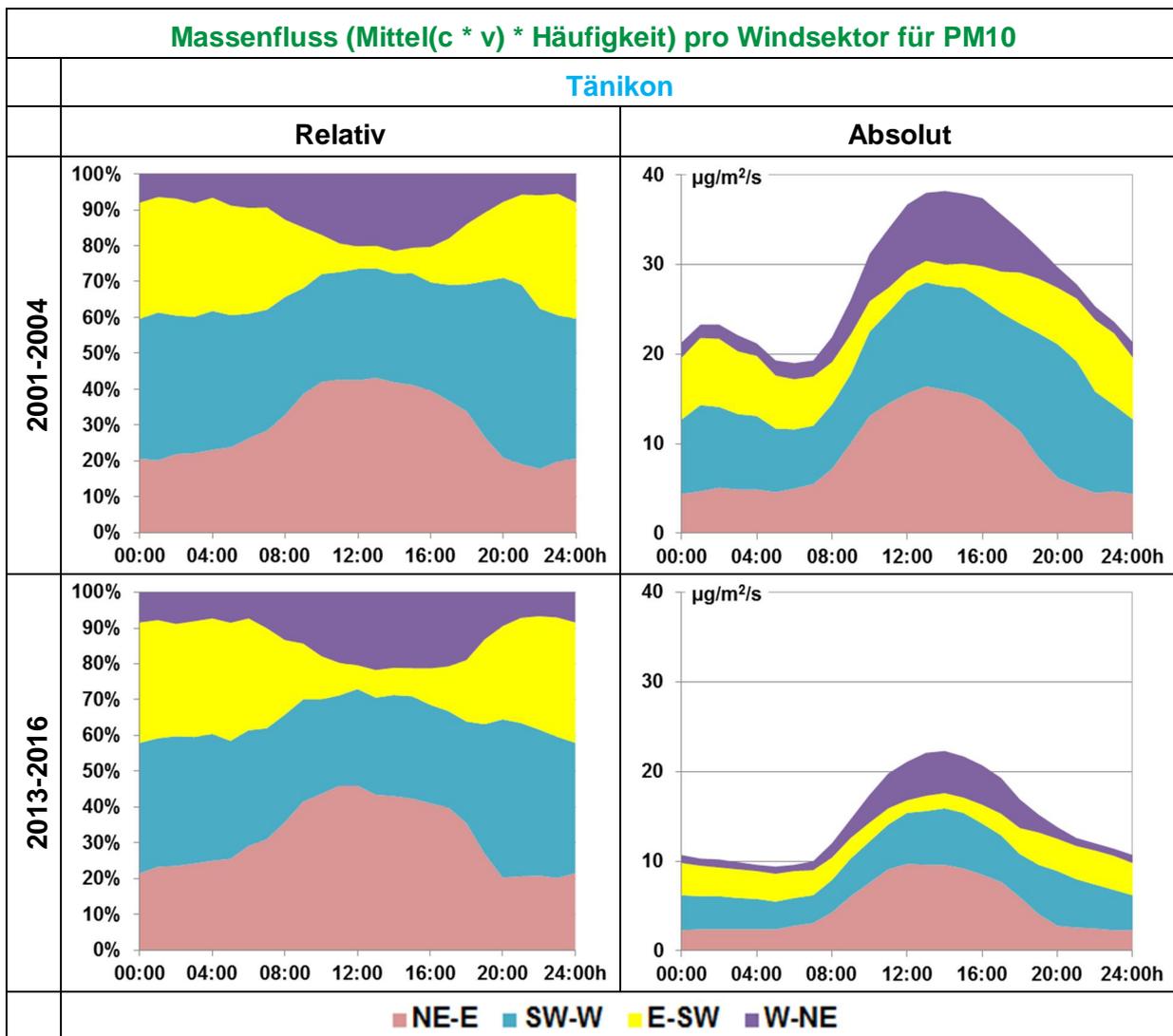


Abbildung 3.19: Massenfluss (Mittel(c * v) * Häufigkeit) pro Windsektor für PM10 (µg/m²/s) für 2001-2004 und 2013-2016 bei Tänikon. c: PM10-Konzentration; v: Windgeschwindigkeit (Halbstundenwerte).

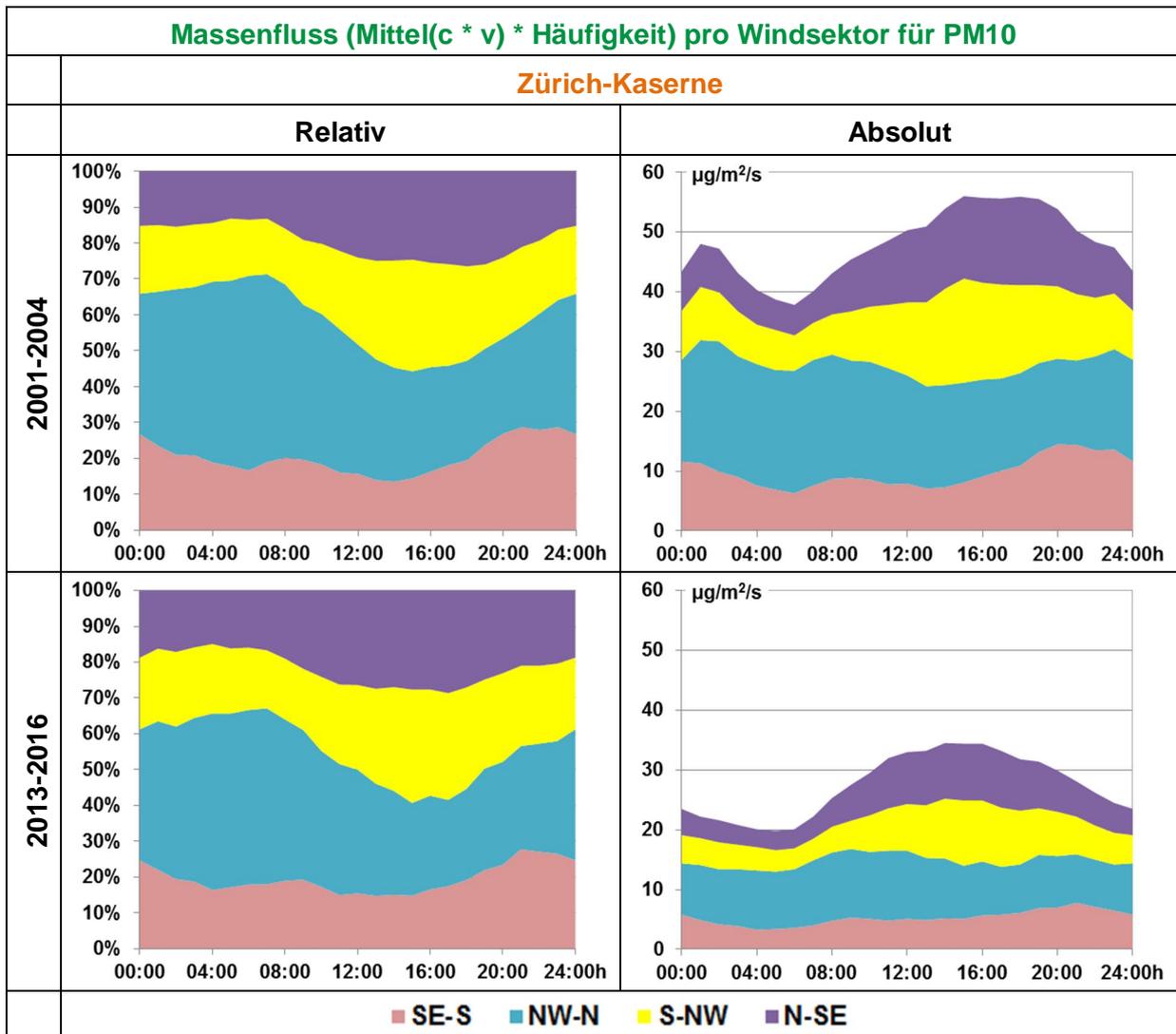


Abbildung 3.20: Massenfluss (Mittel($c \cdot v$) * Häufigkeit) pro Windsektor für PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^2/\text{s}$) für 2001-2004 und 2013-2016 bei Zürich-Kaserne. c: PM10-Konzentration; v: Windgeschwindigkeit (Halbstundenwerte).

Im Weiteren wurden die Trends der Windrichtungshäufigkeiten und der PM10-Konzentrationen je Windrichtung über alle 16 Jahre von 2001-2016 untersucht. Es wurden Sektorbreiten von 22.5° verwendet. Bei den Windrichtungshäufigkeiten ergaben sich jährliche Änderungen bis zu $\pm 0.2\%$, also bis zu 3 Prozentpunkten für einzelne Sektoren im gesamten Zeitraum. Es kann nicht beurteilt werden, ob dies viel oder wenig ist, auch weil Vergleichsmöglichkeiten fehlen.

Bei den mittleren PM10-Konzentrationen je Sektor stellten sich natürlich deutlich negative Trends ein. Wegen der sekundären Spitze unklarer Herkunft am frühen Morgen wurde hier nur die Tageszeit von 6-24 Uhr betrachtet. Die Frage war, ob diese Trends im Wesentlichen isotrop sind. Und dies ist eindeutig nicht der Fall.

Der Kreismittelpunkt liegt für beide Standorte deutlich im Süden des farbigen Polygons, was heisst, dass die PM10-Abnahme bei südlichen Winden (Sektoren SE-SW) wesentlich stärker ausfiel als bei den anderen Sektoren. Bei nordöstlichen Winden war die PM10-Abnahme bei beiden Standorten am geringsten. Auch richtungsabhängige Windgeschwindigkeiten und ihre allfällig unterschiedlichen Änderungen könnten hierbei eine Rolle spielen. Weitere Erklärungen konnten im Rahmen dieser Studie nicht gesucht werden.

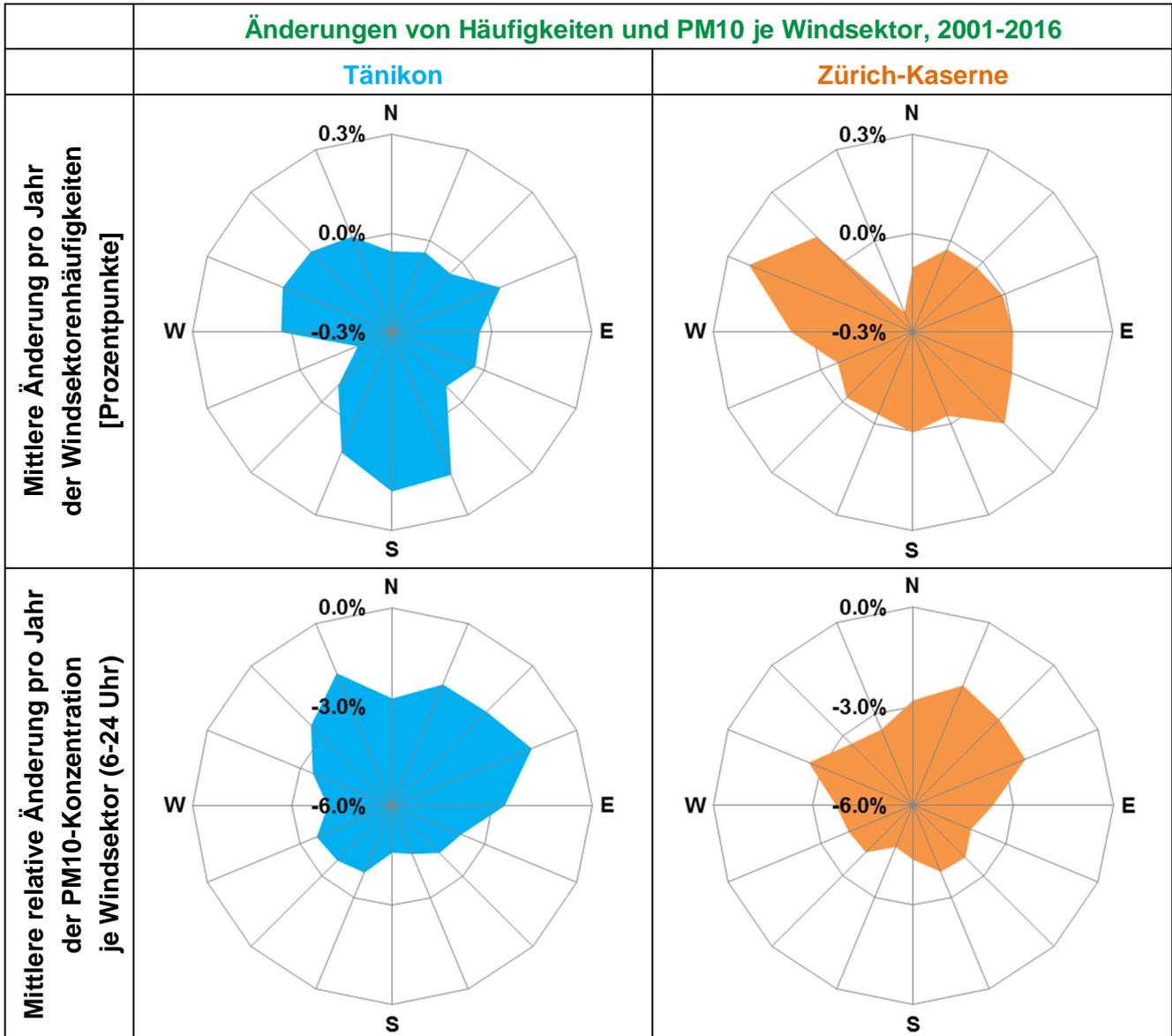


Abbildung 3.21: Mittlere Änderung pro Jahr der Windsektorenhäufigkeiten [Prozentpunkte] und mittlere relative Änderung pro Jahr der PM10-Konzentration je Windsektor (6-24 Uhr) bei Tänikon und Zürich-Kaserne, 2001-2016.

4. Einfluss von Wetterlagen-Klassen auf die PM10-Immissionen

Bestimmte Wetterlagen begünstigen die Entstehung von erhöhten PM10-Belastungen. Da sich die sogenannte CAP-Klassifizierung als Wetterlagen-Klassifizierung gut im Zusammenhang mit Inversionsauftreten bewährt hat und Inversionen auch mit erhöhten PM10-Konzentrationen einhergehen, wurden die PM10-Konzentrationen bzgl. dieser Klassifizierung untersucht.

CAP ("Cluster Analysis of Principal Component"): Die Wetterlagenklassen basieren auf den Analyse- und Vorhersagedaten des ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) und werden automatisch mit Hilfe der Klassifikationssoftware "cost733class" bestimmt, die im Rahmen der Cost Aktion 733 "Harmonisation and Applications of Weather Type Classifications for European Regions" entwickelt wurde.

Tabelle 4.1: Zusammenfassung der CAP-Klassen:

CAP	Beschreibung
1	Indifferente Nordostlage
2	Zyklonale West-Südwestlage, strömungsschwach
3	Westlage über Nordeuropa
4	Indifferente Ostlage
5	Hoch über den Alpen
6	Zyklonale Nordlage
7	Zyklonale West-Südwestlage
8	Hoch über Mitteleuropa
9	Zyklonale Westlage über Südeuropa

Die 9 Klassen weisen Jahreshäufigkeiten von je 4-20% auf. Auch diese Häufigkeiten haben einen Trend, wie die folgende Tabelle ausweist.

Tabelle 4.2: Häufigkeit der CAP-Klassen (Jahresmittel) und ihr Trend 2001-2016.

CAP-Klasse 2001-2016	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Häufigkeit	20.0%	15.0%	13.1%	13.4%	11.5%	11.1%	7.2%	4.8%	3.8%
Trend (Prozentpunkte in 15 Jahren)	4.6%	-1.0%	-0.8%	-0.2%	-1.0%	-1.9%	-0.4%	-0.3%	0.9%

Die Summe aller Trends in Prozentpunkten ist null. Die Klassen 2, 5, 6 haben die deutlichsten Abnahmen zu verzeichnen, nur die Klassen 1 und 9 weisen Zunahmen auf.

Wird nur der Winter (Dezember-Februar) betrachtet, so werden die Änderungen in Prozentpunkten grösser. Die Klassen 8 und 5, welche die höchsten PM10-Immissionen aufweisen (s. später), sind dann deutlich am häufigsten, weisen aber zusammen mit der Klasse 7 die grösste Abnahme der Häufigkeit in Prozentpunkten auf.

Tabelle 4.3: Häufigkeit der CAP-Klassen und ihr Trend 2001-2016, Jahresmittel für den Winter (Januar, Februar und Dezember).

CAP-Klasse 2001-2016	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Häufigkeit	8.3%	9.3%	11.6%	10.0%	20.1%	10.2%	8.8%	14.5%	7.1%
Trend (Prozentpunkte in 15 Jahren)	4.8%	2.0%	3.8%	-1.6%	-5.8%	-1.9%	-4.2%	-2.6%	5.5%

Die (relativ) kalten Hochdruckgebiete (Klassen 5 und 8) sind im Winter in diesen 16 Jahren um etwa 8 Tage seltener geworden. Dieser Trend hat sich durch den Dezember 2016 etwas verflacht.

Durch die abnehmende Häufigkeit der beiden Klassen 5 und 8 mit den höchsten PM10-Immissionen allein kann nicht auf eine witterungsbedingte PM10-Abnahme insgesamt geschlossen werden. Verknüpft man den Trend je CAP-Klasse mit seiner mittleren PM10-Immission, so resultiert daraus von 2001-2016 für Tänikon und Zürich-Kaserne lediglich eine PM10-Abnahme um etwa $-0.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ im Jahresmittel.

Da es aber andererseits in jeder einzelnen CAP-Klasse einen starken Trend zu abnehmender PM10-Konzentration gibt (mit Ausnahme von Klasse 6 eine Abnahme von 3-5 %/Jahr), überwiegt die emissionsseitige Ursache (inkl. sekundäre Partikelbildung) bei der PM10-Abnahme bei weitem.

Die nächsten Tabellen zeigen, dass in den Klassen 5 und 8 die mittlere PM10-Immission mit Abstand am höchsten war. Hingegen wies die Klasse 9 (zyklonale Westlage über Südeuropa) die geringsten PM10-Immissionen auf.

Tabelle 4.4: PM10-Episodenmittelwerte und relativer Trend [%/Jahr] je CAP-Klasse bei Tänikon, 2001-2016, ganzes Jahr und Winter (Januar, Februar und Dezember).

PM10-TAE 2001-2016 ganzes Jahr	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Mittelwerte [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	15.0	14.1	17.2	18.3	24.1	13.8	11.8	29.4	11.5
Relativer Trend (%/y)	-2.6%	-4.0%	-5.0%	-3.5%	-4.0%	-1.7%	-3.4%	-4.3%	-4.3%

PM10-TAE 2001-2016 Winter	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Mittelwerte [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	21.6	14.3	18.5	25.7	26.2	17.5	12.9	30.3	11.2
Relativer Trend (%/y)	-3.5%	-2.9%	-6.4%	-2.9%	-5.3%	0.0%	-0.7%	-5.4%	-3.6%

Tabelle 4.5: PM10-Episodenmittelwerte und relativer Trend [%/Jahr] je CAP-Klasse bei Zürich-Kaserne, 2001-2016, ganzes Jahr und Winter (Januar, Februar und Dezember)..

PM10-ZUE 2001-2016 Ganzes Jahr	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Mittelwerte [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	17.9	18.2	22.7	21.6	30.4	16.4	15.4	35.5	14.5
Relativer Trend (%/y)	-3.0%	-4.3%	-5.2%	-3.5%	-3.7%	-2.3%	-3.7%	-3.7%	-4.9%

PM10-ZUE 2001-2016 Winter	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Mittelwerte [µg/m³]	24.7	18.8	24.9	29.8	33.5	19.5	15.9	36.9	14.0
Relativer Trend (%/y)	-3.6%	-3.7%	-6.8%	-3.1%	-4.3%	-0.5%	-0.8%	-4.8%	-4.2%

Die prozentuale Abnahme der PM10-Konzentration streut im Winter je CAP-Klasse mehr als übers ganze Jahr. Die grössten Abnahmen zeigen die Klassen 3, 5 und 8, die geringsten die Klasse 6 (zyklonale Nordlage). Bei Zürich-Kaserne sind die PM10-Abnahmen gleichmässiger über die CAP-Klassen verteilt.

Die folgende Abbildung zu PM10-Immissionen und CAP-Klassen zeigt folgendes:

- Die PM10-Verteilung nach CAP-Klasse zeigt bei Tänikon und Zürich-Kaserne trotz des sehr unterschiedlichen Umfeldes die gleiche Form.
- Die Spitzenjahre 2003 und 2006 waren in praktisch allen CAP-Klassen Spitze, nicht nur in den Hochbelastungsphasen. (Warum?)
- Die Reihenfolge innerhalb der letzten Jahre 2013, 2014 und 2015 ist je nach CAP-Klasse unterschiedlich. Die höhere PM10-Konzentration von 2013 im Vergleich zu 2014 und 2015 kommt durch die Klassen 2, 4 und vor allem 6 zustande.

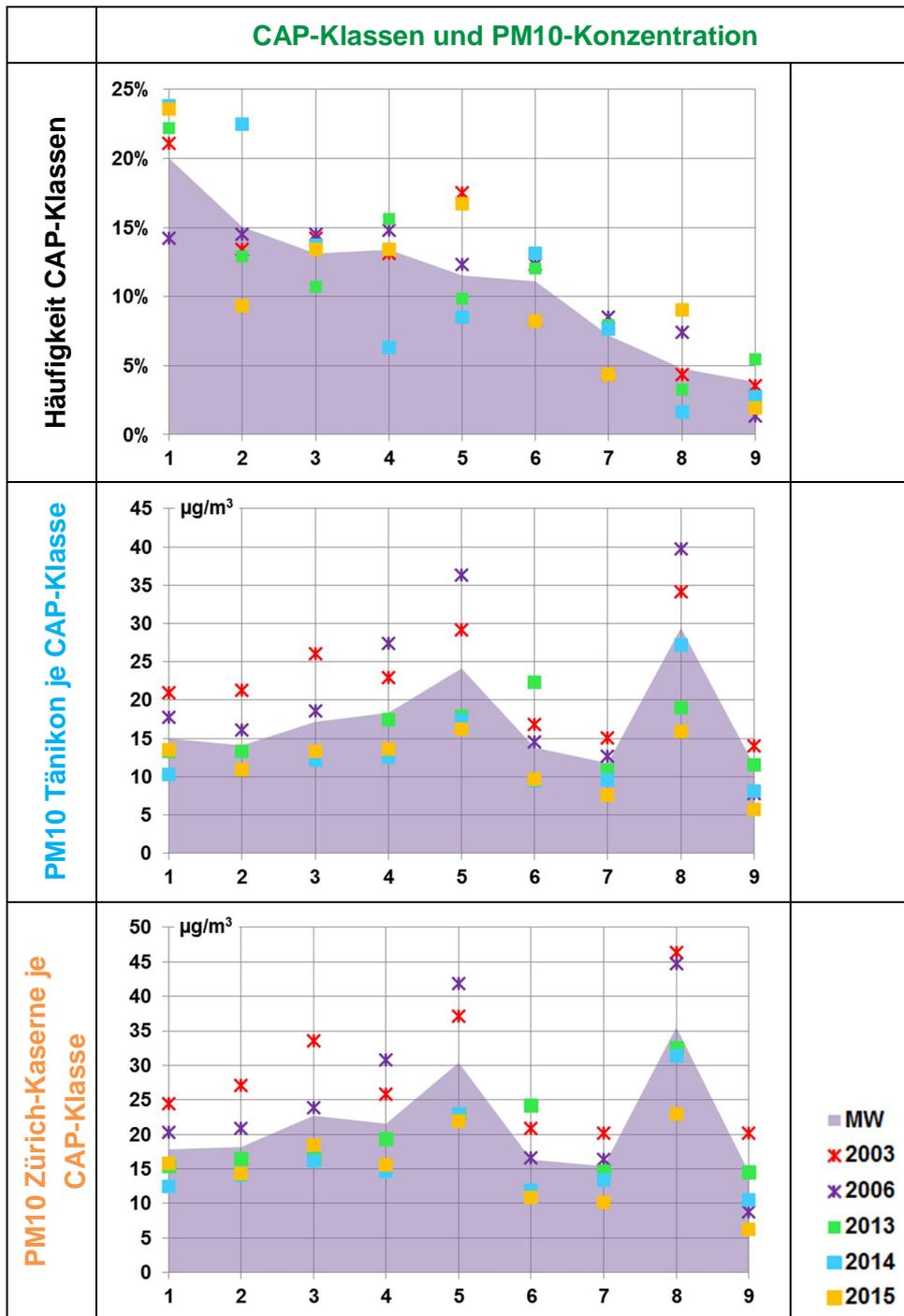


Abbildung 4.1: Häufigkeit der CAP-Klassen und PM10-Immissionen je CAP-Klasse bei Tänikon und Zürich-Kaserne, 2001-2016. MW: Episodenmittel 2001-2016; 2003, 2006, 2013, 2014, 2015: Jahresmittelwerte.

5. Beschreibung des PM10-Verlaufs an den Stationen Tänikon und Zürich-Kaserne mit linearer Regression

Das Verständnis der Vergangenheit ist eine Voraussetzung für die Abschätzung möglicher zukünftiger Entwicklungen. Für die Luftverschmutzung bedeutet dies, ihren Verlauf zumindest weitgehend auf Einflussvariable zurückführen zu können, auch um z.B. die reale Wirkung umgesetzter Maßnahmen beurteilen zu können. Diese Einflussvariable betreffen einerseits die Emissionen, welche im Falle der Partikel ein weites Feld abdecken, und andererseits meteorologische Einflüsse, welche über Ausbreitung und Umwandlung der Schadstoffe bestimmen. Mittels linearer Regression sind die Verläufe der PM10-Konzentrationen auf Basis von Monatswerten für Tänikon und Zürich-Kaserne für den Zeitraum Januar 2001 . Dezember 2016 auf solche Einflussvariable rückgeführt worden.

Die linearen Regressionen inkl. Statistische Bewertung wurden mit dem Softwaremodul Sigmaplot von SYSTAT durchgeführt (Systat Software, Inc., San Jose California USA, www.sigmaplot.com).

5.1. Wahl der Einflussvariablen für die lineare Regression

Grundsätzlich hatte man sich bei der Wahl von Einflussparametern an Grössen zu halten, welche für die 16 Jahre in ähnlicher Qualität verfügbar waren.

Emissionen

Die Emissionen sind nicht in einer zeitlichen Auflösung von Monaten bekannt, jedenfalls nicht für 16 Jahre und nicht für das Umfeld der beiden Stationen. So wurde die generelle Emissionsentwicklung als zeitlich linear angesetzt, ist also im Term 'Zeit' enthalten.

Meteorologische Parameter

Aus Messungen sind bekannt die Temperatur und die Windgeschwindigkeit auf Stationshöhe (indirekte Maße für Thermik und andere Verdünnungsprozesse, aber auch für Heizungsemissionen), und das Inversionsauftreten im Raum Zürich (Temperaturprofil Kloten . Fluntern [Meteo-Schweiz] . Lägern . Hörnli). Tänikon ist von diesen Inversionen nur teilweise betroffen, vor allem was Bodeninversionen betrifft (Inversionen in der untersten Messschicht). Diese Inversionsgrößen

wurden auf Basis von Stundenwerten bestimmt und zu Monatsmittelwerten zusammengefasst.

Witterungsklassen

Jeder Tag wird von MeteoSchweiz einer der 9 CAP-Klassen zugeordnet (s. Kap. 4). Daraus wurde für jeden Monat die prozentuale Verteilung der CAP-Klassen bestimmt.

Es sind multiple lineare Regressionen für PM10 auf der Basis der Monatswerte für Januar 2001 . Dezember 2016 für Tänikon und Zürich-Kaserne durchgeführt worden, also für 192 Monate. Die untersuchten PM10-Parameter (abhängige Variable) waren:

- Monatsmittel
- 90%-Wert der Tagesmittel je Monat
- Anzahl Tage > 30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ PM10 je Monat.

Folgende Parameter wurden auf ihre Eignung als unabhängige Variable zur Beschreibung der PM10-Kennzahlen untersucht. Bei den Tests waren die Vermeidung von Kollinearität und Irrtumswahrscheinlichkeiten der einzelnen Parameter von $p < 0.05$ die entscheidenden Kriterien.

Tabelle 5.1: Auflistung der auf ihre Eignung als unabhängige Variable für die PM10-Kennzahlen untersuchten Parameter:

Temperatur	Windgeschwindigkeit
Anzahl Tagesmittelwerte <0 °C	Anzahl Tagesmittelwerte <0.6 bzw. 1 m/s
Anz. Tagesmittelwerte <-5 bzw. -2 °C	Anzahl Tagesmittelwerte <1 bzw. 1.1 m/s
Abweichung der Temp. von der Norm	Abweichung der Windgeschw. von der Norm
Inversionshäufigkeit	Bodeninversionshäufigkeit
Anzahl Tage mit >50% Inv.häuf.	Häufigkeit von Bodeninversion allein
Anzahl Tage mit >75% Inv.häuf.	Anzahl Tage mit persistenter Inversion (mindestens 2 Vortage mit >75% Inversion)
Abweichung der Inv.häuf. von der Norm	Zeit
Inversionsstärke	Die 12 Monate
Die 9 CAP-Klassen	

Als unabhängige Variable hatten sich in umfangreichen Versuchen durchgesetzt:

- **Anz<0°:** Anzahl Tagesmittel < 0 °C (bei Tänikon bzw. bei Zürich-Kaserne);
- **WG Abw:** Abweichung der mittleren monatlichen Windgeschwindigkeit (bei Tänikon bzw. bei Zürich-Kaserne) von der Norm 2001-2016 (je Monat);
- **Temp Abw:** Abweichung der mittleren monatlichen Temperatur (nur bei Tänikon) von der Norm 2001-2016 (je Monat);

- **Inv. Ausmass:** Inversionsstärke → Mass der Temperaturumkehr (nur für Zürich-Kaserne).
- **Zeit:** Anzahl Monate seit Jahresbeginn 2001 (für Tänikon und Zürich-Kaserne);
- **Jahreszeitliche Einflüsse über Monatsparameter:** Es wurden je Station nur 3 Monate verwendet (Februar, März sowie Oktober (Zürich-Kaserne) bzw. Dezember (Tänikon)), die einen signifikanten jahreszeitlichen Einfluss auf PM10 hatten;
- **SPEZ:** An insgesamt 6 Monaten gab es markante Erhöhungen in den PM10-Konzentrationen, welche über die verfügbaren Parameter nicht abgebildet werden konnten, die also nicht mit Temperatur, Wind, Inversion oder Globalstrahlung in Verbindung gebracht werden konnten. Diese 6 Monate waren: Februar 2003, Januar und Februar 2006, Oktober und November 2007, Februar 2012. Für diese 6 Monate ist der Parameter SPEZ=1, sonst null.
- **CAP2:** Die strömungsschwache zyklonale West-Südwestlage führt zu speziell verminderten PM10-Werten.
- **CAP5:** Ein Hoch über den Alpen führt zu speziell erhöhten PM10-Werten.

Die Inversionsstärke war für Zürich-Kaserne hoch signifikant, für Tänikon aber nicht signifikant. Dies dürfte daran liegen, dass das Inversionsgeschehen bei Tänikon vor allem bodennah verschieden ist von der Region Zürich. Das System hat die Grösse 'Temp Abw' quasi als Ersatzgrösse dafür ausgesucht.

Durch die Hinzunahme der CAP-Klassen verbesserte sich das adjustierte Bestimmtheitsmass um 1-3%, und der Term 'Bodeninversionshäufigkeit' ist dann auch bei Zürich-Kaserne nicht mehr signifikant. Eine Regression nur mit Zeit und CAP-Klassen führt zu hoch signifikanten Abhängigkeiten für PM10, kann aber nur etwa 60% der Variabilität von PM10 erklären. Das bedeutet, dass der Verlauf der lokalen meteorologischen Grössen für die resultierende PM10-Konzentration wesentlich ist.

Die Ausgangsformel für die lineare Regression kann geschrieben werden als:

$$C = \alpha * \text{Anz} < 0^\circ + \beta * \text{WG Abw} + \gamma * \text{Temp Abw} + \delta * \text{Ausmass} + \varepsilon_2 * \text{CAP2} + \varepsilon_5 * \text{CAP5} + \phi * \text{Zeit} + \varphi_1 * \text{Monat}_1 + \dots + \varphi_n * \text{Monat}_n + \kappa * \text{SPEZ} + \eta$$

mit C = Immission;

$\alpha, \beta, \gamma, \delta, \varepsilon, \phi, \varphi, \kappa, \eta$: Regressionskoeffizienten.

5.2. Ergebnisse der linearen Regression

Die nachfolgende Grafik zeigt die mit dieser Regression berechneten und die gemessenen PM10-Monatsmittelwerte für Tänikon und für Zürich-Kaserne. Die Übereinstimmung ist zufriedenstellend. Das adjustierte Bestimmtheitsmaß beträgt bei beiden Standorten 0.85. Dies bedeutet, dass von der gesamten zeitlichen Variabilität der immerhin 192 PM10-Monatswerte 85% rein aus den in die Regression eingeführten Parametern erklärt werden können. Auf die restlichen 15% entfallen alle anderen Einflüsse auf die Immissionen, vor allem lokale Effekte stochastischer Quellen und weitere (auch lokale) meteorologische Effekte. Diese Bestimmtheitsmasse bei einer Felduntersuchung von PM10 können als hoch angesehen werden.

In den Grafiken werden jeweils auch die meteobereinigten Verläufe dargestellt. Das bedeutet, die zeitlichen Parameter verbleiben (auch 'Zeit', die ein Mass für die zeitlich lineare Veränderung von PM10 ist, welche nicht auf meteorologische Parameter zurückgeführt werden kann); für die meteorologischen Grössen wird die jeweilige (monatliche) Norm 2001-2016 eingesetzt; bei den Grössen mit 'Abw' (Abweichung von der Norm) ist dies stets null.

Die Regressionskurven folgen den Messkurven gut, auch in den Abweichungen vom meteobereinigten Verlauf. Einige Messspitzen werden von den Regressionsspitzen nicht voll erfasst, was typisch ist. Die meteobereinigten Kurven zeigen den generellen Verlauf gut, auch mit dem abnehmenden Trend. Diese Aussagen gelten für alle drei PM10-Kenngrössen.

Die übernächste Abbildung zeigt die **Jahresverläufe** der drei PM10-Kenngrössen. Die Jahre 2001 und 2002 waren in allen Kenngrössen deutlich unterdurchschnittlich. Die Jahresmittel entsprachen auch in den letzten Jahren etwa den Erwartungswerten (meteobereinigten Werten). Die 90%-Werte der monatlichen Tagesmittel waren seit 2014 leicht unterdurchschnittlich, die Anzahl Tage > 30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ PM10 jedoch deutlich unterdurchschnittlich, vor allem bei Zürich-Kaserne. Der Eindruck, dass es seit 2014 kaum mehr zu erhöhten PM10-tagesmitteln gekommen ist, stimmt also, und er ist zu einem guten Teil auf die günstigen meteorologischen Bedingungen zurückzuführen, der andere Teil (entsprechend der grünen Linie) auf die sich fortwährend reduzierenden PM10-Emissionen und sekundären Partikelbildungen.

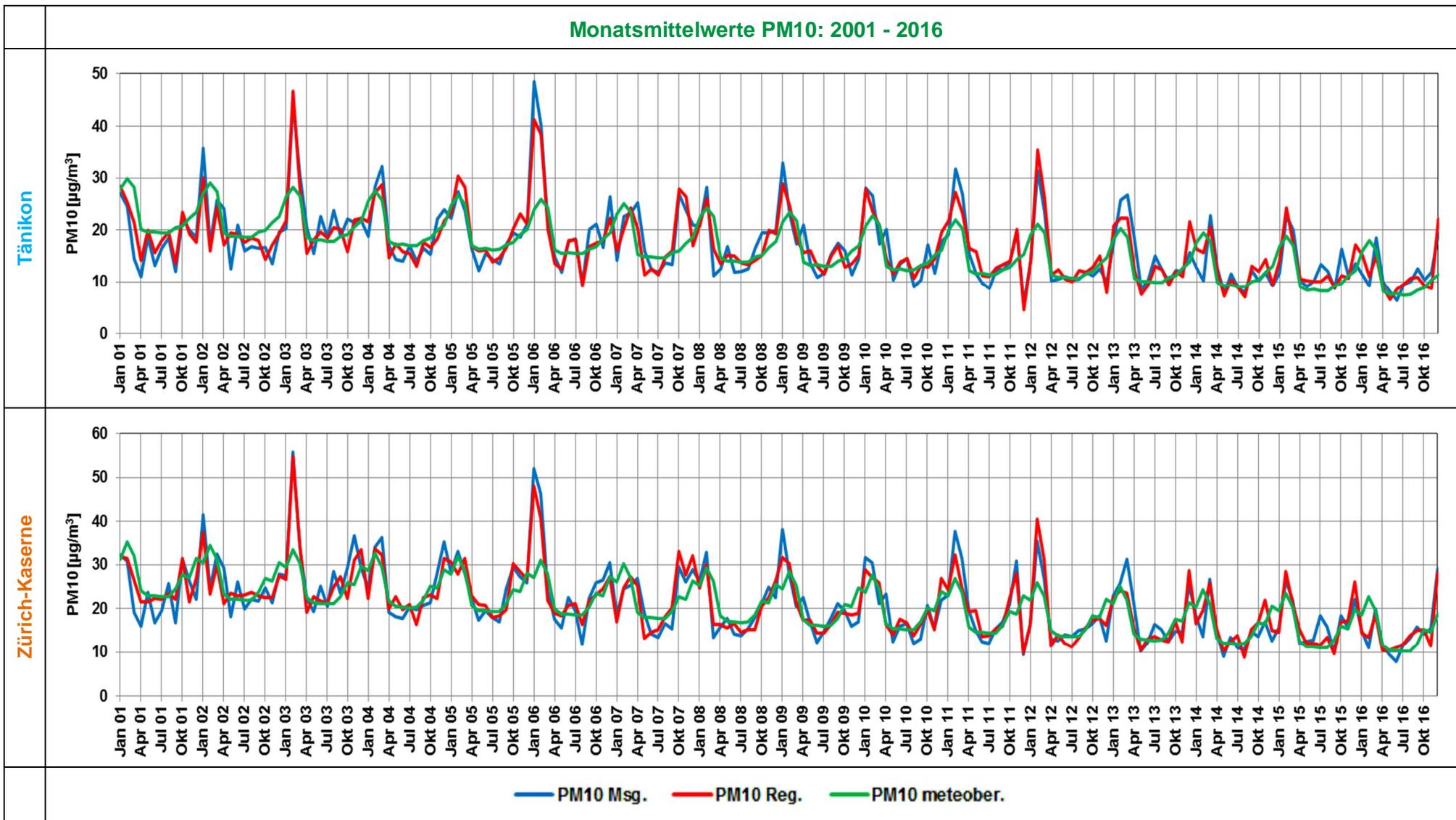


Abbildung 5.1: Monatsmittelwerte der gemessenen und mit linearer Regression berechneten PM10-Immissionen bei Tänikon und Zürich-Kaserne, 2001 - 2016. PM10 Reg.: PM10-Verlauf berechnet aus dem Regressionsmodell. PM10 meteor.: PM10-Verlauf bei meteorologischen Einflussgrößen gemäß der Norm 2001-2016.

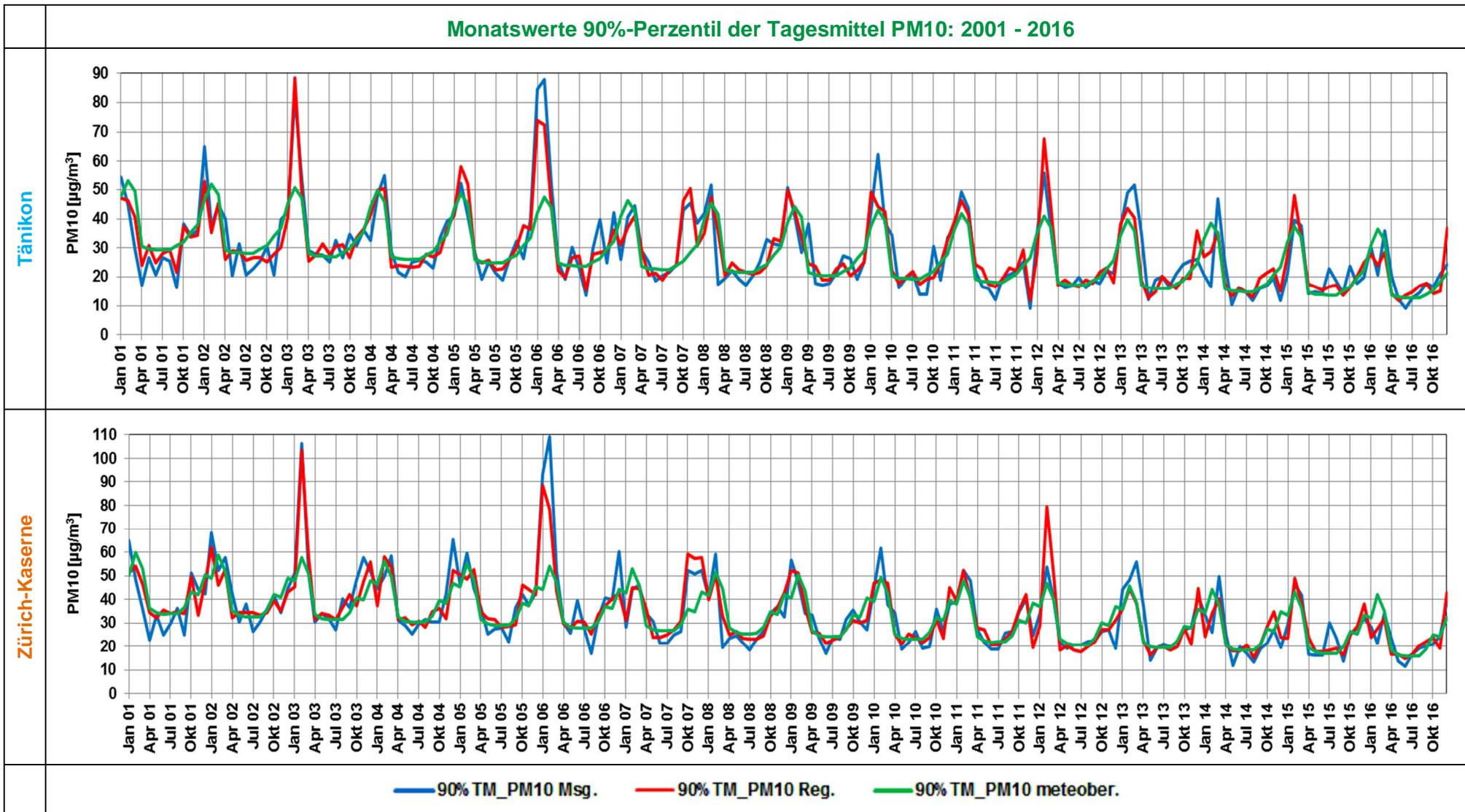


Abbildung 5.2: Monatswerte der gemessenen und mit linearer Regression berechneten 90%-Werte der PM10-Tagesmittel bei Tänikon und Zürich-Kaserne, 2001 - 2016. Reg.: 90%-Werte berechnet aus dem Regressionsmodell. Meteober.: 90%-Werte bei meteorologischen Einflussgrößen gemäß der Norm 2001-2016.

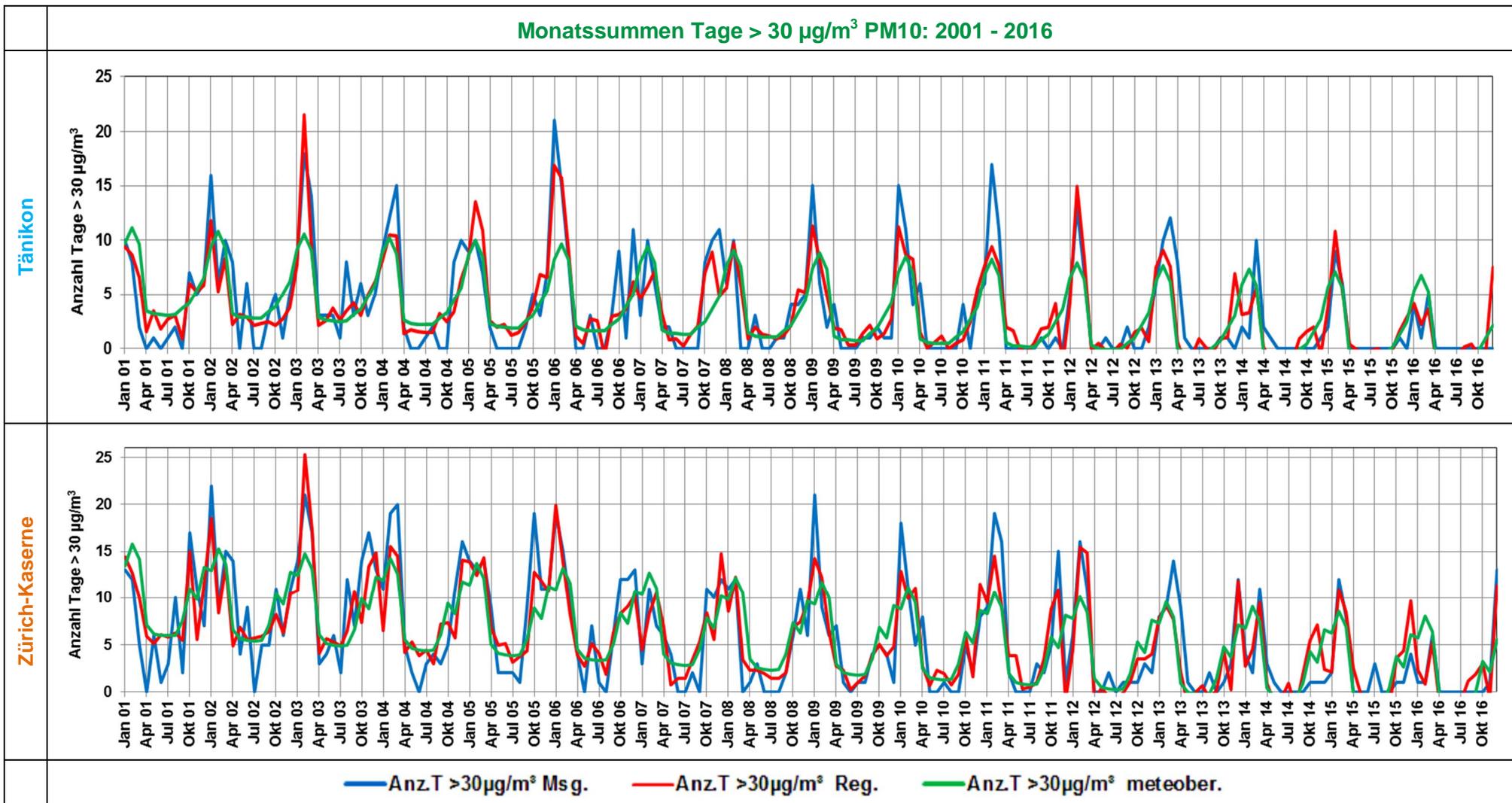


Abbildung 5.3: Monatssummen der gemessenen und mit linearer Regression berechneten Anzahl Tage mit im Mittel > 30 µg/m³ PM10 bei Tänikon und Zürich-Kaserne, 2001-2016. Reg.: Anzahl Tage > 30 µg/m³ berechnet aus dem Regressionsmodell. Meteober.: Anzahl Tage > 30 µg/m³ bei meteorologischen Einflussgrößen gemäß der Norm 2001-2016.

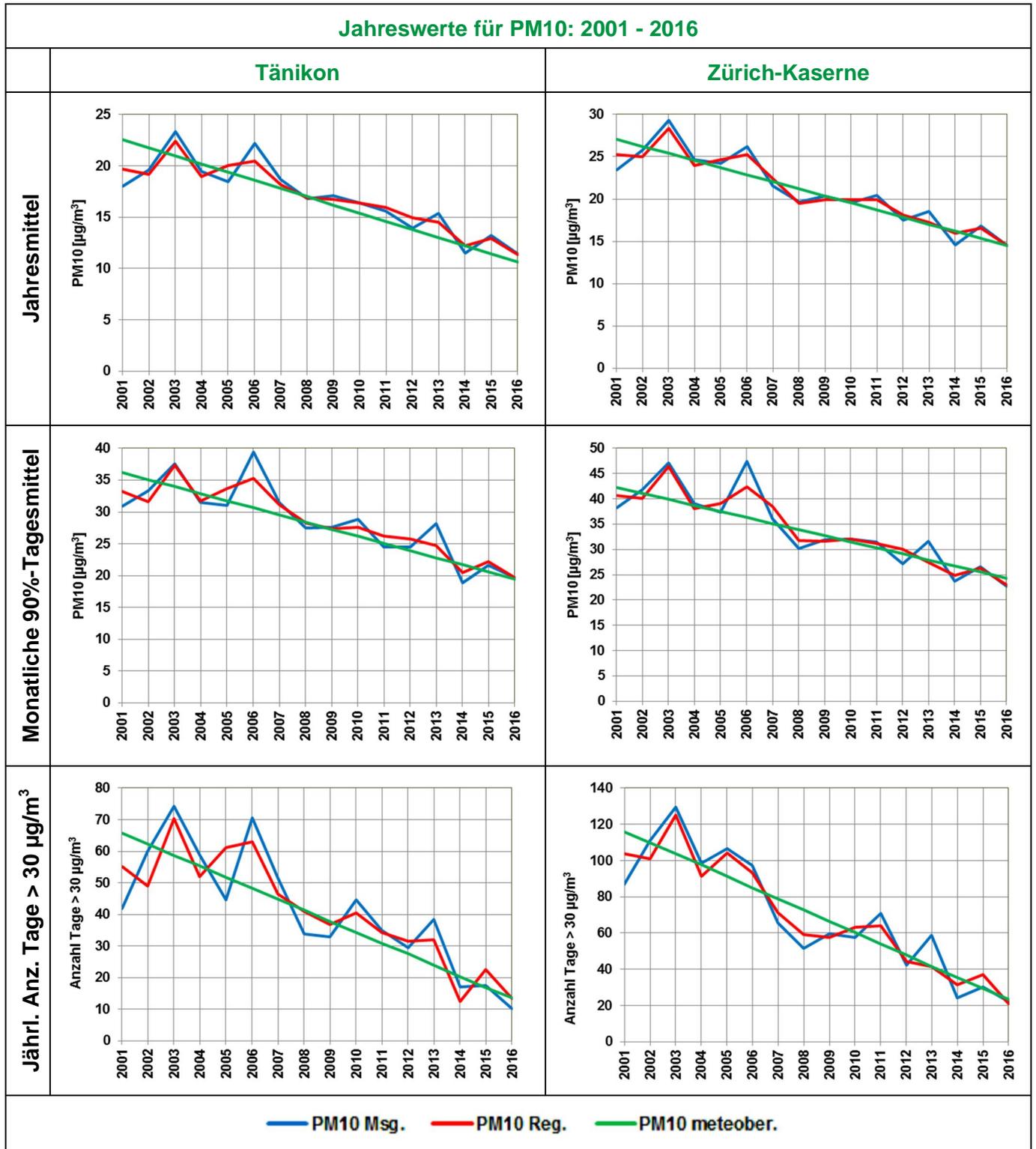


Abbildung 5.4: Jahreswerte der gemessenen und berechneten Kenngrößen von PM10 bei Tänikon und Zürich-Kaserne, 2001-2016. PM10 Reg.: PM10-Kenngrößen berechnet aus dem Regressionsmodell. PM10 meteober.: PM10-Kenngrößen bei meteorologischen Einflussgrößen gemäß der Norm (Mittelwerte je Monat 2001-2016).

Die meteobereinigten Jahresmittel liegen zwingend auf einer Geraden, da alle Abweichungen meteorologischer Parameter von der Norm dann null sind, die meteorologischen Parameter sich also je Monat jedes Jahr wiederholen, der Parameter SPEZ ebenfalls null ist, die Monatsparameter sich ebenfalls jedes Jahr wiederholen und eben nur der Zeitparameter sich ändert, der die generelle Emissionsentwicklung für PM10 enthält.

Die Regressionsgeraden des aus dem Regressionsmodell berechneten PM10-Verlaufs (rote Kurve) entsprechen **nicht** dem meteobereinigten Verlauf!

Aus dem Trend der Messwerte und der meteobereinigten Regressionswerte lässt sich abschätzen, welchen Anteil die Meteorologie am Trend der Messwerte hat. Dies hängt erheblich vom betrachteten Zeitraum ab. Es lässt sich visuell aus Abbildung 5.4 erkennen, dass der meteorologische Anteil am PM10-Rückgang im Zeitraum 2001-2016 eher gering ist, jedoch für 2013-2016 (der Eindruck der letzten Jahre) erheblich ist. Es lassen sich die folgenden meteorologischen Anteile am PM10-Rückgang der letzten Jahre abschätzen:

Tabelle 5.2: Meteorologische Anteile am PM10-Rückgang je Kennzahl und Zeitraum. 100% = gemessener PM10-Rückgang im entsprechenden Zeitraum:

	Zeitraum	Jahresmittel	90%-Tagesmittel	Anz. T. > 30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Tänikon	2001-2016	-30%	-10%	-10%
	2013-2016	20%	50%	60%
Zürich-Kaserne	2001-2016	0%	10%	0%
	2013-2016	20%	50%	40%

Ein Wert von 20% bedeutet also, dass vom beobachteten PM10-Rückgang im entsprechenden Zeitraum 20% auf meteorologische Veränderungen und 80% auf Veränderungen bei Emissionen, Sekundärpartikelbildung und Import zurückzuführen sind. Werte $\pm 10\%$ sind als nicht signifikante meteorologische Beiträge zu betrachten.

Die negativen Werte für 2001-2016 bei Tänikon bedeuten, dass die Meteorologie dort zu einer verringerten PM10-Abnahme geführt hat. Dies wird an zwei Beispielen illustriert. Der meteorologische Beitrag von -30% beim PM10-Jahresmittel bei Tänikon und der Beitrag von +10% beim 90%-Tagesmittel bei Zürich-Kaserne. Im ersten Fall verläuft die Regressionsgerade der gemessenen Jahresmittel (blau) deutlich flacher als der meteobereinigte Verlauf, die Meteorologie hat dort

zu einer verringerten Abnahme geführt. Im zweiten Fall verläuft die Regressionsgerade der gemessenen Jahresmittel (blau) etwas steiler als der meteorobereinigte Verlauf (grün), die Meteorologie hat dort zu einer etwas verstärkten Abnahme geführt.

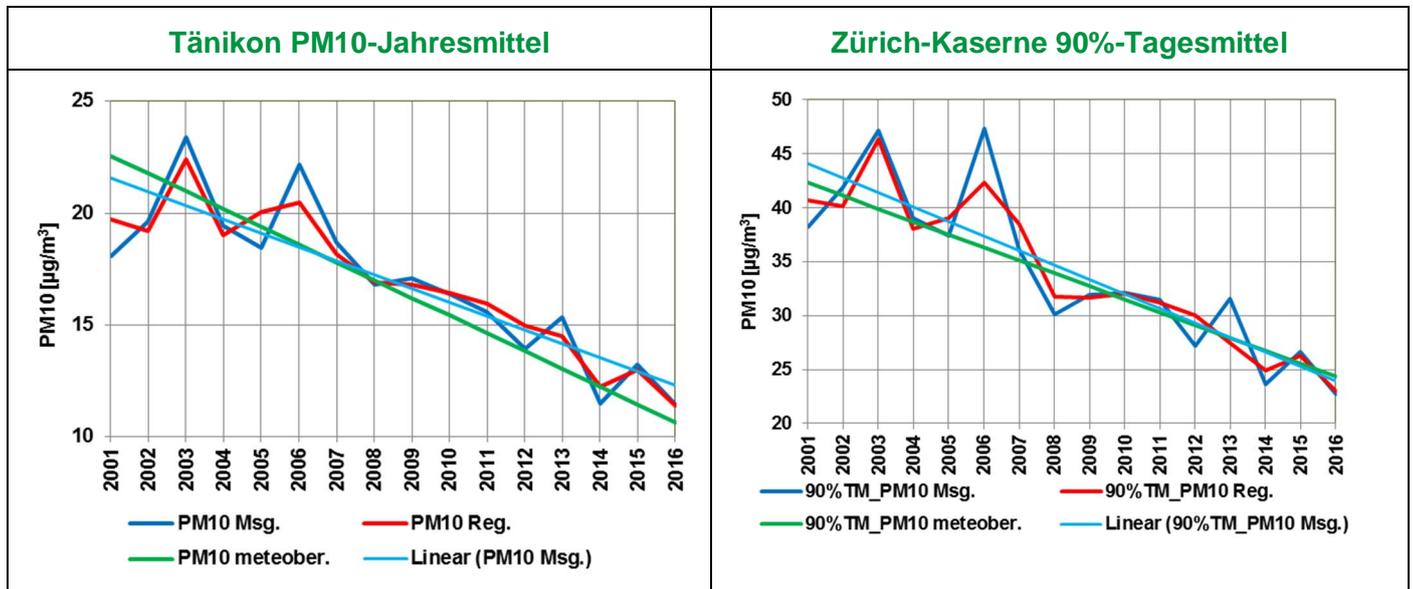


Abbildung 5.5: Beispiele aus Abbildung 5.4 mit eingesetzter Regressionsgerade für die Jahreswerte der Messungen.

Die verringerte PM10-Abnahme bei Tänikon liegt *ausschliesslich* an der Abnahme der Windgeschwindigkeit, deren PM10-erhöhender Effekt viermal so gross war wie der PM10-vermindernde Effekt der übrigen meteorologischen Parameter. Der negative Trend in der Windgeschwindigkeit ist bei Tänikon fast doppelt so gross wie bei Zürich-Kaserne, obwohl die mittlere Windgeschwindigkeit bei Zürich-Kaserne im Mittel der 16 Jahre um einen Drittel höher war als bei Tänikon. Dies ist derart erstaunlich, dass die Überprüfung des 'Global Stilling'-Effektes für andere Stationen in der Ostschweiz empfohlen wird. Die Koeffizienten in einem Regressionsmodell hängen vom gesamten Parameterset ab und stehen nicht für sich allein.

Zürich-Kaserne zeigt im Wesentlichen keinen meteorologischen Anteil an der PM10-Abnahme über den gesamten Zeitraum 2001-2016.

Im Zeitraum 2013-2016 jedoch ist das Bild ganz anders: Der meteorologische Anteil an der beobachteten (gemessenen) Abnahme der PM10-Kennzahlen ist an beiden Standorten erheblich, vor allem bei den erhöhten Werten beträgt er 40-60% (90%-Werte und Anzahl Tage > 30 µg/m³). Diese Aussage gilt inklusive das

Jahr 2016 mit seinem Dezember. **Dass es seit 2014 nur noch sehr wenige erhöhte PM10-Tagesmittel gegeben hat, ist also zur Hälfte auf die meteorologischen Bedingungen zurückzuführen.**

Koeffizienten der Regressionen

In den Regressionen für die PM10-Immission wurden folgende Koeffizienten ermittelt:

Tabelle 5.3: Regressionskoeffizienten für PM10-Kenngrössen bei Tänikon, 2001-2016. p: Irrtumswahrscheinlichkeit, dass ein gefundener Zusammenhang sich nur zufällig eingestellt hat. Beschreibung der Variablen: S. Kap. 5.1.

PM10 Tänikon	Monatsmittel		90%-Tagesmittel		Anz. Tage > 30 µg/m ³	
	Koeff.	p	Koeff.	p	Koeff.	p
Constant	20.954	<0.001	29.822	<0.001	3.172	<0.001
Anz TMW<0	0.477	<0.001	1.146	<0.001	0.412	<0.001
Temp. Abw.	0.463	0.001	1.009	0.001	0.281	0.028
WIGE Abw.	-7.234	<0.001	-7.445	<0.001	-2.121	<0.001
Zeit	-0.0663	<0.001	-0.093	<0.001	-0.0242	<0.001
Feb	3.122	<0.001	8.493	<0.001	2.495	<0.001
Mrz	5.332	<0.001	13.42	<0.001	4.11	<0.001
Dez	-4.267	<0.001	-9.285	<0.001	-3.18	<0.001
SPEZ	10.796	<0.001	21.434	<0.001	4.747	<0.001
CAP2	-5.994	0.014				
CAP5	6.931	<0.001	14.151	<0.001	5.647	0.001
Adj. Bestimmth.m.	0.85		0.81		0.72	
Shapiro-Wilk-Test Normalverteilung	ok		nein		nein	

Der Shapiro-Wilk-Test macht eine Aussage darüber, ob die Werte der abhängigen Variablen normal verteilt sind; die statistischen Aussagen gelten streng nur dann. Auch wenn dieser Test (nicht allzu deutlich) nicht bestanden wurde, können statistische Kernaussagen gemacht werden. Die Anzahl Tage > 30 µg/m³ weicht deutlicher als die 90%-Werte für die Tagesmittel von der Normalverteilung ab; zusammen mit dem eingeschränkten adjustierten Bestimmtheitsmass von nur

0.72 muss diese Regression zurückhaltender beurteilt werden als die beiden anderen. Da das Bild der Koeffizienten ähnlich ausfällt wie bei den andern beiden Regressionen (Vorzeichen, Grössenordnung), kann es dennoch für einen Überblick herangezogen werden.

Die Koeffizienten werden für beide Standorte zusammen später diskutiert. Sie haben die Einheit '($\mu\text{g}/\text{m}^3$)/Variableneinheit', also z.B. für 'WIGE Abw':
(-7.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)/(m/s).

Tabelle 5.4: Regressionskoeffizienten für PM10-Kenngrossen bei Zürich-Kaserne, 2001-2016. p: Irrtumswahrscheinlichkeit, dass ein gefundener Zusammenhang sich nur zufällig eingestellt hat. Beschreibung der Variablen: S. Kap. 5.1.

PM10 Zürich-Kaserne	Monatsmittel		90%-Tagesmittel		Anz. Tage > 30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	
	Koeff.	p	Koeff.	p	Koeff.	p
Constant	18.03	<0.001	21.777	<0.001	2.276	0.102
Anz TMW<0	0.56	<0.001	1.222	<0.001	0.513	<0.001
WIGE Abw.	-7.66	<0.001	-5.664	0.014	-4.556	<0.001
Ausmass	1.734	<0.001	3.416	<0.001	1.035	0.001
Zeit	-0.0697	<0.001	-0.0999	<0.001	-0.043	<0.001
Feb	4.971	<0.001	12.267	<0.001	3.476	<0.001
Mrz	5.345	<0.001	12.259	<0.001	4.775	<0.001
Okt	2.203	0.011	4.122	0.024	2.298	0.006
SPEZ	9.064	<0.001	23.05	<0.001		
CAP2	-6.635	0.016				
CAP5	10.171	<0.001	19.77	<0.001	13.444	<0.001
Adj. Bestimmth.m.	0.85		0.81		0.74	
Shapiro-Wilk-Test Normalverteilung	ok		nein		ok	

Die Irrtumswahrscheinlichkeit p, dass der gefundene Zusammenhang nur zufällig ist, wird gemeinhin als Mass für die Signifikanz verwendet:

- $p < 0.05$: signifikant;
- $p < 0.01$: hoch signifikant;
- $p < 0.001$: sehr hoch signifikant.

Diskussion der Regressionskoeffizienten

- Die **meteorologischen Koeffizienten** sind mit einer Ausnahme erwartungsgemäss: Mehr kalte Tage und mehr bzw. stärkere Inversionen erhöhen die PM10-Belastung. Mehr Wind reduziert sie. Da die Windgeschwindigkeit an beiden Standorten von 2001 bis 2016 abgenommen hat (s. Abbildung 3.16 und Abbildung 3.3), ist dies ein Parameter der zu einer PM10-Erhöhung geführt hat. Dies ändert nichts daran, dass insgesamt eine PM10-Reduktion erfolgt ist. Im Weiteren ist erstaunlich dass bei Tänikon höhere Abweichung der Temperatur von der monatlichen Norm zu höherer PM10-Konzentration führt; dies ist wohl im Gesamtkontext aller meteorologischen Einflüsse zu sehen (sehr starke Reduktion der Windgeschwindigkeit?).
- Dem **Zeit-Koeffizienten** kann entnommen werden, dass sich die *PM10-Konzentration an beiden Standorten zwischen 2001 und 2016 unabhängig von der Meteorologie um rund $0.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pro Jahr verringert hat, also um etwa $13 \mu\text{g}/\text{m}^3$ von 2001 bis 2016.*
- Die **Monats-Koeffizienten** stellen jahreszeitliche Korrekturfaktoren dar. Interessant ist dabei der höchste Koeffizient für den März: In diesem Monat kommt es immer wieder zu einem neuen Anstieg der PM10-Konzentration ausgangs Winter; meistens handelt es sich dabei um ein grösseres Gebiet, welches sich *mit erhöhten PM10-Werten über Europa bewegt. Die erhöhten Werte können durch mitgeführten als auch durch lokal produzierten Feinstaub inkl. Sekundärpartikelbildung entstehen.* Genauere Untersuchungen dazu sind nicht bekannt.
- Der Term **SPEZ** steht für eine PM10-Erhöhung, welche sporadisch auftritt und nicht mit den verfügbaren Parametern aus Meteorologie und Jahreszeit abgebildet werden kann. Für die betroffenen Monate (Februar 2003, Januar und Februar 2006, Oktober und November 2007, Februar 2012) macht er $9-11 \mu\text{g}/\text{m}^3$ PM10 im Monatsmittel aus; er ist sehr hoch signifikant. Auch wenn es plausible Schilderungen zur Entstehung dieser PM10-Wellen gibt, so können sie dennoch bis anhin nicht vorausgesehen werden. *Trotz des allgemein abnehmenden PM10-Niveaus können sie Grenzwertüberschreitungen zur Folge haben.*
- Der **Sockel 'Constant'** darf keinesfalls mit irgendeiner Art von "Hintergrund" verwechselt werden; er ergibt sich rein rechnerisch und hängt z.B. von den gewählten Einheiten ab.

Wesentliches Ergebnis der Regression ist, dass sie für Tänikon und für Zürich-Kaserne gut d.h. mit hohem Bestimmtheitsmaß (0.85 für die PM10-Jahresmittel) für eine Felduntersuchung herausgekommen ist. Der Verlauf

des PM10 über die letzten 16 Jahre ist in sich konsistent, wobei drei Punkte festzuhalten sind:

- Über den gesamten Zeitraum 2001-2016 ist der meteorologische Einfluss auf die Abnahme der PM10-Immissionen bei Zürich-Kaserne gering; bei Tänikon hat die starke Abnahme der Windgeschwindigkeit die PM10-Abnahme erkennbar gedämpft.
- Die besonders geringe Anzahl Tage mit erhöhten PM10-Konzentrationen seit 2014 ist an beiden Standorten etwa zur Hälfte meteorologisch bedingt.
- Sporadisch kommt es zu Wellen stark erhöhter PM10-Konzentrationen (in sechs Monaten von 2001-2016), welche nicht aus dem Kontext der üblichen Einflussparameter heraus erklärbar sind.

5.3. Zwei offene Fragen

Angesichts der Ergebnisse in diesem Kapitel ergeben sich zwei offene Fragen:

- Die Flottenmodernisierung beim Strassenverkehr (Dieselpartikelfilter, eigentlich seit 2007; Euro 6/VI) ist weitergegangen und damit eine Reduktion der Feinstaubemissionen. Spielt der Verkehr doch eine grosse Rolle für die PM10-Belastung im Mittelland?
- Woher kommen die plötzlichen PM10-Wellen, bei welchen Grenzwertüberschreitungen auch heute noch möglich sind? Wann treten sie auf?

6. Belastungsepisode im Pariser Becken im Dezember 2016

Anfangs Dezember 2016 kam es im Pariser Becken zu stark erhöhter Luftverschmutzung. Es gab einschränkende Massnahmen wie temporäre Fahrverbote. Im Folgenden werden die Tagesmittel von NO_2 und PM10 an zwei Messstellen im Pariser Becken vom 1.11. . 12.12.2016 betrachtet und mit den PM10-Konzentrationen bei Zürich-Kaserne verglichen.

Im November waren die PM10-Werte an den Champs-Élysées und an der Route Nationale 2 etwa doppelt so hoch wie bei Zürich-Kaserne; es wäre interessant zu wissen, warum eigentlich. Ende November kam es zur Welle stark erhöhter Luftverschmutzung mit Tagesmitteln $>120 \mu\text{g}/\text{m}^3 \text{NO}_2$ und $>100 \mu\text{g}/\text{m}^3 \text{PM10}$ an den beiden französischen Stationen. Auch Zürich-Kaserne zeigte zeitparallel erhöhte Werte, allerdings nicht in diesem Ausmass: Erreichten die PM10-Werte an den beiden französischen Stationen das 4-5 fache des Episodenmittels vom 1.-21.11., so war es bei Zürich-Kaserne nur das Dreifache.

Es wäre interessant zu ergründen, was genau diese Welle erhöhter Luftverschmutzung verursacht hat (über die allgemeine 'Inversionslage' und 'Hochdruckgebiet' hinaus), und weshalb sich diese Welle im zentralen Mitteleuropa diesmal weniger stark ausgewirkt hat als im nordwestlichen.

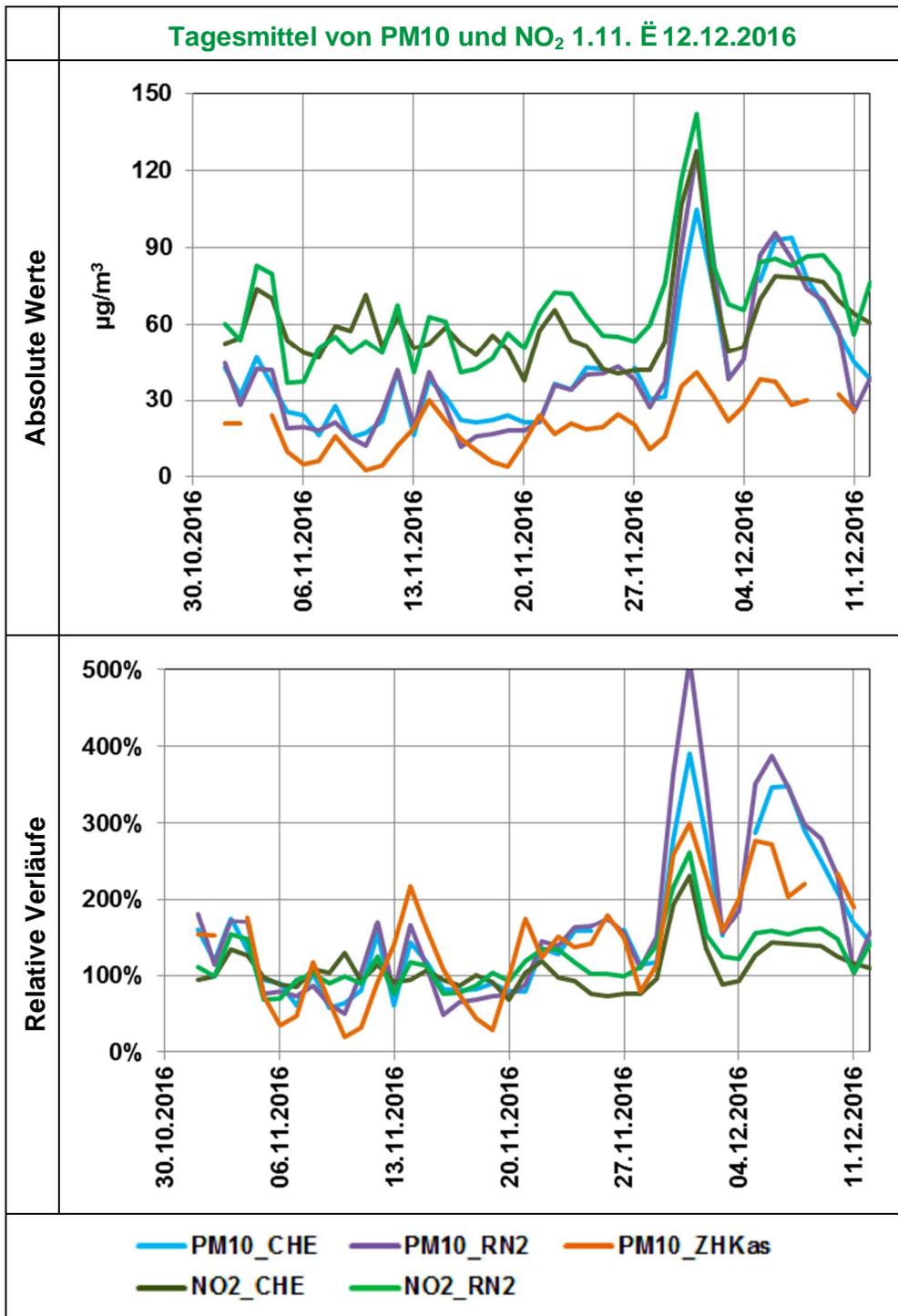


Abbildung 6.1: Verlauf von PM10 und NO₂ (Tagesmittel) vom 1.11.-12.12.2016 auf den Champs-Élysées (Paris; CHE), an der Route Nationale 2 (nordöstlich von Paris; RN2) und bei Zürich-Kaserne (ZHKas). Relative Verläufe: 100% = Episodenmittel 1.-21.11.2016 je Station und Komponente. Datenquelle für CHE und RN2: Airparif, Paris.

7. Entwicklung der Grenzwertüberschreitungen beim PM10 in Deutschland

Bezogen auf ganz Deutschland ist der Anteil der Messstationen mit mehr als 35 Überschreitungen des PM10-Tagesmittelgrenzwertes seit 2012 sehr markant zurückgegangen, und zwar für die gesamte Phase von 2012 bis 2015. Der Bruch auf 2012 ist so deutlich, dass zu vermuten ist, dass wohl auch hier meteorologische Einflüsse mitgespielt haben, dennoch sind die emissionsseitigen Abnahmen offenkundig. Die verkehrsmässige Exposition hat für die PM10-Belastung eine entscheidende Rolle gespielt.

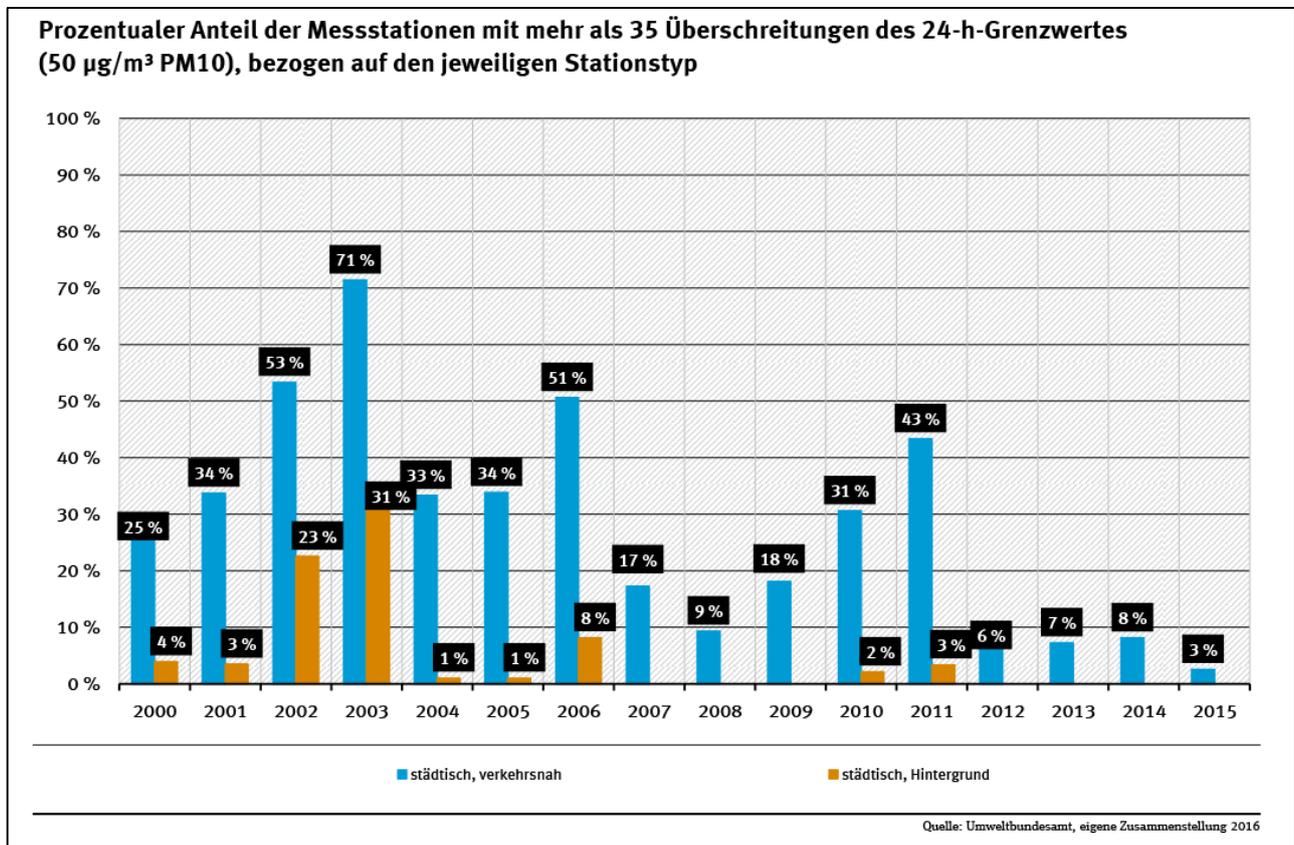


Abbildung 7.1: Prozentualer Anteil der Messstationen in Deutschland mit mehr als 35 Überschreitungen des PM10-Tagesmittelgrenzwertes, 2000-2015. Quelle: Umweltbundesamt, Berlin.

8. Zusammenfassung

In den Jahren von 2001 bis 2016 haben sich die PM10-Immissionen an den Messstationen Tänikon (ländlich) und Zürich-Kaserne (urbaner Hintergrund) nahezu halbiert. Dieser starke Rückgang betrifft alle PM10-Kennzahlen.

Die Betrachtungen und Analysen zeigen, dass beim Rückgang über den gesamten Zeitraum 2001-2016 die emissionsseitigen Ursachen inkl. Sekundärpartikelbildung bei weitem überwiegen. Im Zeitraum 2013-2016 jedoch ist der meteorologische Anteil an der beobachteten starken Abnahme der PM10-Kennzahlen an beiden Standorten erheblich.

Die Untersuchung immissionsrelevanter meteorologischer Grössen zeigt ein Bild leicht abnehmender Inversionsstärken bei etwa gleichbleibenden Inversionshäufigkeiten (sowohl bodennah als auch insgesamt), wie auch abnehmender Häufigkeiten von kalten Tagen; dies alles wirkt immissionsmindernd. Auf der anderen Seite haben abnehmende Windgeschwindigkeiten diese Minderung kompensiert, im Falle von Tänikon überkompensiert.

Die Abnahme der Windgeschwindigkeit zeigt sich in allen Jahreszeiten. Sie ist im Sommer am geringsten. Schwachwindtage treten vor allem im Herbst und Winter auf und sind von 2001-2016 zahlreicher geworden.

Die PM10-Abnahme zeigte sich bei beiden Standorten in allen Windrichtungen. Bei südlichen Winden (Sektoren SE-SW) fiel sie jedoch wesentlich stärker aus als bei den anderen Sektoren. Bei nordöstlichen Winden war die PM10-Abnahme bei beiden Standorten am geringsten. Auch richtungsabhängige Windgeschwindigkeiten und ihre allfällig unterschiedlichen Änderungen über die letzten 16 Jahre könnten hierbei eine Rolle spielen.

Die Analyse der Wetterlagenverteilungen (CAP-Klassen) zeigt eine gewisse Verschiebung der Häufigkeiten der einzelnen Klassen über den Zeitraum 2001-2016. Die beiden Klassen mit den durchschnittlich höchsten PM10-Immissionen sind weniger häufig geworden, vor allem im Winter. Über das ganze Jahr und alle Klassen betrachtet ist jedoch der Einfluss dieser Verschiebungen auf die PM10-Immissionen gering.

Mittels linearer Regression sind die Verläufe der PM10-Konzentrationen auf Basis von Monatsmittelwerten für Tänikon und Zürich-Kaserne für den Zeitraum 2001 .

2016 auf meteorologische, jahreszeitliche und langzeitliche (also emissionsseitige) Einflussvariable rückgeführt worden.

Wesentliches Ergebnis der Regression ist, dass sie für Tänikon und für Zürich-Kaserne gut d.h. mit hohem Bestimmtheitsmaß (0.85 für die PM10-Jahresmittel) für eine Felduntersuchung herausgekommen ist. Der Verlauf des PM10 über die letzten 16 Jahre ist in sich konsistent, wobei drei Punkte festzuhalten sind:

- Über den gesamten Zeitraum 2001-2016 ist der meteorologische Einfluss auf die Abnahme der PM10-Immissionen bei Zürich-Kaserne gering; bei Tänikon hat die starke Abnahme der Windgeschwindigkeit die PM10-Abnahme erkennbar gedämpft.
- Die besonders geringe Anzahl Tage mit erhöhten PM10-Konzentrationen seit 2014 ist an beiden Standorten etwa zur Hälfte meteorologisch bedingt.
- Sporadisch kommt es zu Wellen stark erhöhter PM10-Konzentrationen (in sechs Monaten von 2001-2016), welche nicht aus dem Kontext der üblichen Einflussparameter heraus erklärbar sind.

Angesichts der Ergebnisse in diesem Kapitel ergeben sich zwei offene Fragen:

- Die Flottenmodernisierung beim Strassenverkehr (Dieselpartikelfilter, eigentlich seit 2007; Euro 6/VI) ist weitergegangen und damit eine Reduktion der Feinstaubemissionen. Spielt der Verkehr doch eine grosse Rolle für die PM10-Belastung im Mittelland?
- Woher kommen die plötzlichen PM10-Wellen, bei welchen Grenzwertüberschreitungen auch heute noch möglich sind? Wann treten sie auf?