



*Schlussbericht*

# **PM10-Belastungsphasen in der Ost- und Zentralschweiz**

**Winterhalbjahre 2001-2012**

*Im Auftrag von OSTLUFT und in-luft*

Dr. Jürg Thudium  
23.08.2013 / 5901.30 V2

Oekoscience AG

Postfach 452  
CH - 7001 Chur

Telefon: +4181 250 3310  
[science@oekoscience.ch](mailto:science@oekoscience.ch)



# Inhaltsverzeichnis

<b>Zusammenfassung</b>	<b>1</b>
<b>Begriffserklärungen</b>	<b>6</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>7</b>
<b>1. Einleitung</b>	<b>8</b>
<b>2. Charakterisierung erhöhter PM10-Konzentrationen in der Zentral- und Ostschweiz</b>	<b>9</b>
2.1. Überschreitungshäufigkeit des PM10-Grenzwertes im Winterhalbjahr im geografischen Überblick	9
2.1.1. Methodik	9
2.1.2. Ergebnis	9
2.2. Räumliches Auftreten der Überschreitungstage	11
2.3. Singuläre und paarweise Grenzwertüberschreitungen für PM10	13
<b>3. PM10-Belastungsphasen</b>	<b>17</b>
3.1. Methodik	17
3.2. Zeitliches Auftreten der Belastungsphasen	18
3.3. Räumliches Auftreten der Belastungsphasen	21
3.4. Belastungsphasen und CAP-Klassen	23
<b>4. Beendigung von Belastungsphasen</b>	<b>26</b>
<b>5. Phasen mit nachhaltigen PM10-Anstiegen</b>	<b>30</b>
5.1. Methodik	30
5.2. Ergebnisse	30
<b>6. Nachhaltige PM10-Anstiege und mögliche Einflussgrössen</b>	<b>32</b>
6.1. Behandlung von Inversionen in dieser Untersuchung	32
6.2. Nachhaltige PM10-Anstiege bei Zürich-Kaserne	34
6.3. Vergleich mit den Anstiegsphasen bei Sedel und St. Gallen	42
<b>7. Modell eines Belastungsindikators als Vorbereitung auf eine PM10-Prognose</b>	<b>47</b>
7.1. Das Indikatormodell	47
7.2. Ergebnis des B-Indikators für Sedel	50
7.3. Diskussion der Inversionsprognose von MeteoSchweiz	55

<b>8. Fallstudie: Indikatoren der beiden Hochbelastungsphasen im Januar/Februar 2006</b>	<b>58</b>
<b>9. Fallstudie: Inversionen über Zürich</b>	<b>62</b>
<i>Anhang A1: Datenverfügbarkeit und Normierung PM10-Karte</i>	<b>65</b>
<i>Anhang A2: PM10-Belastungsphasen</i>	<b>67</b>
<i>Anhang A3: Dokumentation der nachhaltigen PM10-Anstiege</i>	<b>68</b>
<i>Anhang A4: Dokumentation der Einflussgrößen in Anstiegsphasen</i>	<b>74</b>
<i>Anhang A5: Parameter der Anstiegsphasen für Zürich-Kaserne, Sedel und St. Gallen</i>	<b>77</b>
<i>Anhang A6: Differenzen in Inversionsparametern zwischen TP Zürich und TP Mittelland bzw. TP St. Gallen und TP Mittelland</i>	<b>87</b>

# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1: Normierter Anteil von Tagesmitteln mit $PM_{10} > 50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , Winterhalbjahre 2001-2012. Die Zuordnung der Stationsnamen zu den Abkürzungen findet sich in Anhang A1.	10
Abbildung 2.2: Häufigkeitsverteilung des Prozentsatzes an Stationen mit Tagesmittel (TM) $>50\mu\text{g}/\text{m}^3$ für die beiden Fälle: (i) 462 Tage mit mind. einer Station $>50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ; (ii) 208 Tage mit $>50\mu\text{g}/\text{m}^3$ $PM_{10}$ bei ZH-Kaserne. Lesebeispiel s. oben.	12
Abbildung 2.3: Häufigkeitsverteilung des Prozentsatzes an Stationen mit Tagesmittel (TM) $>50\mu\text{g}/\text{m}^3$ für die Tage mit den folgenden Schwellenwerten für $PM_{10}$ : (i) 208 Tage mit $>50\mu\text{g}/\text{m}^3$ ; (ii) 86 Tage mit $>60\mu\text{g}/\text{m}^3$ ; (iii) 42 Tage mit $>70\mu\text{g}/\text{m}^3$ ; (iv) 28 Tage mit $>80\mu\text{g}/\text{m}^3$ ; (v) 17 Tage mit $>90\mu\text{g}/\text{m}^3$ ; (vi) 13 Tage mit $>100\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Lesebeispiel s. oberhalb von Abbildung 2.2.	13
Abbildung 3.1: Anteil Belastungsphasen je Winterhalbjahr (links) bzw. je Monat (rechts), Winterhalbjahre 2001-2012.	19
Abbildung 3.2: Anteil Belastungsphasen je Wochentag, Winterhalbjahre 2001-2012.	19
Abbildung 3.3: Aufteilung der Belastungsphasen je Episodendauer, Winterhalbjahre 2001-2012.	20
Abbildung 3.4: Häufigkeitsverteilung des Prozentsatzes an Stationen mit $TM > 50\mu\text{g}/\text{m}^3$ für die beiden Fälle: (i) 462 Tage mit mind. einer Station $>50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ; (ii) 136 Belastungstage. Erklärung zur Darstellung s. oberhalb Abbildung 2.2.	21
Abbildung 3.5: Anteil der Überschreitungstage ( $TM > 50, 60$ bzw. $70 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) je Station, welche auf Belastungsphasen fallen. Winterhalbjahre 2001-2012.	22
Abbildung 3.6: CAP-Häufigkeitsverteilungen für die 11 Winterhalbjahre 2001-2012 und für die 136 Tage in Belastungsphasen.	24
Abbildung 3.7: Mittlere $PM_{10}$ -Konzentration an Belastungstagen je CAP-Klasse.	25
Abbildung 4.1: CAP-Klassenverteilungen für die Winterhalbjahre 2001-2012, die Endtage und die Folgetage von Belastungsphasen. Die Summe über alle CAP-Klassen ist für jeden Fall 100%.	26
Abbildung 4.2: Änderung der Inversionshäufigkeit vom Endtag zum Folgetag von Belastungsphasen: Verteilung in 10%-Häufigkeitsschritten für Bodeninversionen und	

Höheninversionen in 800 - 1100 m ü.M. Die Summe über die grünen und über die blauen Säulen beträgt je 100% (alle Belastungsphasen).	27
Abbildung 6.1: Inversionshäufigkeiten je Höhenschicht im mittleren Tagesgang, TP Mittelland und TP St. Gallen, Winterhalbjahre 2010/11 und 2011/12.	33
Abbildung 6.2: Charakterisierung der Anstiegsphasen ohne Belastungsphase (A <sub>Ph</sub> o. B <sub>Ph</sub> ) und solche im Vorfeld einer Belastungsphase (A <sub>Ph</sub> mit B <sub>Ph</sub> ): Maximaler 24h-Anstieg und Dauer der Anstiegsphase. Mittelwerte und ihre Standardabweichung (rote Balken).	35
Abbildung 6.3: Mittlere tägliche Immissionskennzahlen und ihre Standardabweichungen für die Winterhalbjahre 2001-2012 (WHj) und die Inversionstage (>80% Inversionshäufigkeit; Tage ohne Anstiegsphasen) sowie mittlere Immissionskennzahlen und ihre Standardabweichungen für PM10-Anstiegsphasen ohne Belastungsphase (A <sub>Ph</sub> o. B <sub>Ph</sub> ) und solche im Vorfeld einer Belastungsphase (A <sub>Ph</sub> mit B <sub>Ph</sub> ). PM10-Ausgangswert (zu Beginn der Phase bzw. des Tages); 90%-Perzentil von PM10; NO <sub>x</sub> -, NO <sub>2</sub> - und Ozonmittelwert. Werte für Zürich-Kaserne.	36
Abbildung 6.4: Mittlere tägliche meteorologische Kennzahlen und ihre Standardabweichungen für die Winterhalbjahre 2001-2012 (WHj) und die Inversionstage (>80% Inversionshäufigkeit; Tage ohne Anstiegsphasen) sowie mittlere meteorologische Kennzahlen und ihre Standardabweichungen für PM10-Anstiegsphasen ohne Belastungsphase (A <sub>Ph</sub> o. B <sub>Ph</sub> ) und solche im Vorfeld einer Belastungsphase (A <sub>Ph</sub> mit B <sub>Ph</sub> ). Temperatur; relative Luftfeuchtigkeit; Windgeschwindigkeit (WIGE; Mittelwert und 90%-Perzentil); Globalstrahlung (STRGLO; Mittelwert und 75%-Perzentil). Werte für Zürich-Kaserne.	37
Abbildung 6.5: Mittlere tägliche Inversions-Kennzahlen und ihre Standardabweichungen für die Winterhalbjahre 2001-2012 (WHj) und die Inversionstage (>80% Inversionshäufigkeit; Tage ohne Anstiegsphasen) sowie mittlere Inversions-Kennzahlen und ihre Standardabweichungen für PM10-Anstiegsphasen ohne Belastungsphase (A <sub>Ph</sub> o. B <sub>Ph</sub> ) und solche im Vorfeld einer Belastungsphase (A <sub>Ph</sub> mit B <sub>Ph</sub> ). Inversionshäufigkeit; Anteil der Bodeninversionen an der Inversionszeit; Inversionsuntergrenze und ihre Dynamik (Veränderung während des Tages bzw. während der Anstiegsphase); Inversionsobergrenze. Inversionen vom TP Mittelland.	38
Abbildung 7.1: Mittelwerte der Indikatoren für nachhaltige Anstiegsphasen (A-Indikator), für den PM10-Ausgangswert des betreffenden Tages bzw. der betreffenden Phase und für Belastungsphasen (B-Indikator), Sedel, Winterhalbjahre 2001-2012. Erklärungen S. 49f.	49

Abbildung 7.2: 90%-Werte von PM10 bei Sedel gegen B-Indikator. Alle Tage in den Winterhalbjahren 2001-2012 (WHj), Anstiegsphasen mit (Aph mit BPh) und ohne (Aph ohne BPh) Belastungsphase.	50
Abbildung 7.3: 90%-Werte von PM10 bei Sedel gegen B-Indikator. Belastungstage, 'BPUK-Tage ZCH' (Tage, an welchen retrospektiv betrachtet die Informationsstufe gemäss Konzept BPUK für die Zentralschweiz galt) und übrige Tage im Winterhalbjahr (üb. WHj.), Winterhalbjahre 2001-2012.	51
Abbildung 7.4: Anteile von Belastungstagen (BT) bzw. BPUK-Tagen an allen Tagen je Intervall von 100 des B-Indikators, Sedel, Winterhalbjahre 2001-2012. Lesebeispiel: Im Intervall des B-Indikators von 200-300 (Wert eingezeichnet für 250) sind knapp 30% aller Tage, welche einen B-Indikator in diesem Intervall aufweisen, Belastungstage.	53
Abbildung 7.5: Anteil von Belastungstagen (BT) an allen Tagen bzw. an allen Belastungstagen oberhalb von B-Indikator-Schwellenwerten. Lesebeispiele: Von den Tagen mit einem B-Indikator >300 sind $\frac{3}{4}$ Belastungstage; 55% aller Belastungstage weisen einen B-Indikator von >300 auf.	54
Abbildung 7.6: Anteil von BPUK-Tagen (BPUK-T) an allen Tagen bzw. an allen BPUK-Tagen oberhalb von B-Indikator-Schwellenwerten. Lesebeispiele: Von den Tagen mit einem B-Indikator >400 sind $\frac{3}{4}$ BPUK-Tage; $\frac{3}{4}$ aller BPUK-Tage weisen einen B-Indikator von >400 auf.	55
Abbildung 7.7: Beispiel eines Inversionswetterberichtes von MeteoSchweiz.	56
Abbildung 8.1: Mittlere tägliche Immissionskennzahlen und ihre Standardabweichungen für die beiden Hochbelastungsphasen 7.-16.1.2006 und 25.1.-6.2.2006 sowie mittlere Immissionskennzahlen und ihre Standardabweichungen für PM10-Anstiegsphasen ohne Belastungsphase (Aph o. BPh) und solche im Vorfeld einer Belastungsphase (Aph mit BPh). PM10-Ausgangswert (zu Beginn der Phase bzw. des Tages); 90%-Perzentil von PM10; NO <sub>x</sub> -, NO <sub>2</sub> - und Ozonmittelwert. Werte für Sedel.	59
Abbildung 8.2: Mittlere tägliche meteorologische Kennzahlen und ihre Standardabweichungen für die beiden Hochbelastungsphasen 7.-16.1.2006 und 25.1.-6.2.2006 sowie mittlere meteorologische Kennzahlen und ihre Standardabweichungen für PM10-Anstiegsphasen ohne Belastungsphase (Aph o. BPh) und solche im Vorfeld einer Belastungsphase (Aph mit BPh). Temperatur; relative Luftfeuchtigkeit; Windgeschwindigkeit (WIGE; Mittelwert und 90%-Perzentil); Globalstrahlung (STRGLO; Mittelwert und 75%-Perzentil). Werte für Sedel.	60
Abbildung 8.3: Mittlere tägliche Inversions-Kennzahlen und ihre Standardabweichungen für die beiden Hochbelastungsphasen 7.-16.1.2006 und 25.1.-6.2.2006 sowie mittlere	

Inversions-Kennzahlen und ihre Standardabweichungen für PM10-Anstiegsphasen ohne Belastungsphase (A <sub>Ph</sub> o. B <sub>Ph</sub> ) und solche im Vorfeld einer Belastungsphase (A <sub>Ph</sub> mit B <sub>Ph</sub> ). Inversionshäufigkeit; Anteil der Bodeninversionen an der Inversionszeit; Inversionsuntergrenze und ihre Dynamik (Veränderung während des Tages bzw. während der Anstiegsphase); Inversionsobergrenze. Inversionen vom TP Mittelland.	61
Abbildung 9.1: Inversionshäufigkeiten je Höhengschicht im mittleren Tagesgang, Temperaturprofil (TP) Zürich 412 – 1043 m ü.M., Winterhalbjahre 2010/11 und 2011/12.	62
Abbildung 9.2: Inversionshäufigkeiten je Höhengschicht im mittleren Tagesgang, Temperaturprofil (TP) Zürich 412 – 558 m ü.M., Winterhalbjahre 2010/11 und 2011/12. ACHTUNG! ANDERE FARBSKALA ALS IN Abbildung 9.1.	63
Abbildung 9.3: Tagesmittel von NO <sub>x</sub> und PM10 (ZH-Kaserne) und der Inversionshäufigkeit in der untersten 150m-Schicht über der Stadt Zürich, Winterhalbjahre 2010/11 (oben) bzw. 2011/12 (unten).	64
Abbildung A5.1: Charakterisierung der Anstiegsphasen ohne Belastungsphase (A <sub>Ph</sub> o. B <sub>Ph</sub> ) und solche im Vorfeld einer Belastungsphase (A <sub>Ph</sub> mit B <sub>Ph</sub> ): Maximaler 24h-Anstieg und Dauer der Anstiegsphase. Mittelwerte und ihre Standardabweichung (rote Balken).	77
Abbildung A5.2: Mittlere tägliche Immissionskennzahlen und ihre Standardabweichungen für die Winterhalbjahre 2001-2012 (WHj) und die Inversionstage (>80% Inversionshäufigkeit; Tage ohne Anstiegsphasen) sowie mittlere Immissionskennzahlen und ihre Standardabweichungen für PM10-Anstiegsphasen ohne Belastungsphase (A <sub>Ph</sub> o. B <sub>Ph</sub> ) und solche im Vorfeld einer Belastungsphase (A <sub>Ph</sub> mit B <sub>Ph</sub> ). PM10-Ausgangswert (zu Beginn der Phase bzw. des Tages); 90%-Perzentil von PM10; NO <sub>x</sub> -, NO <sub>2</sub> - und Ozonmittelwert.	80
Abbildung A5.3: Mittlere tägliche meteorologische Kennzahlen und ihre Standardabweichungen für die Winterhalbjahre 2001-2012 (WHj) und die Inversionstage (>80% Inversionshäufigkeit; Tage ohne Anstiegsphasen) sowie mittlere meteorologische Kennzahlen und ihre Standardabweichungen für PM10-Anstiegsphasen ohne Belastungsphase (A <sub>Ph</sub> o. B <sub>Ph</sub> ) und solche im Vorfeld einer Belastungsphase (A <sub>Ph</sub> mit B <sub>Ph</sub> ). Temperatur; relative Luftfeuchtigkeit; Windgeschwindigkeit (WIGE; Mittelwert und 90%-Perzentil); Globalstrahlung (STRGLO; Mittelwert und 75%-Perzentil).	83
Abbildung A5.4: Mittlere tägliche Inversions-Kennzahlen und ihre Standardabweichungen für die Winterhalbjahre 2001-2012 (WHj) und die Inversionstage (>80% Inversionshäufigkeit; Tage ohne Anstiegsphasen) sowie mittlere Inversions-Kennzahlen und ihre Standardabweichungen für PM10-Anstiegsphasen ohne Belastungsphase (A <sub>Ph</sub>	

o. BPh) und solche im Vorfeld einer Belastungsphase (APh mit BPh).  
Inversionshäufigkeit; Anteil der Bodeninversionen an der Inversionszeit;  
Inversionsuntergrenze und ihre Dynamik (Veränderung während des Tages bzw. während  
der Anstiegsphase); Inversionsobergrenze.

86

Abbildung A6.1: Differenzen zwischen TP Zürich und TP Mittelland bzw. TP St. Gallen  
und TP Mittelland: In den mittleren täglichen Inversions-Kennzahlen für die  
Winterhalbjahre 2001-2012 (WHj) und die Inversionstage (>80% Inversionshäufigkeit;  
Tage ohne Anstiegsphasen) sowie in den mittleren Inversions-Kennzahlen für PM10-  
Anstiegsphasen ohne Belastungsphase (APh o. BPh) und solche im Vorfeld einer  
Belastungsphase (APh mit BPh). Inversionshäufigkeit; Anteil der Bodeninversionen an der  
Inversionszeit; Inversionsuntergrenze und ihre Dynamik (Veränderung während des  
Tages bzw. während der Anstiegsphase); Inversionsobergrenze.

88

# Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1: Aufteilung der 462 Überschreitungstage (mindestens eine Station im Raum Zentralschweiz/ Ostschweiz mit PM10-Tagesmittel > 50 µg/m <sup>3</sup> ):	12
Tabelle 2.2: Singuläre und paarweise Grenzwertüberschreitungen im Gebiet von Zentralschweiz/Ostschweiz/Lustenau, Winterhalbjahre 2001-2012. Erklärung zum Tabellenaufbau s. oberhalb der Tabelle.	15
Tabelle 3.1: Belastungsphasen je Stationspaar (an beiden Stationen Tagesmittel PM10>50 µg/m <sup>3</sup> ), Winterhalbjahre 2001-2012:	17
Tabelle 3.2: Simultane Grenzwertüberschreitungen an den Stationen Zürich-Kaserne, Sedel, Zug und Konstanz an den Belastungstagen, bestimmt mit dem Stationspaar ZH-Kaserne-Sedel, Winterhalbjahre 2001-2012:	18
Tabelle 3.3: Verteilung der Belastungstage in Phasen:	20
Tabelle 3.4: Erreichung der Informationsstufe nach BPUK-Konzept retrospektiv:	20
Tabelle 3.5: Zusammenfassung der CAP-Klassen:	24
Tabelle 4.1: Häufigkeit von Niederschlagstagen an Endtagen und Folgetagen von Belastungsphasen. Erklärung s. Abschnitt oben.	28
Tabelle 4.2: Mittlere Windgeschwindigkeit (WIGE) bei Zürich-Kaserne. Links: An Endtagen und an Folgetagen von Belastungsphasen, unterteilt nach gleich bleibender oder sich ändernder CAP-Klasse. Rechts: Während 8h-Phasen rund um das Passieren der 50 µg/m <sup>3</sup> -Schwelle für PM10; -9 bis -1 h vor dem Passieren, -1 (1 h vor) bis +7 h (nach Passieren).	28
Tabelle 5.1: Belastungsphasen (BP) und nachhaltige PM10-Anstiege bei Zürich-Kaserne und Sedel, Winterhalbjahre 2001-2012:	31
Tabelle 6.1: Qualitative Differenz der PM10-Einflussgrößen zu <i>ihrem Wintermittel 2001-2012</i> für Inversionstage als auch für Anstiegsphasen mit und ohne Belastungsphase bei Zürich-Kaserne, Sedel und St. Gallen. Rote Pfeile: Andere qualitative Differenz als Zürich-Kaserne.	44
Tabelle 6.2: Qualitative Differenz der PM10-Einflussgrößen relativ zu einem <i>mittleren Inversionstag ohne PM10-Anstiegsphase 2001-2012</i> für Anstiegsphasen mit und ohne	

Belastungsphase bei Zürich-Kaserne, Sedel und St. Gallen. Rote Pfeile: Andere qualitative Differenz als Zürich-Kaserne.	45
Tabelle A1.1: Datenverfügbarkeit der PM10-Messstationen im Gebiet Zentralschweiz/Ostschweiz/Lustenau:	65
Tabelle A2.1: PM10-Belastungsphasen: Zeitpunkt, Anzahl Tage, Datum und Betrag des höchsten PM10-Tagesmittels, Winterhalbjahre 2001-2012. Rot: Informationsschwelle BPUK-Konzept im Laufe der Belastungsphase retrospektiv erreicht.	67
Tabelle A3.1: Nachhaltige PM10-Anstiege für Sedel und Zürich-Kaserne, Winterhalbjahre 2001-2012. Rot: Anstiege im Vorfeld einer Belastungsphase; grün: gemeinsame Anstiege ohne Belastungsphase.	68
Tabelle A3.2: Auflistung der 55 Belastungsphasen, Winterhalbjahre 2001-2012. Gelb: Nachhaltiger PM10-Anstieg bei Zürich-Kaserne und Sedel; blau: Anstieg nur bei Sedel; rot: Anstieg nur bei Zürich-Kaserne; schwarz: kein Anstieg. MaxTag: Anzahl Tage des PM10-Maximums vor Ende der Belastungsphase; 1 = letzter Tag.	72
Tabelle A4.1: Dokumentation zu den Einflussgrößen der Anstiegsphasen.	76

# Zusammenfassung

In diesem Projekt wird die PM10-Situation in der Ost- und Zentralschweiz in den Winterhalbjahren von 2001/02 bis 2011/12 an insgesamt 31 Stationen untersucht. Die Liste dieser 31 Stationen mit ihren Messzeiten findet sich in Anhang A1.

Die Meteorologie und die Bildungsprozesse von Partikeln während PM10-Belastungsphasen sollen besser verstanden werden. Dabei geht es einerseits um Phasen mit erhöhten PM10-Tagesmittelwerten und andererseits um das Erfassen nachhaltiger Anstiege des PM10, welche zu solch erhöhten Tagesmitteln führen. Die Vorgänge, welche zu erhöhten PM10-Konzentrationen führen, sind mannigfaltig und komplex. Das Ziel dieser Studie ist die Evaluierung von Parametern, welche auf hohe PM10-Werte hinweisen. Damit sollen Grundlagen geschaffen werden, Prognosen bevorstehender PM10-Spitzenbelastungen und damit möglicherweise auch die Prävention zu verbessern.

Gleich im Anschluss an die Zusammenfassung befindet sich eine Erklärung zu den in dieser Studie verwendeten Begriffen.

## **PM10-Grenzwertüberschreitungen**

Die grössten Häufigkeiten an Grenzwertüberschreitungen von PM10 finden sich in den Städten Zürich/Luzern/Zug zusammen mit Stans, Reiden-A2 und Lustenau (höchste Belastung: Zürich-Schimmelstrasse). Der gesamte Mittellandraum in der Ost- und Zentralschweiz weist in der normierten Darstellung eine recht konsistente Belastung auf, erhöhte und etwas abgelegene Standorte (auch Region Wettswil) weisen geringere aber durchaus plausible und konsistente Werte auf. Überraschend sind die tiefen Werte bei Heiden und vor allem bei Neuhausen.

Ein grosser Teil der insgesamt 462 Überschreitungstage zeigt einen lokalen Charakter. Überregionale "PM10-Suppen" machen nur einen kleinen Teil der Überschreitungstage aus. Nur an 46 Tagen in den elf Winterhalbjahren wiesen jeweils über 90% aller Stationen eine Grenzwertüberschreitung auf.

Mehr als ein Drittel aller Überschreitungstage für PM10 sind singuläre oder paarweise Überschreitungstage, an welchen nur genau eine oder zwei Stationen eine Überschreitung aufweisen.

Die singulären und paarweisen Überschreitungstage sind sehr ungleich über die 30 Stationen verteilt. Am meisten solche Überschreitungstage weisen strassen-nahe Stationen, solche im Rheintal sowie das Paar Lustenau/Konstanz auf.

### **PM10-Belastungsphasen**

An "PM10-Belastungstagen" soll grundsätzlich an zwei Stationen einer Region das Tagesmittel von PM10 grösser als  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  sein, wobei die beiden Stationen nicht in der gleichen Stadt liegen sollen. Die Hauptregion dieser Untersuchung ist das Mittelland der Ost- und Zentralschweiz. Die Intention ist, dass Belastungstage grossräumig auftreten, weil es für kleinräumige Grenzwertüberschreitungen keine Informationen oder Interventionen und späterhin schon gar keine Prognosen gibt.

Das Stationspaar ZH-Kaserne – Sedel erwies sich als das repräsentativste für die Untersuchung überregionaler Belastungssituationen und wurde also als das Paar bestimmt, mit welchem die Belastungstage eruiert werden. An einem Belastungstag sind durchschnittlich 80% der Mittellandstationen von einer Grenzwertüberschreitung betroffen. Mit der gewählten Definition von Belastungstagen werden überregionale Belastungssituationen für PM10 gut erfasst. Je höher eine PM10-Konzentration an einem Standort ist, desto wahrscheinlicher ist es, dass sie an einem Belastungstag vorkommt.

In den Winterhalbjahren 2001-2012 gab es 55 Belastungsphasen (hintereinander folgende Belastungstage) mit insgesamt 136 Belastungstagen, durchschnittlich 2.5 Tage pro Belastungsphase. Am meisten solche Phasen gab es im Januar und im Februar.

Abgesehen vom Extremwinterhalbjahr 2005/06 zeigt sich eine abnehmende Tendenz in der Häufigkeit von Belastungsphasen. Dies ist ein Hinweis auf eine generell abnehmende PM10-Belastung.

Die Hälfte aller Belastungsphasen besteht aus Einzeltagen, ein Viertel aus Phasen zu zwei Tagen. Immerhin kommt knapp die Hälfte aller Belastungstage in Phasen von mehr als 3 Tagen vor.

Die Belastungstage fallen zu 3/4 mit den Wetterlagen 'indifferente Ostlage', 'Hoch über den Alpen' und 'Hoch über Mitteleuropa' zusammen; die mittleren PM10-Konzentrationen an Belastungstagen hängen aber nicht von der Grosswetterlage ab.

### **Informationsschwelle gemäss BPUK-Konzept**

Die Informationsschwelle gemäss BPUK-Konzept wird relativ selten erreicht. In den elf Winterhalbjahren 2001-2012 geschah dies in der Zentralschweiz in fünf Fällen, in der Ostschweiz in drei Fällen. Allerdings waren es in der Zentralschweiz immerhin 40 Tage, welche retrospektiv in eine Phase mit Informationsstufe nach

BPUK-Konzept gefallen sind (30% aller Belastungstage), in der Ostschweiz waren es 24 Tage:

**Erreichung der Informationsstufe nach BPUK-Konzept retrospektiv:**

5.-13.1.2002	Zentralschweiz
19.-26.2.2003	Zentralschweiz und Ostschweiz
12.-16.1.2006	Zentralschweiz und Ostschweiz
27.1.-6.2.2006	Zentralschweiz und Ostschweiz
12.-18.2.2010	Zentralschweiz

**Beendigung von Belastungsphasen**

Deutliche Abnahmen der Dauer von Inversionen, insbesondere von Bodeninversionen, welche auch prognostiziert werden können, sind gute Indikatoren für eine Beendigung von Belastungsphasen.

Generell ist die Beendigung einer Belastungsphase offensichtlich mit einem Luftmassenwechsel verbunden, welcher oft mit aufkommendem Wind und bisweilen mit Niederschlag einhergeht.

**PM10-Anstiege**

Als "nachhaltiger" PM10-Anstieg wird eine PM10-Zunahme von mehr als  $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$  während 24 Stunden definiert, welche nicht durch eine kurzzeitige Spitze verursacht wird, sondern einen verharrenden Charakter aufweist. Da die Halbstundenreihen der PM10-Werte grosse Fluktuationen aufweisen, mit kurzzeitigen Spitzen, teilweise auch messtechnischen Ursprungs, war zur Detektion solcher Anstiege ein zweistufiges Verfahren notwendig (s. Bericht).

Die gewählte Methodik ist geeignet, nachhaltige und über mehr als einen Tag andauernde PM10-Anstiege zu detektieren und sie von nur kurzfristigen Spitzen zu unterscheiden. Gut die Hälfte dieser Anstiege steht im Zusammenhang mit einer Belastungsphase. Drei Viertel der Belastungsphasen weisen einen solchen Anstieg im Vorfeld auf.

Bezüglich Anstiegsdauer, maximalem Anstieg und Dauer der Belastungsphase besteht lediglich die Tendenz, dass starke und/oder langanhaltende Anstiege eher gemeinsam bei Zürich-Kaserne und Sedel erfolgen und eher zu Belastungsphasen führen.

### **PM10-Anstiegsphasen**

In Anstiegsphasen nehmen sowohl die PM10- als auch die NO<sub>x</sub>- und NO<sub>2</sub>-Konzentrationen in ähnlichem Masse zu; dies bedeutet, dass die Prozesse, die zu erhöhten PM10-Konzentrationen führen, zu einem erheblichen Anteil auch auf die Stickoxide wirken. Allerdings weisen höhere NO<sub>2</sub>-Konzentrationen auch auf erhöhte Nitratbildung hin.

Anstiegsphasen – vor allem im Vorfeld einer Belastungsphase – kamen in den 11 Winterhalbjahren im Mittel bei deutlich unterdurchschnittlichen Temperaturen vor. Dies kann zumindest zum Teil damit erklärt werden, dass diese Anstiege im Januar/Februar konzentriert sind, wo es kälter ist. Allerdings 'hilft' die tiefe Temperatur offensichtlich auch bei der Ausbildung von PM10-Anstiegen, insbesondere im Vorfeld einer Belastungsphase.

In Anstiegsphasen zeigt sich eine markant höhere Häufigkeit von Bodeninversionen im Vergleich zu Inversionslagen ohne starken PM10-Anstieg. Diese Schicht, zeitweise im Zusammenspiel mit darüber liegenden Schichten, z.B. einer zweiten Inversion, dürfte eine Schlüsselrolle für 'nachhaltige PM10-Anstiege' spielen.

Eine Rolle der Globalstrahlung im Sinne einer Auslösung oder wesentlichen Unterstützung von Anstiegsphasen kann nicht erkannt werden.

Alle Ergebnisse bezüglich meteorologischer Einflussgrößen stehen in Einklang mit der Studie "Influence of meteorology on PM10 trends and variability in Switzerland from 1991 to 2008" von I. Barnpadimos, C. Hueglin et al. (PSI und EMPA).

### **Indikatormodell**

Zur Entwicklung einer Strategie für die Verbesserung der Prognose von PM10-Belastungsphasen muss zunächst die Entstehung und die Ausgestaltung von PM10-Belastungsphasen verstanden werden: PM10-Konzentrationen sind das Produkt eines Systems mannigfaltiger komplexer Prozesse, deren Parameter uns zum Teil direkt, zum Teil indirekt, zum Teil gar nicht zur Verfügung stehen. Hohe PM10-Konzentrationen können durch sehr unterschiedliches Zusammenwirken solcher Prozesse entstehen, an welchen die untersuchten Parameter in unterschiedlichem Masse beteiligt sind.

In Konsequenz zeigen die untersuchten Parameter teilweise deutlich veränderte Mittelwerte und Mediane im Vergleich zum Wintermittel für Belastungs- und Anstiegsphasen, aber in jedem Fall breite Streuungen. Auch bei Hinzunahme weite-

rer Messparameter würden sich die Streuungen systemimmanent nicht stark verringern.

In weiterer Konsequenz ist es nicht möglich, die PM10-Konzentration z.B. des Folgetages 'präzise' vorauszusagen. Grundsätzlich ist es aber möglich, Wahrscheinlichkeiten des Auftretens bestimmter Konzentrationsbereiche zu schätzen, z.B. eine erhöhte Wahrscheinlichkeit bzw. eine stark erhöhte Wahrscheinlichkeit für eine Belastungsphase.

Im hier entwickelten Indikatormodell werden diejenigen Parameter (→ Indikatoren) herangezogen, deren Mittelwert in Anstiegsphasen und an Belastungstagen sich deutlich vom Wintermittel unterscheidet. Daraus wird der 'A-Indikator' gebildet (Indikator für nachhaltige PM10-Anstiege):

- NO<sub>2</sub>
- Temperatur
- Windgeschwindigkeit
- Inversion:
  - Häufigkeit
  - Dynamik Untergrenze
  - Anteil Bodeninversion

Aus dem 'A-Indikator' und dem Ausgangswert der PM10-Konzentration zu Beginn einer Anstiegsphase bzw. eines Tages wird der 'B-Indikator' (PM10-Belastungsindikator) gebildet. Der 'B-Indikator' ist ein Mass für die Wahrscheinlichkeit des Auftretens eines Belastungstages bzw. eines BPUK-Tages.

Mit dem B-Indikator werden alle gegenwärtig erfassbaren Einflussparameter für erhöhte PM10-Werte in einer einzigen Zahl zusammengefasst. Für eine spätere verbesserte Prognose von Belastungsphasen müssten diese relevanten Parameter prognostiziert werden, was zurzeit nur zum Teil der Fall ist. Die Prognosen im Inversionswetterbericht von MeteoSchweiz müssten im Hinblick auf eine Adaptierung für das Indikatormodell teilweise geändert werden.

Möglicherweise könnten die Profilmessungen von MeteoSchweiz einerseits das Indikatormodell verbessern und andererseits und vor allem die Prognosefähigkeit für die Inputparameter des Indikatormodells verbessern.

# Begriffserklärungen

Grenzwertüberschreitung	Tagesmittel PM10 > 50 µg/m <sup>3</sup>
Überschreitungstag	Tag mit PM10-Grenzwertüberschreitung an mindestens einer Station im Untersuchungsgebiet von Ost- und Zentralschweiz. 462 Überschreitungstage in Ost- und Zentralschweiz in den Winterhalbjahren 2001-2012.
Überschreitungstag an Station X	Tag mit PM10-Grenzwertüberschreitung an Station X
Singulärer Überschreitungstag	An genau 1 Station ist an diesem Tag der Grenzwert überschritten
Paarweiser Überschreitungstag	An genau 2 Stationen ist an diesem Tag der Grenzwert überschritten
Belastungstag	Zürich-Kaserne und Sedel weisen simultan eine Grenzwertüberschreitung auf. 136 Belastungstage in den Winterhalbjahren 2001-2012.
Belastungsphase	Ununterbrochene Folge von Belastungstagen, einzelne Belastungstage sind eintägige Belastungsphasen. 55 Belastungsphasen in den Winterhalbjahren 2001-2012.
BPUK-Tag	Tag, welcher retrospektiv einer Phase mit Informationsstufe gemäss BPUK-Konzept angehört (Tagesmittel PM10 > 75 µg/m <sup>3</sup> an zwei Stationen einer Region und danach mind. drei Tage > 50 µg/m <sup>3</sup> ). In den Winterhalbjahren 2001-2012 40 BPUK-Tage in der Zentralschweiz und 24 in der Ostschweiz.
Anstiegsphase	Phase mit einer PM10-Zunahme von mehr als 20 µg/m <sup>3</sup> während 24 Stunden, welche nicht durch eine kurzzeitige Spitze verursacht wird, sondern einen verharrenden Charakter aufweist.
Winterhalbjahr	1. Oktober – 31. März
A-Indikator	Indikator für eine nachhaltige Anstiegsphase
B-Indikator	Indikator für eine Belastungsphase

# Abkürzungsverzeichnis

TP	Temperaturprofil
RR	Niederschlag
WIGE	Windgeschwindigkeit
STRGLO	Globalstrahlung
WHj	Winterhalbjahr
Inv.tag	Inversionstag (>80% Inversionshäufigkeit; Tage ohne Anstiegsphasen)
APh o. BPh	Nachhaltige PM10-Anstiegsphasen ohne Belastungsphase
APh mit BPh	Nachhaltige PM10-Anstiegsphasen im Vorfeld einer Belastungsphase
CAP	"Cluster Analysis of Principal Component": Die Wetterlagenklassen basieren auf den Analyse- und Vorhersagedaten des ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts)

# 1. Einleitung

In diesem Projekt wird die PM10-Situation in der Ost- und Zentralschweiz in den Winterhalbjahren von 2001/02 bis 2011/12 an insgesamt 31 Stationen untersucht. Die Liste dieser 31 Stationen mit ihren Messzeiten findet sich in Anhang A1.

Die Meteorologie und die Bildungsprozesse von Partikeln während PM10-Belastungsphasen sollen besser verstanden werden. Dabei geht es einerseits um Phasen mit erhöhten PM10-Tagesmittelwerten und andererseits um das Erfassen nachhaltiger Anstiege des PM10, welche zu solch erhöhten Tagesmitteln führen. Die Vorgänge, welche zu erhöhten PM10-Konzentrationen führen, sind mannigfaltig und komplex. Das Ziel dieser Studie ist die Evaluierung von Parametern, welche auf hohe PM10-Werte hinweisen. Damit sollen Grundlagen geschaffen werden, Prognosen bevorstehender PM10-Spitzenbelastungen und damit möglicherweise auch die Prävention zu verbessern.

Von den insgesamt 31 Messstationen der Untersuchungsregion waren je Tag minimal 11 und maximal 22 im Einsatz. Hohe PM10-Konzentrationen streuten räumlich und zeitlich ebenfalls teilweise stark. Aus diesem Grunde musste oft mit Verhältnissen (Prozentzahlen) gearbeitet werden, um allgemeine Aussagen treffen zu können.

## 2. Charakterisierung erhöhter PM10-Konzentrationen in der Zentral- und Ostschweiz

Als Merkmal erhöhter PM10-Konzentration wird in diesem Kapitel ein Tagesmittelwert von mehr als  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  verstanden. Diese erhöhten Konzentrationen werden nun im räumlichen und zeitlichen Überblick diskutiert.

### 2.1. Überschreitungshäufigkeit des PM10-Grenzwertes im Winterhalbjahr im geografischen Überblick

#### 2.1.1. Methodik

Da die Messzeiten an den insgesamt 30 Stationen sehr unterschiedlich sind, musste für einen vergleichbaren Überblick eine Normierung gefunden werden. Sinn der Normierung ist, dass fehlende Messzeiten möglichst keine Rolle spielen für die resultierende Häufigkeit von Grenzwertüberschreitungen.

Basis der Normierung bilden 6 Leitstationen (Frauenfeld, Konstanz, Zürich-Kaserne, Zürich-Stampfenbachstrasse, Sedel und Zug), an welchen fast immer in den Winterhalbjahren 2001-2012 gemessen wurde. Die Winterhalbjahre wurden extra für diese Darstellung je Kalenderjahr zusammengefasst, um die einjährigen Messkampagnen erfassen zu können.

Die Normierung je Messstation wird in Anhang A1 beschrieben, zusammen mit einer grafischen Darstellung der Messdatenverfügbarkeit je Station.

#### 2.1.2. Ergebnis

Das Ergebnis der Normierung stellt eine Karte des Ostluft- und in-luft-Gebietes dar mit der Häufigkeit von Grenzwertüberschreitungen von PM10 in den Winterhalbjahren 2001-2012 an allen 30 betrachteten Stationen.

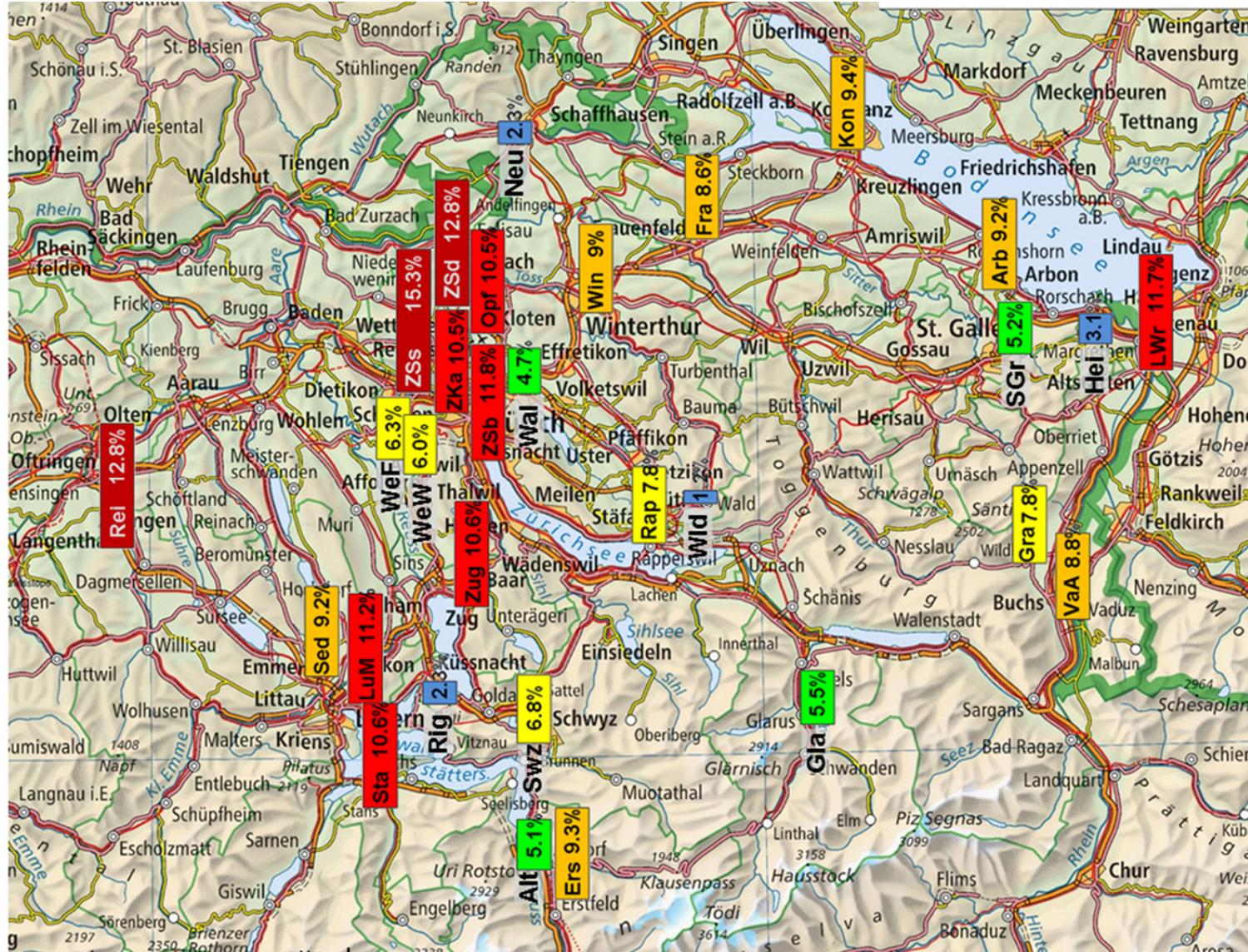


Abbildung 2.1: Normierter Anteil von Tagesmitteln mit  $PM_{10} > 50 \mu g/m^3$ , Winterhalbjahre 2001-2012. Die Zuordnung der Stationsnamen zu den Abkürzungen findet sich in Anhang A1.

## 2.2. Räumliches Auftreten der Überschreitungstage

In den Winterhalbjahren 2001-2012 gab es insgesamt 462 Tage, an welchen zumindest eine Station im Raum Zentralschweiz/Ostschweiz eine PM10-Grenzwertüberschreitung aufwies, sogenannte Überschreitungstage. In diese Betrachtung wurden alle jeweils gemessenen Stationen ausser Rigi, Wald, Heiden, Wettswil und Lustenau einbezogen. An den Überschreitungstagen gab es jeweils unterschiedliche **Prozentsätze** der gemessenen Stationen, welche eine Grenzwertüberschreitung aufwiesen. Wurde z.B. an einem solchen Tag an 20 Stationen gemessen und wiesen 4 Stationen eine Grenzwertüberschreitung auf, so waren dies also 20% aller gemessenen Stationen; ebenso bei 15 gemessenen Stationen und 3 mit Grenzwertüberschreitung. Die tägliche Anzahl verfügbarer Stationen schwankte stark zwischen 11 und 22; alle 426 Tage können nur so gemeinsam dargestellt werden, indem sie in Klassen dieser Prozentsätze (von Messstationen mit GW-Überschreitung) eingeteilt werden: 0-10%, 10-20% .... 90-100%. Die Häufigkeit dieser Klassen wird in der folgenden Grafik dargestellt (rote Säulen); die Summe der Häufigkeiten über alle Klassen ergibt 100%.

Die gleiche Aufteilung nach Prozentsätzen von Messstationen mit Grenzwertüberschreitung kann auch für die 208 Tage gemacht werden, an welchen bei Zürich-Kaserne der Grenzwert überschritten wurde (blaue Säulen).

Die folgende Grafik zeigt diese Verteilung des Anteils an Stationen mit Grenzwertüberschreitung je Fall.

Lesebeispiel: An knapp 25% aller Tage, an welchen zumindest eine Station im Untersuchungsgebiet eine Grenzwertüberschreitung auswies, wiesen weniger als 10% aller gemessenen Stationen eine Grenzwertüberschreitung auf; an 10% aller Tage (46), an welchen zumindest eine Station eine Grenzwertüberschreitung auswies, wiesen über 90% aller Stationen eine Grenzwertüberschreitung auf.

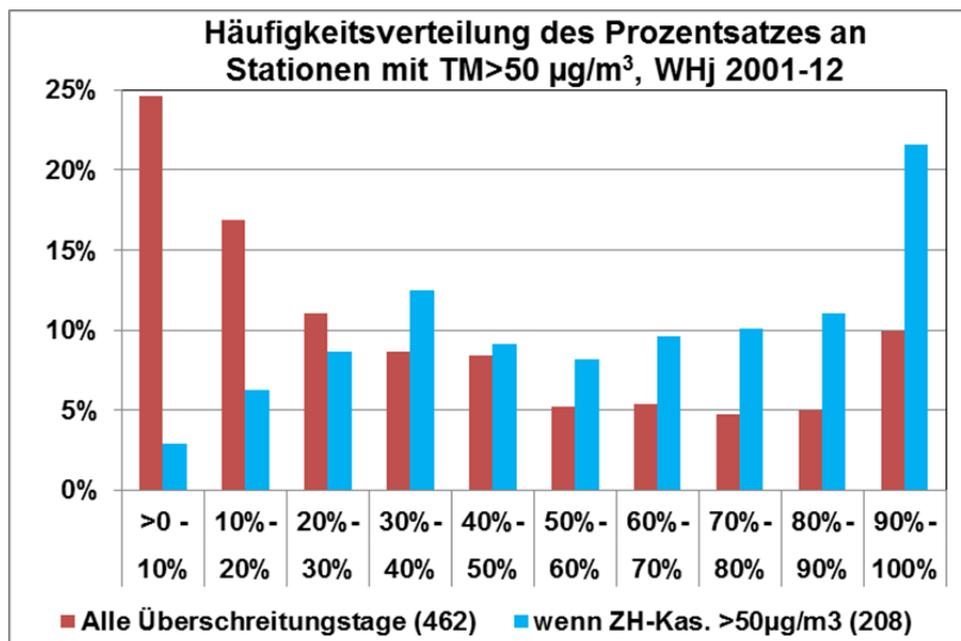


Abbildung 2.2: Häufigkeitsverteilung des Prozentsatzes an Stationen mit Tagesmittel (TM) > 50 µg/m³ für die beiden Fälle: (i) 462 Tage mit mind. einer Station > 50 µg/m³; (ii) 208 Tage mit > 50 µg/m³ PM10 bei ZH-Kaserne. Lesebeispiel s. oben.

Ein grosser Teil der Überschreitungstage zeigt einen lokalen Charakter. Überregionale "PM10-Suppen" machen nur einen kleinen Teil der Überschreitungstage aus. Die Station ZH-Kaserne weist eine beträchtliche Repräsentanz für das Mittelland auf: Überschreitungstage an dieser Station zeigen sich zu einem grossen Prozentsatz auch an vielen anderen Orten, doch auch hier werden die grossen regionalen Unterschiede klar.

Die insgesamt 462 Überschreitungstage in der Region Zentralschweiz/ Ostschweiz können, was das räumliche Auftreten von Überschreitungen betrifft, wie folgt aufgeteilt werden:

Tabelle 2.1: Aufteilung der 462 Überschreitungstage (mindestens eine Station im Raum Zentralschweiz/ Ostschweiz mit PM10-Tagesmittel > 50 µg/m³):

Genau 1 Station mit TM > 50 µg/m³	116 Tage
Genau 2 Stationen mit TM > 50 µg/m³	58 Tage
3 oder mehr Stationen mit TM > 50 µg/m³	288 Tage
<b>TOTAL Überschreitungstage</b>	<b>462 Tage</b>

Auch bei höheren PM10-Konzentrationen finden sich deutliche räumliche Unterschiede. Aber je höher die Konzentration bei ZH-Kaserne ist, desto grösser ist der Anteil der Stationen, welche zumindest den Grenzwert überschreiten, wie folgende Grafik zeigt.

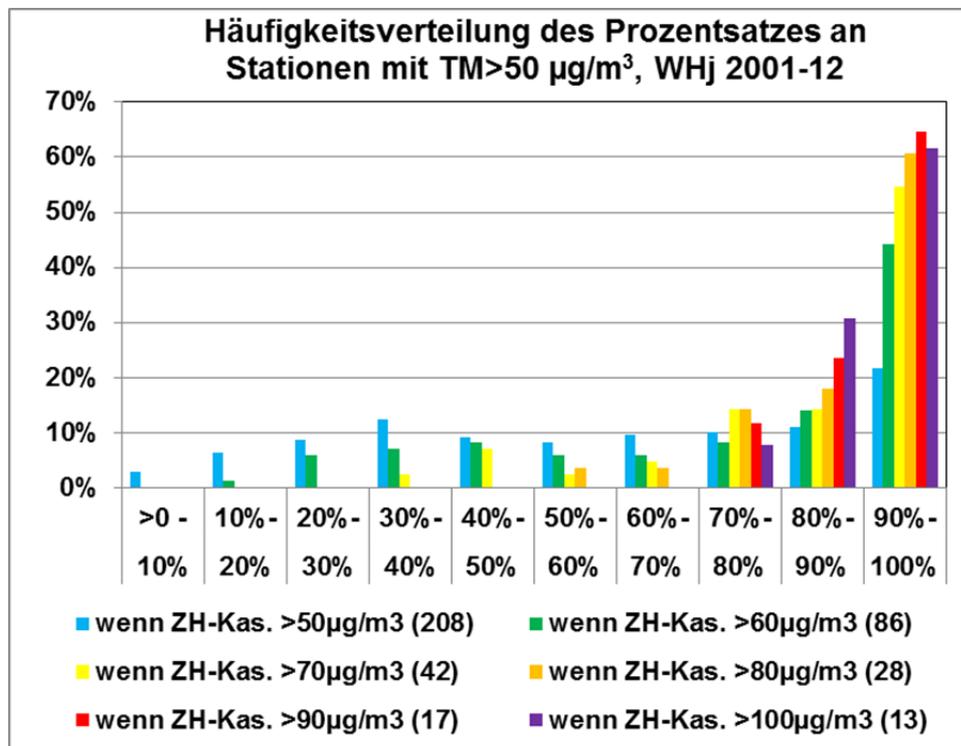


Abbildung 2.3: Häufigkeitsverteilung des Prozentsatzes an Stationen mit Tagesmittel (TM)  $> 50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  für die Tage mit den folgenden Schwellenwerten für PM10: (i) 208 Tage mit  $> 50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ; (ii) 86 Tage mit  $> 60 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ; (iii) 42 Tage mit  $> 70 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ; (iv) 28 Tage mit  $> 80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ; (v) 17 Tage mit  $> 90 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ; (vi) 13 Tage mit  $> 100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Lesebeispiel s. oberhalb von Abbildung 2.2.

### 2.3. Singuläre und paarweise Grenzwertüberschreitungen für PM10

Tage, an welchen nur eine oder zwei Stationen im gesamten Untersuchungsgebiet eine Grenzwertüberschreitung verzeichnen, machen 38% aller 462 Tage mit Grenzwertüberschreitung aus. Einzelfälle mögen zufällig sein; aber die systematische Untersuchung über 11 Winterhalbjahre zeigt auch Standorteigenschaften auf, welche von Interesse bezüglich Grenzwerteinhaltung sein könnten. Auch wenn es sich bei diesen Tagen gerade nicht um Belastungsphasen handelt, erscheint deren Kenntnis für das Gesamtverständnis der PM10-Situation sinnvoll.

Die folgende Tabelle listet alle singulären und paarweisen Grenzwertüberschreitungen nach Station bzw. Stationspaar wie folgt auf:

- Die erste Spalte zeigt die Anzahl singuläre Überschreitungstage je Station; das sind jene Tage, an welchen es im gesamten Untersuchungsgebiet nur gerade an der betreffenden Station eine Grenzwertüberschreitung gegeben hat.
- Die zweite Spalte zeigt das Total der paarweisen Überschreitungstage je Station; das sind jene Tage, an welchen es an der betreffenden Station eine Grenzwertüberschreitung simultan mit einer einzigen anderen Station gegeben hat.
- Ab der dritten Spalte wird gezeigt, mit welcher anderen Station es jeweils eine paarweise Grenzwertüberschreitung gegeben hat.

	Singuläre Überschreitungstage	Paarweise Überschreitungstage																																
		TOTAL	Arbon	Frauenfeld	Glarus	Grabs	Heiden	Konstanz	Neuhausen	Opfikon	Rapperswil	St. Gallen R	Vaduz Au	Vaduz M	Wald	Wallisellen	Wettswil F	Wettswil W	Winterthur	ZH-Schimmelstr	ZH-Schwamendingen	ZH-Stampfenbachstr	ZH-Kaserne	Rigi	Altdorf	Erstfeld	Luzern	Reiden	Schwyz	Sedel	Stans	Zug	Lustenau WR	
Arbon	1	0																																
Frauenfeld	3	7					1												2		1							3						
Glarus	1	1				1																												
Grabs	3	15				1							3	1					1		1							1				2	5	
Heiden	0	0																																
Konstanz	14	10		1						1										1	1							1		1			4	
Neuhausen	0	0																																
Opfikon	0	2					1																					1						
Rapperswil	2	0																																
St. Gallen R	1	0																																
Vaduz Au	1	3																																
Vaduz M	0	1					1																											
Wald	0	0																																
Wallisellen	0	0																																
Wettswil F	1	0																																
Wettswil W	0	0																																
Winterthur	10	4		2		1																										1		
ZH-Schimmelstr	16	12					1																					3	1					
ZH-Schwamendingen	2	4				1	1																					1					1	
ZH-Stampfenbachstr	0	5		1																														
ZH-Kaserne	5	3																															1	
Rigi	1	1																																
Altdorf	5	1																																
Erstfeld	4	2																															1	
Luzern	3	6																													2	1	1	2
Reiden	19	12		3		1	1		1																									
Schwyz	0	2																																
Sedel	0	5					1																										1	
Stans	4	3																																
Zug	1	5					2																											
Lustenau WR	19	12					5		4																									

Tabelle 2.2: Singuläre und paarweise Grenzwertüberschreitungen im Gebiet von Zentralschweiz/Ostschweiz/Lustenau, Winterhalbjahre 2001-2012. Erklärung zum Tabellenaufbau s. oberhalb der Tabelle.

Fünf Standorte weisen eine relativ hohe Anzahl singulärer und paarweiser PM10-Überschreitungstage auf. Es sind dies Winterthur, Reiden und ZH-Schimmelstrasse sowie Lustenau WR und Konstanz. Bei Winterthur könnte es sich um einen lokalen Stadteffekt handeln. Lustenau WR und Konstanz, beides Hintergrundstationen ohne geografischen Bezug, weisen 4 paarweise Überschreitungstage und viele singuläre auf; sie haben eigentlich nur die Messtechnik gemeinsam. Reiden und ZH-Schimmelstrasse sind die am meisten verkehrsexponierten Stationen; sollte der Verkehr nicht die Ursache dafür sein, könnte es sich bei der Zürcher Station allenfalls um eine lokale wiederkehrende Emission handeln. Bei Reiden müsste es sich in diesem Fall angesichts einer Mindestdistanz von 150 - 200 m der nächsten Gebäude und dem offenen Gelände um eine massive PM10-Quelle handeln; landwirtschaftliche Erdarbeiten wie Pflügen liefern kaum PM10, die früher durchgeführte Verbrennung von Schlagabraum könnte eher in Frage kommen. Angesichts der 'Verkehrsfrage' wäre die weitere Untersuchung der isolierten Grenzwertüberschreitungen an diesen beiden Stationen reizvoll, kann aber im Rahmen des bestehenden Projektes nicht geleistet werden.

Die Stationen im Rheintal weisen mehrere Paare von isolierten Grenzwertüberschreitungen auf; teilweise ist diese Region also tatsächlich immissionsmeteorologisch vom Mittelland abgekoppelt.

**Fazit zu Kap. 2:**

**Die grössten Häufigkeiten an Grenzwertüberschreitungen von PM10 finden sich in den Städten Zürich/Luzern/Zug zusammen mit Stans, Reiden-A2 und Lustenau (höchste Belastung: Zürich-Schimmelstrasse). Der gesamte Mittellandraum in der Ost- und Zentralschweiz weist in der normierten Darstellung eine recht konsistente Belastung auf, erhöhte und etwas abgelegene Standorte (auch Region Wettswil) weisen geringere aber durchaus plausible und konsistente Werte auf. Überraschend sind die tiefen Werte bei Heiden und vor allem bei Neuhausen.**

**Ein grosser Teil der insgesamt 462 Überschreitungstage zeigt einen lokalen Charakter. Überregionale "PM10-Suppen" machen nur einen kleinen Teil der Überschreitungstage aus. Nur an 46 Tagen in den elf Winterhalbjahren weisen jeweils über 90% aller Stationen eine Grenzwertüberschreitung auf.**

**Mehr als ein Drittel aller Überschreitungstage für PM10 sind singuläre oder paarweise Überschreitungstage, an welchen nur genau eine oder zwei Stationen eine Überschreitung aufweisen.**

**Die singulären und paarweisen Überschreitungstage sind sehr ungleich über die 30 Stationen verteilt. Am meisten solche Überschreitungstage weisen strassennahe Stationen, solche im Rheintal sowie das Paar Lustenau/Konstanz auf.**

## 3. PM10-Belastungsphasen

### 3.1. Methodik

An "PM10-Belastungstagen" soll grundsätzlich an zwei Stationen einer Region das Tagesmittel von PM10 grösser als  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  sein, wobei die beiden Stationen nicht in der gleichen Stadt liegen sollen. Die Hauptregion dieser Untersuchung ist das Mittelland der Ost- und Zentralschweiz. Die Intention ist, dass Belastungstage grossräumig auftreten, weil es für kleinräumige Grenzwertüberschreitungen keine Informationen oder Interventionen und späterhin schon gar keine Prognosen gibt.

In den elf Winterhalbjahren 2001-2012 gab es 343 Tage, an welchen im Mittelland mindestens an zwei Stationen Grenzwertüberschreitungen auftraten; im Mittel war dabei jeweils nur gerade die Hälfte der Mittellandstationen von Grenzwertüberschreitungen betroffen. Dies ist zu wenig flächendeckend für einen Belastungstag, und es wäre in der Praxis einer Prognose nicht zu handhaben. Es erschien besser, zwei feste Stationen mit breiter Repräsentanz auszuwählen.

Aufgrund der Vorarbeiten erschien Zürich-Kaserne (urbaner Hintergrund in der Mitte der Untersuchungsregion; wenig Datenausfälle) als eine der beiden Stationen als gegeben. Als zweite Station wurden Sedel, Zug und Konstanz untersucht. Sie liegen zusammen mit ZH-Kaserne auf einer langgezogenen SW-NE-Achse durch das Mittelland. Folgende Belastungstage je Stationspaar wurden ermittelt:

**Tabelle 3.1: Belastungsphasen je Stationspaar (an beiden Stationen Tagesmittel  $\text{PM}_{10} > 50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), Winterhalbjahre 2001-2012:**

Stationspaar	Anzahl Belastungstage
ZH-Kaserne - Sedel	136
ZH-Kaserne - Zug	155
ZH-Kaserne - Konstanz	146

Das Stationspaar **ZH-Kaserne – Sedel** erwies sich als das repräsentativste für die Untersuchung überregionaler Belastungssituationen und wurde also als das Paar bestimmt, mit welchem die Belastungstage eruiert werden. An einem Belastungstag sind durchschnittlich 80% der Mittellandstationen von einer Grenzwertüberschreitung betroffen.

Das Auftreten von simultanen Grenzwertüberschreitungen an den untersuchten vier Stationen, welche weit auseinander liegen, stellt sich für die 136 Belastungstage wie folgt dar:

**Tabelle 3.2: Simultane Grenzwertüberschreitungen an den Stationen Zürich-Kaserne, Sedel, Zug und Konstanz an den Belastungstagen, bestimmt mit dem Stationspaar ZH-Kaserne-Sedel, Winterhalbjahre 2001-2012:**

Grenzwertüberschreitungen PM10	Anzahl Belastungstage
an ZH-Kaserne, Sedel, Zug und Konstanz	96
an ZH-Kaserne, Sedel und Zug	28
An ZH-Kaserne, Sedel und Konstanz	6
nur an ZH-Kaserne und Sedel	6

An 70% der Belastungstage weist die gesamte Mittellandachse von Sedel bis Konstanz eine Grenzwertüberschreitung auf. Nur an 6 von 136 Tagen mit Grenzwertüberschreitung bei ZH-Kaserne und Sedel weisen weder Zug noch Konstanz eine Grenzwertüberschreitung auf.

Als **Belastungsphase** wird eine Folge von Belastungstagen bezeichnet, wobei auch einzelne Belastungstage als eintägige Belastungsphasen bezeichnet werden.

**Fazit zu Kap. 3.1:**

***Das Stationspaar ZH-Kaserne – Sedel ist repräsentativ für die Untersuchung überregionaler Belastungssituationen beim PM10. An 70% der Belastungstage weist die gesamte Mittellandachse von Sedel bis Konstanz eine Grenzwertüberschreitung auf. Nur an 6 von 136 Tagen mit Grenzwertüberschreitung bei ZH-Kaserne und Sedel weisen weder Zug noch Konstanz eine Grenzwertüberschreitung auf.***

## 3.2. Zeitliches Auftreten der Belastungsphasen

In den Winterhalbjahren 2001-2012 gab es 55 Belastungsphasen mit insgesamt 136 Belastungstagen, durchschnittlich 2.5 Tage pro Belastungsphase. Am meisten solche Phasen gab es im Januar und im Februar. Die Häufigkeit im Dezember und im März war vergleichbar, Oktober und November wiesen die geringste Anzahl Belastungsphasen auf.

Abgesehen vom Extremwinterhalbjahr 2005/06 zeigt sich eine abnehmende Tendenz in der Häufigkeit von Belastungsphasen.

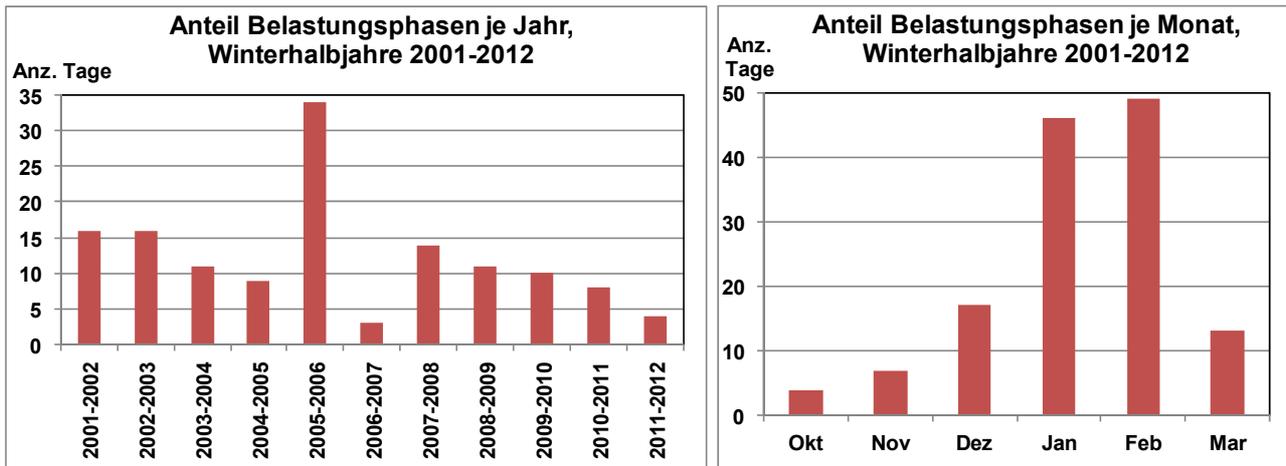


Abbildung 3.1: Anteil Belastungsphasen je Winterhalbjahr (links) bzw. je Monat (rechts), Winterhalbjahre 2001-2012.

Im mittleren Wochengang zeigt sich das Maximum an Belastungstagen am Mittwoch und Freitag, das Minimum Montag und Dienstag. Das Auftreten des Minimums könnte mit den emissionsärmeren Wochenenden zusammenhängen, als Beleg ist der Effekt allerdings zu gering.

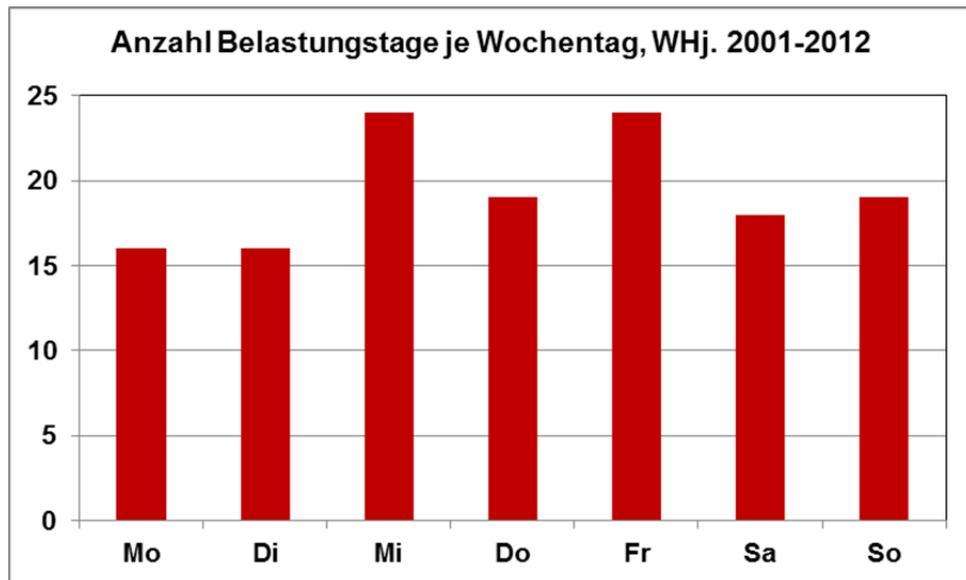


Abbildung 3.2: Anteil Belastungsphasen je Wochentag, Winterhalbjahre 2001-2012.

Trotz der Bedingung der paarweisen Grenzwertüberschreitung bestand die Hälfte aller Belastungsphasen aus Einzeltagen:

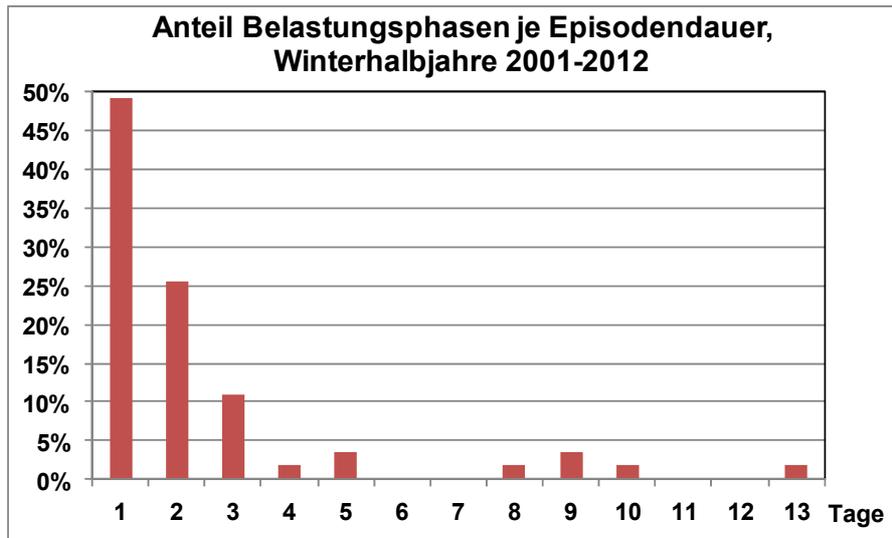


Abbildung 3.3: Aufteilung der Belastungsphasen je Episodendauer, Winterhalbjahre 2001-2012.

Die Verteilung der 136 Belastungstage in Phasen kann wie folgt zusammengefasst werden:

Tabelle 3.3: Verteilung der Belastungstage in Phasen:

Dauer	Anzahl Belastungsphasen	Anteil an Belastungsphasen	Anteil an Belastungstagen
1 – 2 Tage	41	75%	40%
3 Tage	6	11%	14%
> 3 Tage	8	14%	46%
> 4 Tage	7	13%	43%

Die 7 Phasen > 4 Tage enthalten die 5 BPUK-Phasen.

Die Tabelle im Anhang A2 listet sämtliche 55 Belastungsphasen auf, zusammen mit Datum und Betrag des höchsten PM10-Tagesmittels.

Nach BPUK-Konzept wäre die Informationsstufe retrospektiv (Tagesmittel PM10 > 75 µg/m<sup>3</sup> an zwei Stationen einer Region und danach mindestens drei Tage > 50 µg/m<sup>3</sup>) wie folgt aufgetreten:

Tabelle 3.4: Erreichung der Informationsstufe nach BPUK-Konzept retrospektiv:

5.-13.1.2002	Zentralschweiz
19.-26.2.2003	Zentralschweiz und Ostschweiz
12.-16.1.2006	Zentralschweiz und Ostschweiz
27.1.-6.2.2006	Zentralschweiz und Ostschweiz
12.-18.2.2010	Zentralschweiz

**Fazit zu Kap. 3.2:**

**Die Hälfte aller Belastungsphasen besteht aus Einzeltagen, ein Viertel aus Phasen zu zwei Tagen. Immerhin kommt knapp die Hälfte aller Belastungstage in Phasen von mehr als 3 Tagen vor. 70% aller Belastungstage ereignen sich in den Monaten Januar und Februar, ein knappes Viertel im Dezember und März.**

**Die Informationsschwelle gemäss BPUK-Konzept wird relativ selten erreicht. In den elf Winterhalbjahren 2001-2012 geschah dies in der Zentralschweiz in fünf Fällen, in der Ostschweiz in drei Fällen. Allerdings waren es in der Zentralschweiz immerhin 40 Tage, welche retrospektiv in eine Phase mit Informationsstufe nach BPUK-Konzept gefallen sind (30% aller Belastungstage).**

### 3.3. Räumliches Auftreten der Belastungsphasen

Zur Darstellung der Häufigkeitsverteilung des Anteils der Stationen mit Grenzwertüberschreitung an Belastungstagen wird die gleiche Darstellung gewählt wie für Abbildung 2.2. Zum Vergleich wird die Verteilung für alle 462 Überschreitungstage nochmals angeführt.

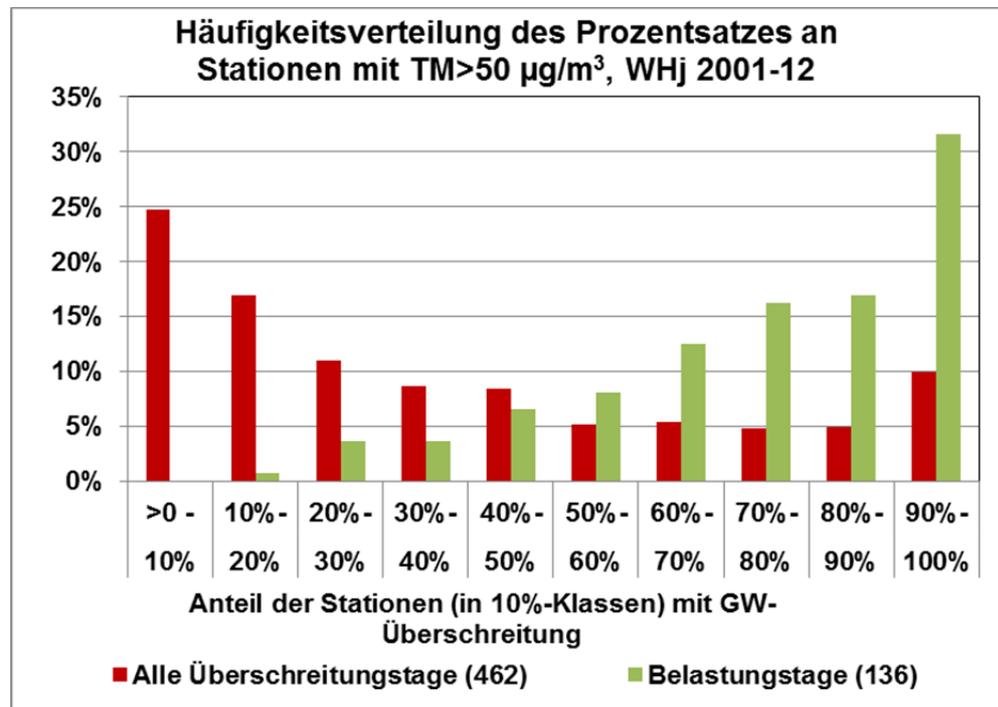


Abbildung 3.4: Häufigkeitsverteilung des Prozentsatzes an Stationen mit  $TM > 50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  für die beiden Fälle: (i) 462 Tage mit mind. einer Station  $> 50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ; (ii) 136 Belastungstage. Erklärung zur Darstellung s. oberhalb Abbildung 2.2.

Belastungsphasen zeigen eine deutliche Tendenz zu einem überregionalen Charakter, mehr als wenn nur die Grenzwertüberschreitungen an einer Station oder zwei beliebigen Stationen einer Region verwendet würden.

Wichtig für die räumliche Repräsentativität der Belastungsphasen ist auch der **Anteil der Überschreitungstage je Station**, welcher in Belastungsphasen fällt. Auch in ZH-Kaserne ist es so, dass nicht alle Überschreitungstage Belastungstage sind, weil es Überschreitungstage gibt, an welchen in Sedel der Grenzwert nicht überschritten wird (35% aller Überschreitungstage in ZH-Kaserne).

Die folgende Grafik zeigt die Anteile der Belastungsphasen an den Überschreitungstagen an allen 30 Stationen, unterteilt nach Überschreitungsschwelle je Station (>50, >60, >70 µg/m<sup>3</sup>). Dabei wurde die Stationsreihenfolge sortiert nach dem Anteil der Überschreitungstage, welcher in Belastungsphasen fällt (blaue Säulen).

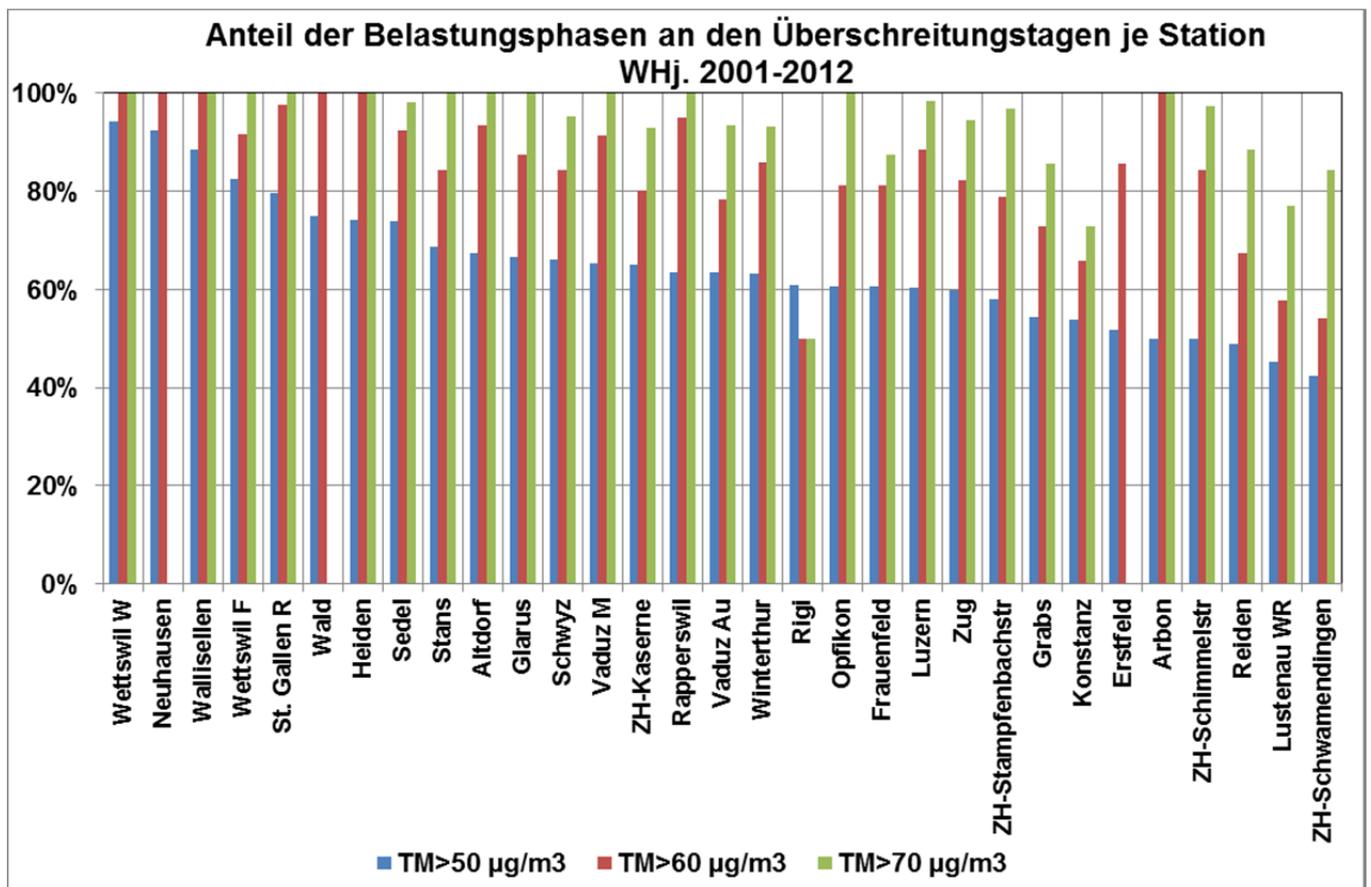


Abbildung 3.5: Anteil der Überschreitungstage (TM > 50, 60 bzw. 70 µg/m<sup>3</sup>) je Station, welche auf Belastungsphasen fallen. Winterhalbjahre 2001-2012.

Tiefe Anteile kommen eher bei strassennahen Standorten und solchen aus dem Raum Bodensee-Rheintal vor.

Grenzwertüberschreitungen  $> 50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  ereignen sich im Mittel zu etwa 2/3 in Belastungsphasen. Je höher der Schwellenwert je Station, desto höher der Anteil Überschreitungstage, welche auf Belastungstage fallen. Beim Schwellenwert  $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$  ist der Belastungsphasenanteil der Überschreitungstage bei den meisten Stationen  $\geq 80\%$ , beim Schwellenwert  $70 \mu\text{g}/\text{m}^3$  ist der Anteil überwiegend bei 90-100%, mit den Ausnahmen Lustenau, Konstanz und Rigi. Hohe und sehr hohe Belastungen kommen also im gesamten Untersuchungsgebiet ganz überwiegend in den Belastungsphasen vor, wie sie in diesem Kapitel definiert worden sind.

Auch erhöhte Standorte wie St. Gallen, Wald, Wettswil weisen zwar weniger Grenzwertüberschreitungen auf, führen bezüglich Auftreten aber kein "Eigenleben". Ausnahme: Rigi.

**Fazit zu Kap. 3.3:**

***Mit der gewählten Definition von Belastungstagen werden überregionale Belastungssituationen für PM10 gut erfasst. Grenzwertüberschreitungen  $> 50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  ereignen sich im Mittel zu etwa 2/3 in Belastungsphasen. Je höher der Schwellenwert, desto höher der Anteil Überschreitungstage, welche auf Belastungstage fallen.***

***Hohe und sehr hohe Belastungen kommen also im gesamten Untersuchungsgebiet ganz überwiegend in den Belastungsphasen vor, wie sie in diesem Kapitel definiert worden sind.***

## 3.4. Belastungsphasen und CAP-Klassen

Es stellt sich die Frage, ob bestimmte Wetterlagen die Entstehung von Belastungsphasen begünstigen. Da sich die sogenannte CAP-Klassifizierung gut im Zusammenhang mit Inversionsauftreten bewährt hat und Inversionen auch mit erhöhten PM10-Konzentrationen einhergehen, wurden die Belastungsphasen 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 3.5: 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 folgende Grafik zeigt die Häufigkeitsverteilungen der 9 CAP-Klassen für drei verschiedene Ensembles an Tagen:

- Alle Tage in den Winterhalbjahren 2001-2012;
- Belastungsphasen.

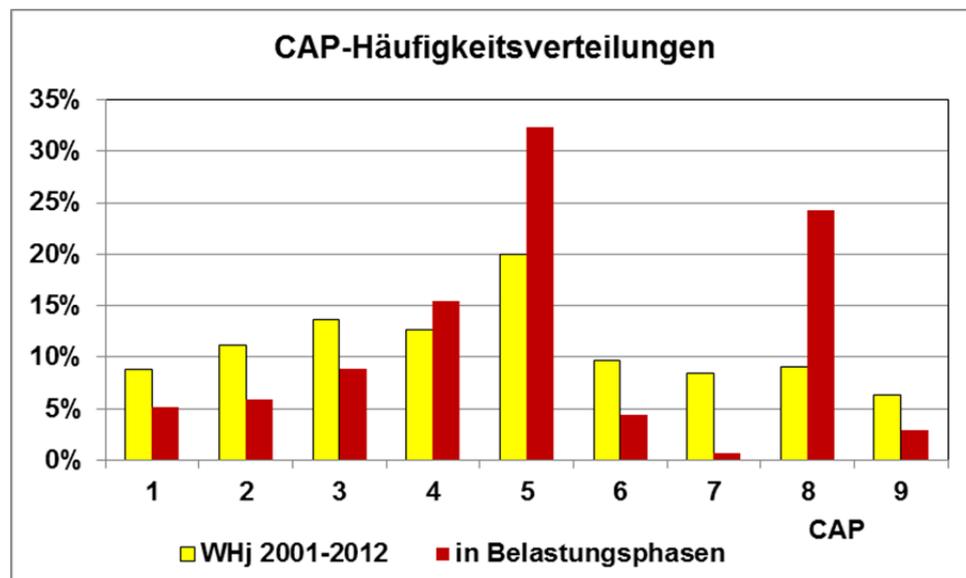


Abbildung 3.6: CAP-Häufigkeitsverteilungen für die 11 Winterhalbjahre 2001-2012 und für die 136 Tage in Belastungsphasen.

Die mittlere PM10-Konzentration in Belastungsphasen je CAP-Klasse scheint keine Systematik aufzuweisen; häufigere CAP-Klassen unterscheiden sich nicht erkennbar von weniger häufigen.

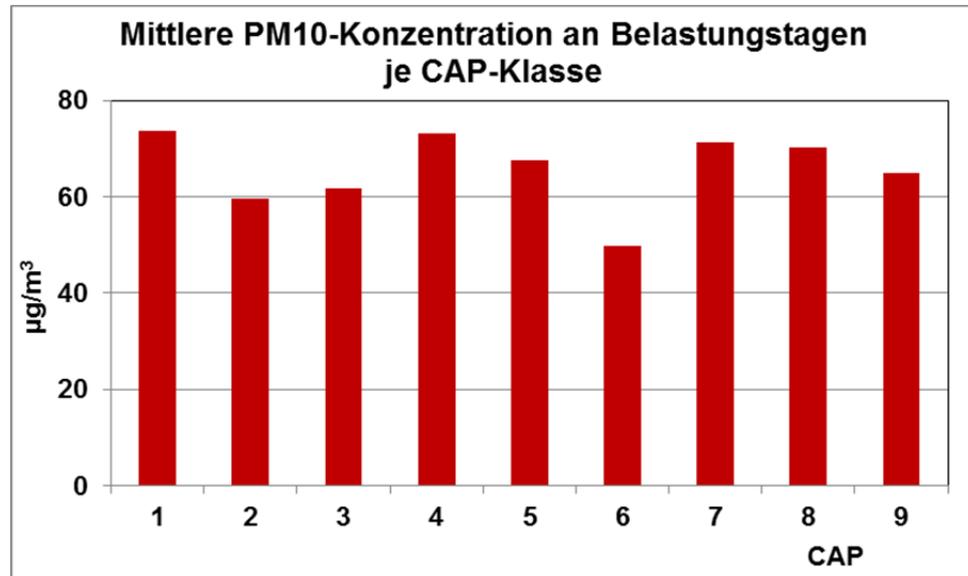


Abbildung 3.7: Mittlere PM10-Konzentration an Belastungstagen je CAP-Klasse.

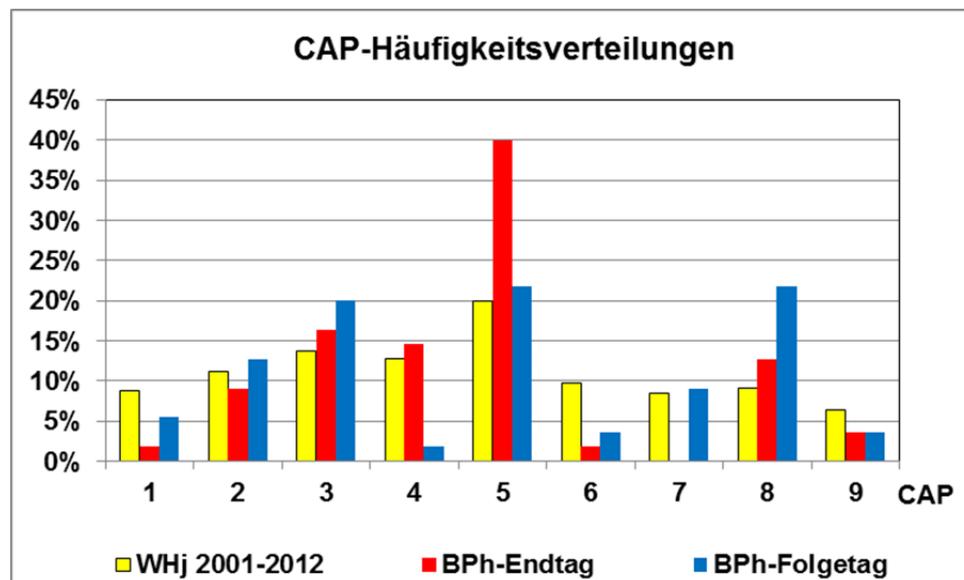
**Fazit zu Kap. 3.4:**

**Die Belastungstage fallen zu 3/4 mit den CAP-Klassen 4, 5 und 8 zusammen; die mittleren PM10-Konzentrationen an Belastungstagen sind nicht CAP-klassenspezifisch.**

## 4. Beendigung von Belastungsphasen

PM10-Belastungsphasen werden durch geänderte meteorologische Bedingungen beendet. Zunächst wird da eine Änderung der Wetterlage erwartet. In 60% der Belastungsphasen ändert sich die CAP-Klasse der Wetterlage vom Endtag der Belastungsphase zum Folgetag, in 40% bleibt sie allerdings gleich. Auf der anderen Seite bleibt die CAP-Klasse während der mehr als 1-tägigen Belastungsphasen auch nur bei gut einem Drittel der Fälle gleich. Die Änderung der CAP-Klasse, also die Änderung des Wetterlagentyps, taugt also nicht als Indikator für die Beendigung von Belastungsphasen; als Unterscheidungsmerkmal für andere meteorologische Parameter kann sie dennoch herangezogen werden.

Die folgende Grafik zeigt die CAP-Klassenverteilung für die End- und Folgetage.

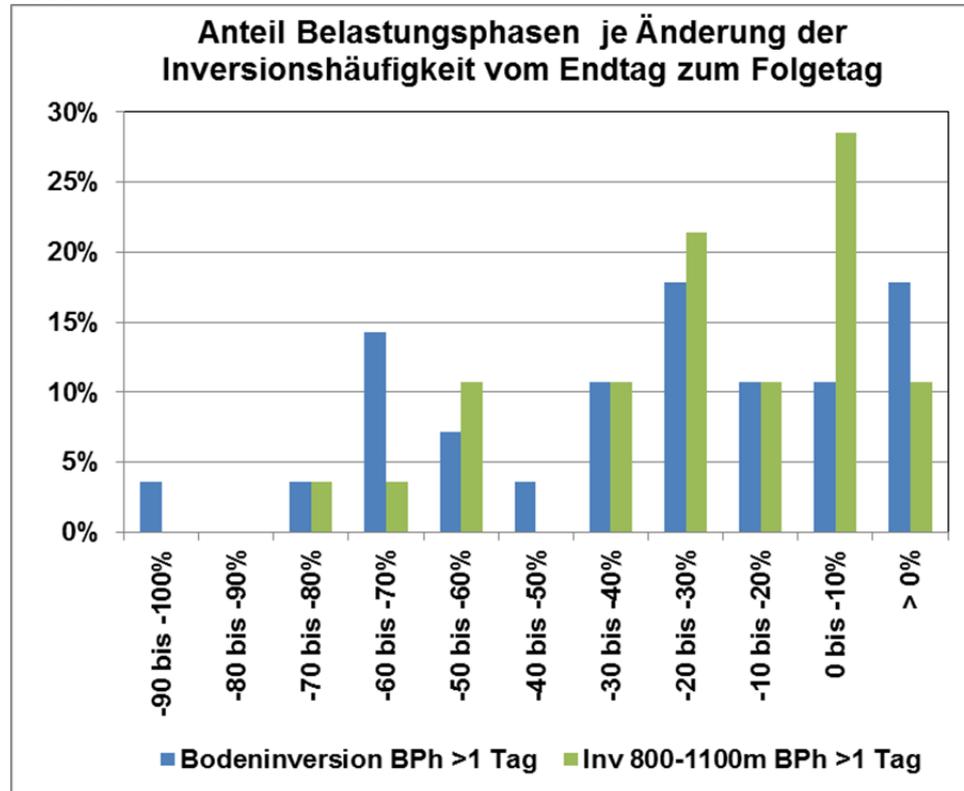


**Abbildung 4.1: CAP-Klassenverteilungen für die Winterhalbjahre 2001-2012, die Endtage und die Folgetage von Belastungsphasen. Die Summe über alle CAP-Klassen ist für jeden Fall 100%.**

Die Folgetage gleichen sich ein Stück weit an die allgemeine CAP-Klassenverteilung an. Sie weisen aber markant mehr Fälle in CAP-Klasse 8 auf (Hoch über Mitteleuropa); hier stecken die Bisenlagen drin. Ebenso weisen sie deutlich weniger oft Klasse 4 auf, indifferente (=schwachwindige) Ostlagen; in diesen Lagen bleiben Belastungsphasen meist bestehen.

Andere mögliche und verfügbare Parameter, welche im Zusammenhang mit einer Beendigung einer Belastungsphase stehen könnten, sind die Inversionshäufigkeit, die Windgeschwindigkeit (WIGE) und der Niederschlag (RR).

Das Auftreten von Inversionen könnte sowohl bei der Bildung als auch bei der Beendigung von Belastungsphasen eine grosse Rolle spielen. Die Differenz in der Inversionshäufigkeit zwischen Endtag und Folgetag bringt diese Rolle zum Ausdruck.



**Abbildung 4.2: Änderung der Inversionshäufigkeit vom Endtag zum Folgetag von Belastungsphasen: Verteilung in 10%-Häufigkeitsschritten für Bodeninversionen und Höheninversionen in 800 - 1100 m ü.M. Die Summe über die grünen und über die blauen Säulen beträgt je 100% (alle Belastungsphasen).**

In 10 bis knapp 20% der Fälle nimmt die Inversionshäufigkeit auf den Folgetag hin sogar zu; aber ansonsten nimmt die Inversionshäufigkeit bei Beendigung einer Belastungsphase ab. In etwa 2/3 der Fälle nimmt die Dauer der Bodeninversion um mehr als 20% (ca. 5 Stunden/Tag) ab; solche Abnahmen, welche auch prognostiziert werden können, sind gute Indikatoren für eine Beendigung von Belastungsphasen.

Im Folgenden werden der Niederschlag bei Kloten und die Windgeschwindigkeit bei Zürich-Kaserne betrachtet. Die nächsten beiden Tabellen zeigen die Häufigkeit, dass die Endtage (letzter Tag einer Belastungsphase) bzw. die Folgetage (erster Tag nach einer Belastungsphase) Niederschlagstage waren, unterschieden nach Konstanz oder Änderung der CAP-Klasse. Ein Niederschlagstag ist ein Tag mit mindestens 0.2 mm Niederschlag.

**Tabelle 4.1: Häufigkeit von Niederschlagstagen an Endtagen und Folgetagen von Belastungsphasen. Erklärung s. Abschnitt oben.**

Keine Änderung der CAP-Klasse:			Änderung der CAP-Klasse:		
Endtag →	Kein RR	RR	Endtag →	Kein RR	RR
Folgetag ↓			Folgetag ↓		
Kein RR	59%	5%	Kein RR	45%	12%
RR	23%	14%	RR	18%	24%

Bei etwa der Hälfte der Belastungsphasen geht die Beendigung ganz ohne Niederschlag einher. Etwa 20-35% der Endtage und etwa 40% der Folgetage sind Niederschlagstage. Bei einer Änderung der CAP-Klasse sind die Endtage doppelt so häufig von Niederschlag betroffen wie bei gleichbleibender CAP-Klasse. Im ersteren Fall dürfte häufig Niederschlag in eine noch verharrende Bodenkaltluftschicht fallen; dort ablaufende Auswaschprozesse sind offensichtlich so langsam, dass sie Belastungsphasen nicht zu beenden vermögen. Im Durchschnitt aller elf Winterhalbjahre waren 42% der Tage Niederschlagstage. Mit dem Folgetag 'normalisiert' sich das Wetter nach der überdurchschnittlich trockenen Belastungsphase. Eine Niederschlagsprognose taugt aber nur sehr bedingt als Prognose für die Beendigung von Belastungsphasen.

Das Verhalten der Windgeschwindigkeit wird auf zwei Arten betrachtet: Einerseits als Tagesmittel für End- und Folgetag, andererseits als 8h-Mittel rund um das Passieren der 50 µg/m<sup>3</sup>-Schwelle am Endtag. Damit können kurzfristige Turbulenzen erfasst werden. Wiederum wird zwischen konstanter und geänderter CAP-Klasse unterschieden.

**Tabelle 4.2: Mittlere Windgeschwindigkeit (WIGE) bei Zürich-Kaserne. Links: An Endtagen und an Folgetagen von Belastungsphasen, unterteilt nach gleich bleibender oder sich ändernder CAP-Klasse. Rechts: Während 8h-Phasen rund um das Passieren der 50 µg/m<sup>3</sup>-Schwelle für PM10; -9 bis -1 h vor dem Passieren, -1 (1 h vor) bis +7 h (nach Passieren).**

WIGE Tagesmittel:			WIGE 8h-Mittel:		
	Keine Änd. CAP	Änd. CAP	Rel. zu Passieren 50µg/m <sup>3</sup> -Schwelle	Keine Änd. CAP	Änd. CAP
Endtag	1.4	1.6	-9 ... -1 h	1.5	1.5
Folgetag	1.8	2.1	-1 ... +7 h	1.8	2.1

Die Folgetage weisen im Mittel deutlich höhere Windgeschwindigkeiten auf als die Endtage, ebenso die 8 Stunden des PM10-Abbaus auf unter  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  verglichen mit dem davor liegenden Zeitraum. Aufgrund der vorhandenen Streuungen könnten aber keine Schwellenwerte definiert werden, oberhalb derer mit einer Auflösung von Belastungsphasen gerechnet werden dürfte.

Generell ist die Beendigung einer Belastungsphase offensichtlich mit einem Luftmassenwechsel verbunden, welcher oft, aber nicht zwingend, mit aufkommendem Wind einhergeht. Dieser Wechsel ist bisweilen, noch weniger zwingend, von Niederschlag begleitet. Die CAP-Klassifizierung ist nicht geeignet zur Identifikation solcher 'PM10-relevanter' Luftmassenwechsel; ein solcher Luftmassenwechsel kann beispielsweise auch durch eine aufkommende Bisenlage innerhalb der gleichen Grosswetterlage ausgelöst werden. Zusammen mit MeteoSchweiz könnte versucht werden, Kriterien zur Beschreibung solcher Luftmassenwechsel zu eruiieren.

**Fazit zu Kap. 4:**

***Deutliche Abnahmen der Dauer von Inversionen, insbesondere von Bodeninversionen, welche auch prognostiziert werden können, sind gute Indikatoren für eine Beendigung von Belastungsphasen.***

***Generell ist die Beendigung einer Belastungsphase offensichtlich mit einem Luftmassenwechsel verbunden, welcher oft mit aufkommendem Wind und bisweilen mit Niederschlag einhergeht. Die CAP-Klassifizierung ist nicht geeignet zur Identifikation solcher 'PM10-relevanter' Luftmassenwechsel.***

## 5. Phasen mit nachhaltigen PM10-Anstiegen

### 5.1. Methodik

Als "nachhaltiger" PM10-Anstieg wird eine PM10-Zunahme von mehr als  $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$  während 24 Stunden definiert, welche nicht durch eine kurzzeitige Spitze verursacht wird, sondern einen verharrenden Charakter aufweist. Da die Halbstundenreihen der PM10-Werte grosse Fluktuationen aufweisen, mit kurzzeitigen Spitzen, teilweise auch messtechnischen Ursprungs, war zur Detektion solcher Anstiege ein zweistufiges Verfahren notwendig:

Zunächst wird für jede Halbstunde die gefilterte 24-stündige PM10-Änderung bestimmt: Dies ist die Differenz zwischen dem Stundenwert vor 24 Stunden und dem gleitenden Mittel für den Zeitraum 3 Stunden vor bis 3 Stunden nach der betreffenden Halbstunde. Sodann werden die Zeiträume als 'nachhaltige' PM10-Anstiege bestimmt, in welchen das gleitende 24h-Mittel dieser PM10-Änderungen  $> 20 \mu\text{g}/\text{m}^3$  beträgt und die aktuelle PM10-Änderung positiv ist. Dabei müssen auch Datenausfälle korrekt behandelt werden; diese spielen übrigens auch etwas bei der Bestimmung der Belastungsphasen mit rein, dies ist unvermeidbar.

Es wurden die PM10-Anstiege der beiden Leitstationen Zürich-Kaserne und Sedel untersucht.

### 5.2. Ergebnisse

In den elf Winterhalbjahren 2001-2012 wiesen der Sedel 87, Zürich-Kaserne 82 nachhaltige PM10-Anstiege auf. Gut die Hälfte dieser Anstiege stand im Zusammenhang mit einer Belastungsphase. Die Belastungsphasen ihrerseits stehen in folgender Beziehung zu nachhaltigen PM10-Anstiegen:

**Tabelle 5.1: Belastungsphasen (BP) und nachhaltige PM10-Anstiege bei Zürich-Kaserne und Sedel, Winterhalbjahre 2001-2012:**

PM10-Anstiege	Anz. BP	
Anstiege bei ZH & Sedel	28	51%
Anstieg nur ZH	5	9%
Anstieg nur Sedel	9	16%
Kein Anstieg	13	24%
<b>Total</b>	<b>55</b>	<b>100%</b>

Die Hälfte aller Belastungsphasen geht mit gemeinsamen PM10-Anstiegen bei Zürich-Kaserne und Sedel einher, ein Viertel mit Anstiegen bei Zürich-Kaserne oder Sedel, ein Viertel steht nicht mit einem (so definierten) Anstieg in Verbindung.

Etwa 20% der Anstiege sind bei Zürich-Kaserne und Sedel gemeinsam, führen aber nicht zu einer Belastungsphase.

Der Anhang A3 zeigt sämtliche nachhaltigen PM10-Anstiege für Sedel und Zürich-Kaserne für die Winterhalbjahre 2001-2012.

Im Anhang A3 werden auch die PM10-Belastungsphasen (s. Kap. 3) nochmals gezeigt, mit Bezug zu den nachhaltigen Anstiegen.

**Fazit zu Kap. 5:**

**Die gewählte Methodik ist geeignet, nachhaltige und über mehr als einen Tag andauernde PM10-Anstiege zu detektieren und sie von nur kurzfristigen Spitzen zu unterscheiden. Gut die Hälfte dieser Anstiege steht im Zusammenhang mit einer Belastungsphase. Drei Viertel der Belastungsphasen weisen einen solchen Anstieg im Vorfeld auf.**

**Bezüglich Anstiegsdauer, maximalem Anstieg und Dauer der Belastungsphase besteht lediglich die Tendenz, dass starke und/oder langanhaltende Anstiege eher gemeinsam bei Zürich-Kaserne und Sedel erfolgen und eher zu Belastungsphasen führen.**

## 6. Nachhaltige PM10-Anstiege und mögliche Einflussgrössen

Ein wesentliches Ziel dieses Projektes besteht darin zu versuchen, die Ursachen von PM10-Belastungsphasen besser zu verstehen. Dazu sollen mögliche messbare Einflussgrössen besser als bisher bekannt detektiert werden. Späterhin ist zu untersuchen, wie es um die Prognosefähigkeit für die detektierten Einflussgrössen steht.

Vor dem Hintergrund der bisherigen Untersuchungen erschien es sinnvoll, die nachhaltigen PM10-Anstiege und nicht die Belastungsphasen selbst auf mögliche Einflussgrössen hin zu untersuchen, da in Belastungsphasen die hohen PM10-Konzentrationen teilweise "nur" konserviert werden und nicht 'nachhaltig' aufgebaut werden müssen.

### 6.1. Behandlung von Inversionen in dieser Untersuchung

Atmosphärische Inversionen können zu erheblichen Immissionserhöhungen führen, indem sie die Luftschadstoffe in Bodennähe zurückhalten. Die Inversionen wurden anhand von Temperaturprofilen ermittelt, Temperaturmessungen in verschiedenen Höhenlagen.

Das 'TP Mittelland' wurde für die Stationen Zürich-Kaserne und Sedel verwendet und besteht aus folgenden Temperaturmesspunkten von MeteoSchweiz:

Kloten (426 m)

Zürich-Fluntern (556 m)

Lägern (845 m)

Hörnli (1132 m);

Napf (1404 m)

Pilatus (2106 m)

Säntis (2502 m).

Dieses Profil verwendet die gleichen Stationen wie MeteoSchweiz in ihrem Inversionsprofil, ausser Kloten als Bodensensor und nicht Güttingen am Bodensee.

Der Gradient zwischen Güttingen und Fluntern entspricht eher einem Horizontalgradienten (Region Zürich – Bodensee) denn einem Vertikalgradienten.

Das 'TP St. Gallen' wurde für die Station St. Gallen Rorschacherstrasse verwendet und besteht aus der MeteoSchweiz-Station St. Gallen (776 m) und dann ab Lägern.

Die Inversionen werden mit einer Toleranz von 1.5 °C gerechnet, d.h. Inversionen bis 1.5 °C über die gesamte betrachtete Schicht (nicht zwischen einzelnen Messpunkten!) werden nicht beachtet. Mannigfache Auswertungen haben gezeigt, dass schwache Inversionen bis etwa zu dieser Marge deutlich weniger immisionswirksam sind.

Die folgende Grafik zeigt die mittleren Inversionshäufigkeiten je Höhengschicht im mittleren Tagesgang für die beiden Winterhalbjahre 2010/11 und 2011/12.

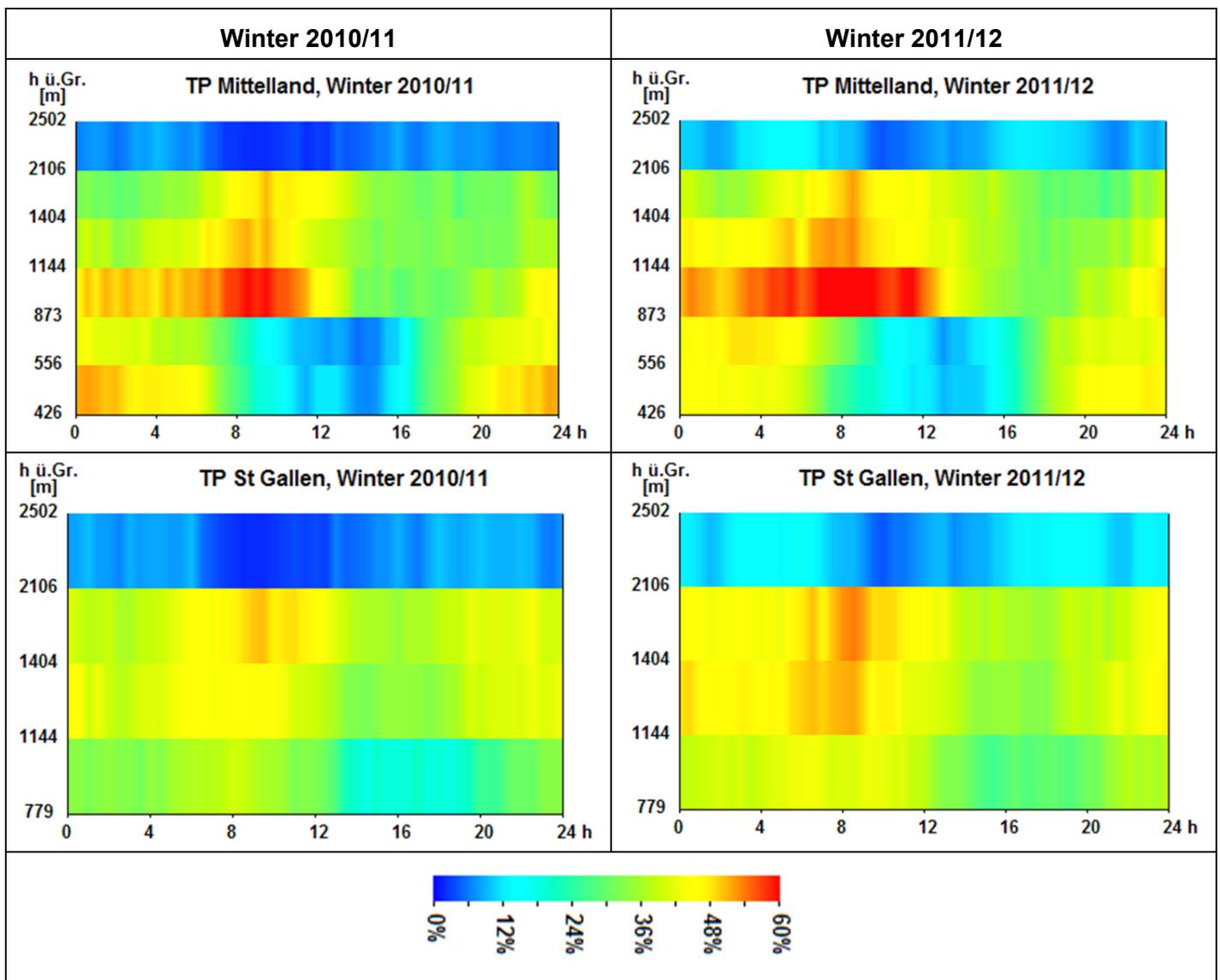


Abbildung 6.1: Inversionshäufigkeiten je Höhengschicht im mittleren Tagesgang, TP Mittelland und TP St. Gallen, Winterhalbjahre 2010/11 und 2011/12.

Zwischen etwa 850 und 1150 m ü.M. zeigen sich im TP Mittelland eine Häufung von Inversionen, die sich so über St. Gallen nicht zeigen. Oberhalb von etwa 2000 m kommen praktisch keine Inversionen im Winterhalbjahr vor.

## 6.2. Nachhaltige PM10-Anstiege bei Zürich-Kaserne

Sämtliche detektierten PM10-Anstiegsphasen an der Station Zürich-Kaserne wurden hinsichtlich verschiedener meteorologischer und immissionsseitiger Parameter untersucht. Dabei wurden die folgenden vier Ensembles an Phasen einander gegenüber gestellt:

- **WHj:** Alle Tage (Mitternacht - Mitternacht) der Winterhalbjahre 2001-2012;
- **Inversionstage:** Alle Tage (Mitternacht – Mitternacht) der Winterhalbjahre 2001-2012 mit einer Inversionshäufigkeit > 80% ohne die Tage mit einer Anstiegsphase;
- **APh o. BPh:** Alle PM10-Anstiegsphasen bei Zürich-Kaserne ohne Bezug zu einer Belastungsphase;
- **APh mit BPh:** Alle PM10-Anstiegsphasen bei Zürich-Kaserne im Vorfeld einer Belastungsphase.

Folgende Parameter wurden untersucht:

- Maximaler 24 h-Anstieg (nur für Anstiegsphasen);
- Dauer der Anstiegsphase (nur für Anstiegsphasen);
- Mittel der NO<sub>x</sub>-Konzentration bei ZH-Kaserne;
- Mittel der Ozon- Konzentration bei ZH-Kaserne;
- Mittel der Temperatur bei ZH-Kaserne;
- Mittel der Rel. Feuchte bei ZH-Kaserne;
- Mittel der Windgeschwindigkeit bei ZH-Kaserne;
- Mittel der Globalstrahlung bei ZH-Kaserne;
- Mittel der Inversionsuntergrenze (TP Mittelland; am Boden aufliegende Inversion = 555 m = Höhe des ersten Sensors über Boden);
- Mittel der Inversionsobergrenze (TP Mittelland);
- Inversionshäufigkeit (TP Mittelland);
- Dynamik der Inversionsuntergrenze in m/h (Aufsteigen oder Absinken);
- Anteil der Bodeninversionen am gesamten Inversionsauftreten (TP Mittelland);
- PM10-Ausgangswert zu Beginn der Phase;
- PM10 90%-Perzentil (→ Nichtbeachtung einzelner Spitzen);
- Windgeschwindigkeit 90%-Perzentil (Mass für die Windspitzen, Turbulenz, Durchmischung):

- Globalstrahlung 75%-Perzentil Globalstrahlung (wird während 6 h pro Tag überschritten; Ausschluss des Einflusses der Nachtdauer).

Als Ergebnis werden in den folgenden Grafiken die Mittelwerte der betreffenden Parameter über alle Phasen/Tage je Ensemble gezeigt, zusammen mit der jeweiligen Standardabweichung.

In Anhang A4 werden die einzelnen Ergebnisse für alle PM10-Anstiegsphasen gezeigt. Am Ende der Tabelle finden sich für die vier Ensembles für jeden Parameter Mittelwert, Standardabweichung und auch Median.

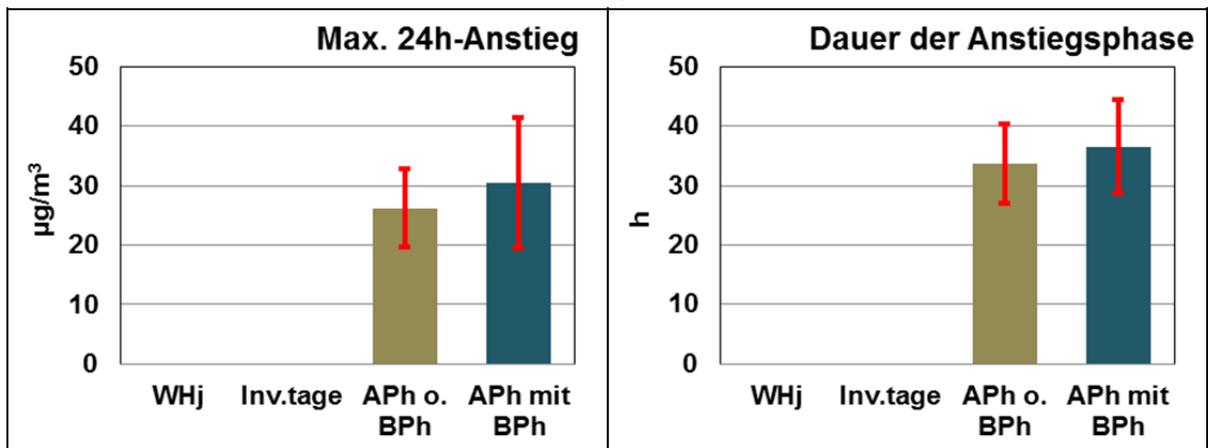


Abbildung 6.2: Charakterisierung der Anstiegsphasen ohne Belastungsphase (Aph o. BPh) und solche im Vorfeld einer Belastungsphase (Aph mit BPh): Maximaler 24h-Anstieg und Dauer der Anstiegsphase. Mittelwerte und ihre Standardabweichung (rote Balken).

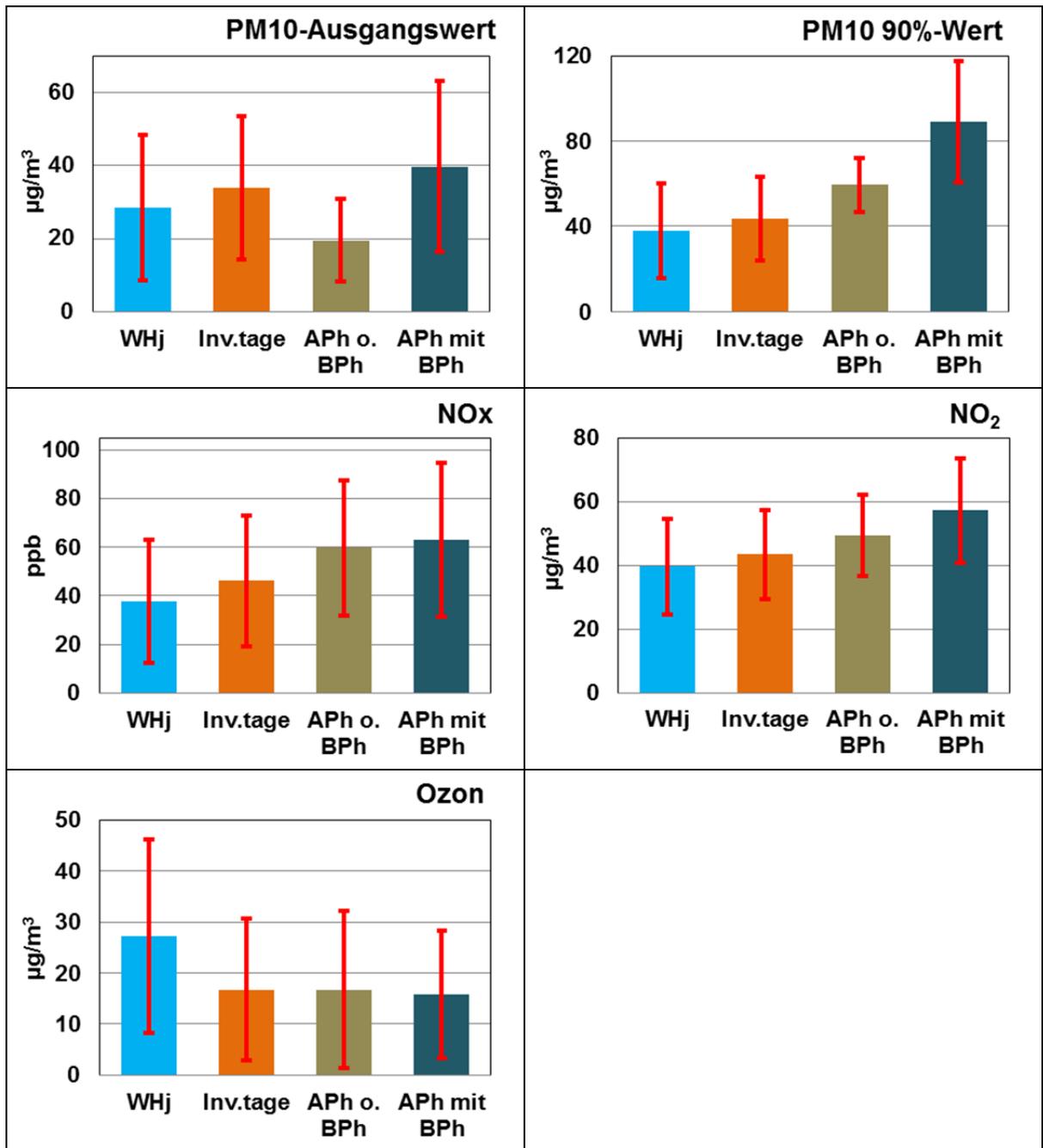


Abbildung 6.3: Mittlere tägliche Immissionskennzahlen und ihre Standardabweichungen für die Winterhalbjahre 2001-2012 (WHj) und die Inversionstage (>80% Inversionshäufigkeit; Tage ohne Anstiegsphasen) sowie mittlere Immissionskennzahlen und ihre Standardabweichungen für PM10-Anstiegsphasen ohne Belastungsphase (APh o. BPh) und solche im Vorfeld einer Belastungsphase (APh mit BPh). PM10-Ausgangswert (zu Beginn der Phase bzw. des Tages); 90%-Perzentil von PM10; NOx-, NO<sub>2</sub>- und Ozonmittelwert. Werte für Zürich-Kaserne.

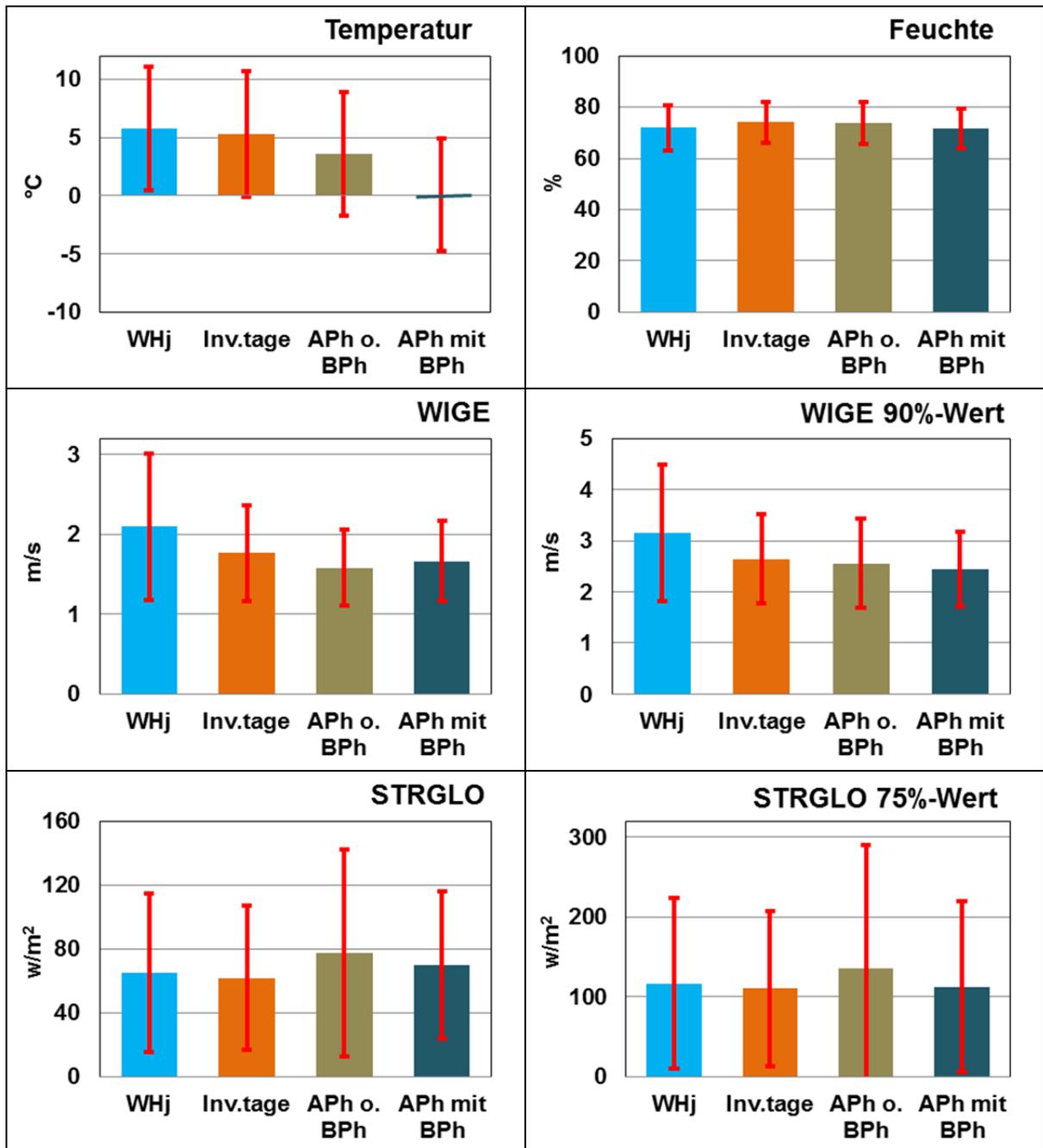


Abbildung 6.4: Mittlere tägliche meteorologische Kennzahlen und ihre Standardabweichungen für die Winterhalbjahre 2001-2012 (WHj) und die Inversionstage (>80% Inversionshäufigkeit; Tage ohne Anstiegsphasen) sowie mittlere meteorologische Kennzahlen und ihre Standardabweichungen für PM10-Anstiegsphasen ohne Belastungsphase (APH o. BPh) und solche im Vorfeld einer Belastungsphase (APH mit BPh). Temperatur; relative Luftfeuchtigkeit; Windgeschwindigkeit (WIGE; Mittelwert und 90%-Perzentil); Globalstrahlung (STRGLO; Mittelwert und 75%-Perzentil). Werte für Zürich-Kaserne.

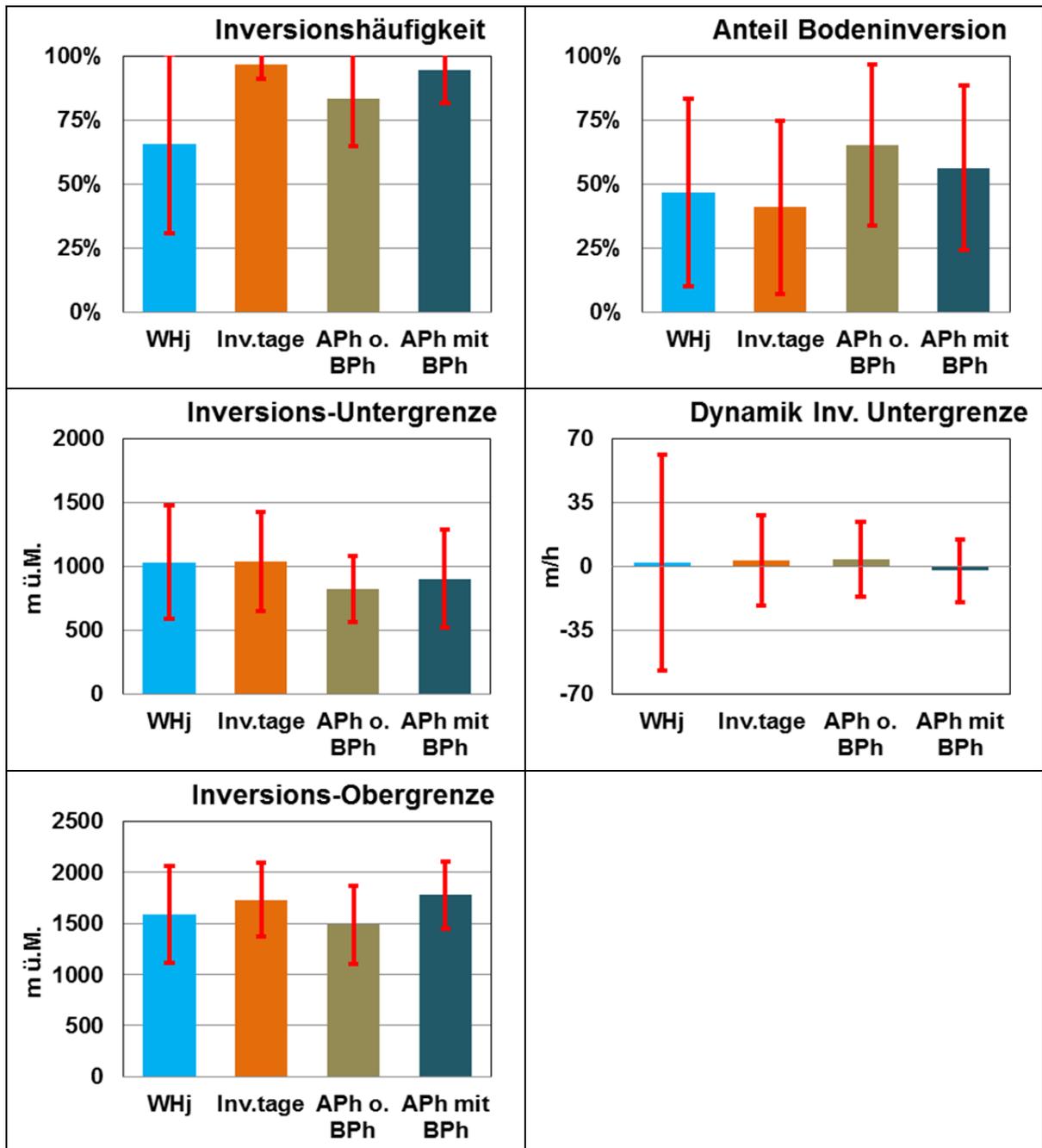


Abbildung 6.5: Mittlere tägliche Inversions-Kennzahlen und ihre Standardabweichungen für die Winterhalbjahre 2001-2012 (WHj) und die Inversionstage (>80% Inversionshäufigkeit; Tage ohne Anstiegsphasen) sowie mittlere Inversions-Kennzahlen und ihre Standardabweichungen für PM10-Anstiegsphasen ohne Belastungsphase (APh o. BPh) und solche im Vorfeld einer Belastungsphase (APh mit BPh). Inversionshäufigkeit; Anteil der Bodeninversionen an der Inversionszeit; Inversionsuntergrenze und ihre Dynamik (Veränderung während des Tages bzw. während der Anstiegsphase); Inversionsobergrenze. Inversionen vom TP Mittelland.

Die Variationen der Parameter sind für alle untersuchten vier Ensembles (alle Tage im Winterhalbjahr, Inversionstage ohne Tage mit PM10-Anstiegsphasen, Anstiegsphasen ohne Belastungsphase, Anstiegsphasen im Vorfeld einer Belastungsphase) gross im Verhältnis zu den Unterschieden zwischen den Ensembles. Dies bedeutet, dass der Einzelfall einer Anstiegsphase eine oft breite Palette von Werten der Parameter annehmen kann, die nur in Kombination wirken; es gibt aber typische (mittlere) Unterschiede, die auf eine erhöhte Wahrscheinlichkeit von Anstiegs- und Belastungsphasen hinweisen.

Zunächst wird auf die Unterschiede zwischen den mittleren Verhältnissen in den 11 Winterhalbjahren und den Inversionstagen (>80% Inversionshäufigkeit, ohne Tage mit PM10-Anstiegsphase) eingegangen. Natürlich ist an den Inversionstagen die Inversionshäufigkeit grösser als im Durchschnitt des Winterhalbjahres; die Bodeninversionen – immerhin 47% aller Inversionszeiten im Winterhalbjahrdurchschnitt! – sind etwas weniger häufig, weil sich abgehobene Inversionen besser halten können. Die Windgeschwindigkeit ist geringer. NO<sub>x</sub>- und PM10-Konzentrationen sind höher, Ozon geringer. Die übrigen Parameter (Temperatur, Feuchte, Globalstrahlung, Inversionsober- und -Untergrenze) ändern sich nicht oder kaum.

- **An Inversionstagen haben die Bodeninversionen etwas weniger Anteil an der gesamten Inversionszeit, die Ozonkonzentrationen sind tiefer, die übrigen Immissionen erhöht und die Windgeschwindigkeit tiefer.**

Anstiegsphasen weisen im Allgemeinen eine hohe Inversionshäufigkeit auf. Was sind die Unterschiede zu den 'allgemeinen' Inversionstagen?

**Anstiegsphasen ohne nachfolgende Belastungsphase zeichnen sich im Vergleich zu mittleren Inversionstagen (ohne Anstiegsphase) durch Folgendes aus:**

- **die Inversionshäufigkeit ist etwas geringer.**
- **Der Anteil der Bodeninversionen ist aber deutlich höher, in der Folge die mittlere Inversionsuntergrenze tiefer.**
- **Sowohl die PM10- als auch die NO<sub>x</sub>-Konzentrationen sind relativ in ähnlichem Masse erhöht.**
- **Die Temperatur ist tiefer.**

Die übrigen Parameter unterscheiden sich wenig oder nicht:

- Beim Ozon gibt es keinen Unterschied.
- Feuchte und Windgeschwindigkeit unterscheiden sich kaum.
- Globalstrahlung 75%-Perzentil (Wert, der von 6h/Tag überschritten wird) und Mittelwert in diesen Anstiegsphasen etwas erhöht wegen eines Ausreissers Ende März 2007; Median von allen vier Ensembles am tiefsten!.

- Inversionsobergrenze unterscheidet sich nicht.

**Anstiegsphasen, welche sich im Vorfeld einer Belastungsphase ereignen, zeichnen sich gegenüber solchen ohne Belastungsphase durch Folgendes aus:**

- **Etwas höherer maximaler 24h-Anstieg und leicht grössere Dauer des Anstiegs.**
  - **Markant höherer PM10-Ausgangswert (um  $21 \mu\text{g}/\text{m}^3$  → Vorbelastung), was sich auch auf das PM10 90%-Perzentil entsprechend auswirkt.**
  - **Leicht höheres NO<sub>x</sub>-Mittel.**
  - **Deutlich höheres NO<sub>2</sub>-Mittel.**
  - **Markant tiefere Temperatur.**
  - **Grössere Inversionshäufigkeit.**
  - **Etwas höhere Inversionsobergrenze.**
  - **Leicht absinkende Inversionsuntergrenze (Median bei  $-5 \text{ m/h} = -120 \text{ m/Tag}$ ).**
- Alle übrigen Parameter unterscheiden sich kaum.

Der Mittelwert des PM10-Ausgangswertes über alle Anstiegsphasen entspricht demjenigen der allgemeinen Inversionstage. Die Vorbelastung scheint wesentlich darüber mit zu bestimmen, ob aus einer Anstiegsphase eine Belastungsphase wird oder nicht.

## **Diskussion der meteorologischen Ergebnisse**

Alle Ergebnisse bezüglich meteorologischer Einflussgrössen stehen in Einklang mit der Studie "Influence of meteorology on PM10 trends and variability in Switzerland from 1991 to 2008" von I. Barmadimos, C. Hueglin et al. (PSI und EMPA), insbesondere bezüglich Wind, Temperatur und Globalstrahlung. Jene Studie untersuchte die meteorologischen Einflüsse auf PM10 über das ganze Jahr und betrachtete andere Immissionen (NO<sub>2</sub>, Ozon) nicht explizit.

Eine Inversionsschicht stellt nicht einfach einen 'Deckel' dar, sondern kann durchaus auch gewisse vertikale Strömungen aufweisen:

- Es kann auch innerhalb inversiver Schichten eine leichte Konvektion geben, die vertikale Stoffflüsse bewirkt, vor allem bei Bodeninversion. Vom Tiroler Inntal wissen wir, dass im Winter der NO<sub>2</sub>-**Anteil** am NO<sub>x</sub> im Talboden neben der Brenner-Autobahn stark mit der Ozon-Konzentration in 90 m Höhe über dem Talboden zusammenhängt, trotz der häufigen Inversionen. Nach der NO<sub>2</sub>-Bildung folgt die Nitratbildung.

- Diese leichte Konvektion stellt sich tagsüber ein infolge der Bodenerwärmung und ist so eine indirekte Folge der einfallenden Strahlung, was aber nichts mit direkter Sekundärpartikelbildung durch UV-Strahlung zu tun hat.
- Über diesen Prozess kann auch PM10 umgekehrt "in die Breite" transportiert werden. Beim NO<sub>x</sub> bewirkt dies weniger, weil NO<sub>x</sub> eine wesentlich kürzere Lebensdauer als PM10 hat.

Die 'Höhe der Inversionsschicht' als Mass des dem Feinstaub zur Verfügung stehenden Luftvolumens spielt offensichtlich für die Ausbildung von Belastungstagen kaum eine Rolle. Dies ist auch ein schwierig zu erfassender Parameter, denn diese Höhe beträgt bei Bodeninversionen null. Von mobilen Hangprofilmessungen (z.B. am Arniberg im Urner Reusstal) wissen wir, dass die Kaltluftschicht in einer Inversionslage praktisch nie mit Immissionen 'aufgefüllt' wird, sondern es deutliche Gradienten innerhalb dieser Schicht gibt, wenn sie eine gewisse Mächtigkeit erreicht. Die Höhe einer abgehobenen Inversion ist deshalb wohl nicht sehr relevant. Manchmal kommt es an der Obergrenze zu einer Immissionsanreicherung, aber offenbar relativ selten.

Eine besonders heikle Situation könnte entstehen, wenn Warmluftadvektion in der Höhe über einer Inversionsschicht zum Stillstand kommt. Gerade hier könnten Auswertungen von Profilmessungen von MeteoSchweiz wichtige Informationen liefern.

Ein Grund, dass PM10 in der Smogkammer des PSI unter Strahlung so stark reagiert, in der Natur man das aber nicht sieht, dürfte an den unterschiedlichen UV-Strahlungsintensitäten in der Kammer und im Mittelland im Winter liegen. Bei Smogkammerexperimenten besteht grundsätzlich ein Interesse an raschen Abläufen, weil die Diffusion von Partikeln an die Smogkammerwände stört und einen umso grösseren Einfluss hat, je länger ein Experiment dauert.

Ein direkter Vergleich der UV-Strahlung in den Smogkammern (durch Solariumlampen) und im winterlichen Mittelland ist schwierig, weil die spektrale Intensitätsverteilung unterschiedlich sein kann. Eine mögliche Vergleichsgrösse ist die sonnenbrandwirksame (erythemwirksame) Gesamtbestrahlungsstärke  $E_{er}$ . Bundesamt für Strahlenschutz, Deutschland: "Für Sonnenbänke, die nach dem 22. Juli 2007 hergestellt wurden, gilt eine maximal erlaubte erythemwirksame Gesamtbestrahlungsstärke von 0,3 Watt pro Quadratmeter ( $W/m^2$ ). Diese Bestrahlungsstärke entspricht der Bestrahlungsstärke, die von der Sonne am Äquator zur Mittagszeit bei wolkenlosem Himmel hervorgerufen wird." In unseren Breiten und Höhenlagen des Mittellandes werden im Hochsommer mittägliche Werte von  $E_{er}$  um die  $0.25 W/m^2$  erreicht, im Januar um die  $0.02 W/m^2$ ; die jahreszeitlichen und

tageszeitlichen relativen Schwankungen der UV-Strahlung sind wesentlich grösser als bei der Globalstrahlung.

In der mobilen Smogkammer des PSI wurden 40 Solariumlampen zu 100 W eingesetzt (<http://www.psi.ch/lac/mobile-smog-chamber>), in der festen Smogkammer ist die Strahlung geringer, oft wurden Xenonlampen eingesetzt, die ein dem Sonnenlicht ähnliches Spektrum haben, einige Experimente auch dort mit UV-Licht. Das an der EMPA-Tagung 2012 vorgestellte Experiment mit Dieselabgas in der Smogkammer (in 3-4 h etwa so viel SOA wie POA + BC) wurde mit der mobilen Smogkammer in Ispra durchgeführt.

Entscheidender als die Einstrahlung scheint im Sommer die Temperatur zu sein, welche gekoppelt ist an die Strahlung, das Ozon und die biogenen Emissionen. Im Winter scheint oft genügend Chemie abzulaufen, auch Nachtchemie trägt zur Oxidation bei. Das Entscheidende ist am Schluss die Photolyserate, die Winter-sonne reicht zur Photolyse von  $\text{NO}_2$ . In der Kammer wird die Strahlung auch hin- und her gestreut, und ein Teil der Energie geht weg. Die Gasphasenchemie läuft hauptsächlich im UV ab, es gibt aber vielleicht photokatalytisch induzierte Reaktionen, welche auch Reaktionen auslösen können im Aerosol (André Prévôt, PSI, private Mitteilung).

### 6.3. Vergleich mit den Anstiegsphasen bei Sedel und St. Gallen

Im Anhang A5 sind die gleichen möglichen Einflussgrößen bezüglich nachhaltiger PM10-Anstiege beim Sedel und bei St. Gallen dokumentiert. Grundsätzlich sind die Ergebnisse sehr ähnlich wie bei Zürich-Kaserne. Es gibt also eine Systematik zu nachhaltigen PM10-Anstiegsphasen, welche sich über lokale Effekte hinaushebt, obwohl sich PM10 als überraschend stark von lokalen Gegebenheiten abhängig erwiesen hat.

Als Überblick zu den Ergebnissen wird das nachfolgende Schema präsentiert: Es zeigt für jeden Parameter die Änderung des Mittelwertes gegenüber dem gesamten Winterhalbjahr sowohl für Inversionstage als auch für Anstiegsphasen mit und ohne Belastungsphase.

Das 'Bild der Pfeile' fasst die in Kap. 6.2. dargestellten Ergebnisse zusammen. Die folgenden Parameter sind die markantesten Indikatoren für Anstiegsphasen:

- **NO<sub>2</sub>**
- **Temperatur**
- **Windgeschwindigkeit**
- **Inversion:**
  - **Häufigkeit**
  - **Dynamik Untergrenze**
  - **Anteil Bodeninversion**

Keine Unterschiede zeigen Feuchte und Globalstrahlung.

Ob sich aus einer Anstiegsphase eine Belastungsphase entwickelt, wird wesentlich vom **PM10-Ausgangswert** bestimmt. Anstiegsphasen ohne nachfolgende Belastungsphase haben einen tieferen PM10-Ausgangswert als das Mittel über alle Mitternachtswerte im Winterhalbjahr.

**Tabelle 6.1: Qualitative Differenz der PM10-Einflussgrößen zu ihrem Wintermittel 2001-2012 für Inversionstage als auch für Anstiegsphasen mit und ohne Belastungsphase bei Zürich-Kaserne, Sedel und St. Gallen. Rote Pfeile: Andere qualitative Differenz als Zürich-Kaserne.**

	ZH-Kaserne			Sedel			St. Gallen		
	Inv.tage	Aph o. BPh	Aph mit BPh	Inv.tage	Aph o. BPh	Aph mit BPh	Inv.tage	Aph o. BPh	Aph mit BPh
PM10-Ausgangswert	↑	↓	↑↑	↑	↓	↑↑	↑	↓	↑↑
PM10 90%-Wert	→	↑	↑↑	→	↑	↑↑	→	↑	↑↑
NOx	↑	↑↑	↑↑	↑	↑↑	↑↑	↑	↑	↑↑
NO <sub>2</sub>	→	↑	↑↑	→	↑	↑↑	↑	↑	↑↑
Ozon	↓↓	↓↓	↓↓	↓↓	↓↓	↓↓	↓↓	↓↓	↓↓
Temperatur	→	↓	↓↓	→	↓↓	↓↓	→	↓	↓↓
Feuchte	→	→	→	→	→	→	→	→	→
WIGE	↓	↓↓	↓↓	↓	↓	↓↓	↓	↓	↓
WIGE 90%-Wert	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	→	↓
STRGLO	→	↑	→	→	→	→	→	↑	→
STRGLO 75%-Wert	→	↑	→	→	↓	↓	→	→	↓
Inversionshäufigkeit	↑↑	↑	↑↑	↑↑	↑	↑↑	↑↑	↑	↑↑
Anteil Bodeninversion	↓	↑↑	↑	↓	↑	↑	↑	↑	↑↑
Inversions-Untergrenze	→	↓	↓	→	↓	↓	↓	↓	↓
Dynamik Inv. Untergrenze	↑	↑	↓	→	↑	↓	↑	↓	→
Inversions-Obergrenze	→	→	↑	→	→	→	→	→	→

Die Anstiegsphasen treten überwiegend im Zusammenhang mit Inversionslagen auf. Da ist von besonderem Interesse, welche Unterschiede sich zwischen Anstiegsphasen und Inversionstagen ohne Anstiegsphase zeigen. Grundsätzlich zeigt sich das gleiche Ergebnis: Die Parameter, welche Anstiegsphasen gegenüber dem Wintermittel auszeichnen, zeichnen diese auch gegenüber gewöhnlichen Inversionstagen aus (Ausnahme Ozon).

**Tabelle 6.2: Qualitative Differenz der PM10-Einflussgrößen relativ zu einem *mittleren Inversionstag ohne PM10-Anstiegsphase 2001-2012* für Anstiegsphasen mit und ohne Belastungsphase bei Zürich-Kaserne, Sedel und St. Gallen. Rote Pfeile: Andere qualitative Differenz als Zürich-Kaserne.**

	ZH-Kaserne		Sedel		St. Gallen	
	Aph o. BPh	Aph mit BPh	Aph o. BPh	Aph mit BPh	Aph o. BPh	Aph mit BPh
PM10-Ausgangswert	↓↓	↑↑	↓↓	↑↑	↓	↑↑
PM10 90%-Wert	↑	↑↑	↑	↑↑	↑	↑↑
NOx	↑↑	↑↑	↑↑	↑↑	→	↑↑
NO <sub>2</sub>	↑	↑↑	↑	↑↑	→	↑↑
Ozon	→	→	→	↓	→	→
Temperatur	↓	↓↓	↓	↓↓	↓	↓↓
Feuchte	→	→	→	→	→	→
WIGE	↓	↓	↓	↓	↑	→
WIGE 90%-Wert	→	→	→	→	↑	→
STRGLO	↑	→	→	→	→	→
STRGLO 75%-Wert	↑	→	↓	↓	→	↓
Inversionshäufigkeit	↓	→	↓	↓	↓	↓
Anteil Bodeninversion	↑↑	↑	↑	↑	→	↑
Inversions-Untergrenze	↓	↓	↓	↓	→	→
Dynamik Inv. Untergrenze	→	↓	↑	↓	↓	↓
Inversions-Obergrenze	→	↑	→	→	→	→

**Fazit zu Kap. 6:**

*In Anstiegsphasen nehmen sowohl die PM10- als auch die NOx- und NO<sub>2</sub>-Konzentrationen in ähnlichem Masse zu; dies bedeutet, dass die Prozesse, die zu erhöhten PM10-Konzentrationen führen, zu einem erheblichen Anteil auch auf die Stickoxide wirken. Allerdings weisen höhere NO<sub>2</sub>-Konzentrationen auch auf erhöhte Nitratbildung hin.*

***Anstiegsphasen – vor allem im Vorfeld einer Belastungsphase – kamen in den 11 Winterhalbjahren im Mittel bei deutlich unterdurchschnittlichen Temperaturen vor. Dies kann zumindest zum Teil damit erklärt werden, dass diese Anstiege im Januar/Februar konzentriert sind, wo es kälter ist. Allerdings 'hilft' die tiefe Temperatur offensichtlich auch bei der Ausbildung von PM10-Anstiegen, insbesondere im Vorfeld einer Belastungsphase.***

***In Anstiegsphasen zeigt sich eine markant höhere Häufigkeit von Bodeninversionen im Vergleich zu Inversionslagen ohne starken PM10-Anstieg. Diese Schicht, zeitweise im Zusammenspiel mit darüber liegenden Schichten, z.B. einer zweiten Inversion, dürfte eine Schlüsselrolle für 'nachhaltige PM10-Anstiege' spielen.***

***Eine Rolle der Globalstrahlung im Sinne einer Auslösung oder wesentlichen Unterstützung von Anstiegsphasen kann nicht erkannt werden.***

***Alle Ergebnisse bezüglich meteorologischer Einflussgrößen stehen in Einklang mit der Studie "Influence of meteorology on PM10 trends and variability in Switzerland from 1991 to 2008" von I. Barmpadimos, C. Hueglin et al. (PSI und EMPA).***

## 7. Modell eines Belastungsindikators als Vorbereitung auf eine PM10-Prognose

Zur Entwicklung einer Strategie für die Verbesserung der Prognose von PM10-Belastungsphasen muss zunächst die Entstehung und die Ausgestaltung von PM10-Belastungsphasen verstanden werden: PM10-Konzentrationen sind das Produkt eines Systems mannigfaltiger komplexer Prozesse, deren Parameter uns zum Teil direkt, zum Teil indirekt, zum Teil gar nicht zur Verfügung stehen. Hohe PM10-Konzentrationen können durch sehr unterschiedliches Zusammenwirken solcher Prozesse entstehen, an welchen die untersuchten Parameter in unterschiedlichem Masse beteiligt sind.

In Konsequenz zeigen die untersuchten Parameter teilweise deutlich veränderte Mittelwerte und Mediane im Vergleich zum Wintermittel für Belastungs- und Anstiegsphasen, aber in jedem Fall breite Streuungen. Auch bei Hinzunahme weiterer Messparameter würden sich die Streuungen systemimmanent nicht stark verringern.

In weiterer Konsequenz ist es nicht möglich, die PM10-Konzentration z.B. des Folgetages 'präzise' vorauszusagen. Es gibt keine Funktionalität  $PM10 = f(\text{Parameter } i \dots n)$ . Grundsätzlich ist es aber möglich, Wahrscheinlichkeiten des Auftretens bestimmter Konzentrationsbereiche zu schätzen, z.B. eine erhöhte Wahrscheinlichkeit bzw. eine stark erhöhte Wahrscheinlichkeit für eine Belastungsphase. (Analogon in der Physik: Quantentheorie, 'Chaos'theorie).

### 7.1. Das Indikatormodell

Im hier vorgestellten Indikatormodell werden die Parameter ( $\rightarrow$  Indikatoren) herangezogen, deren Mittelwert in Anstiegsphasen und an Belastungstagen sich deutlich vom Wintermittel unterscheidet; sie werden für jede Phase bzw. jeden Tag mit 'Indikatorpunkten' belegt je nach Differenz zum Wintermittel, in Einheiten der jeweiligen Standardabweichung (z.B. 100 Punkte für eine Differenz im Betrag der Standardabweichung), damit die Parameter unter sich vergleichbare Beiträge zu erhöhten PM10-Werten 'liefern'. Die Summe aller Indikatorpunkte ist der Indikator für eine Belastungsphase; er stellt ein Mass für die Wahrscheinlichkeit des Auftretens einer solchen Phase dar. Belastungsphasen sollten viele Punkte aufweisen, andere Phasen weniger.

Für eine spätere effektive Prognose von Belastungsphasen müssten die für die oben erklärte Wahrscheinlichkeit relevanten Parameter prognostiziert werden, was zurzeit nur zum Teil der Fall ist. Mit einer solchen revidierten Prognose sollte die Wahrscheinlichkeit für bevorstehende Belastungsphasen besser abgeschätzt werden können.

Folgendes Prozedere wurde zur Bestimmung eines PM10-Belastungsindikators entwickelt:

Der Indikator für eine PM10-Belastungsphase setzt sich aus einem Indikator für eine nachhaltige Anstiegsphase und einem solchen für den PM10-Ausgangswert zusammen.

Der Indikator für eine nachhaltige Anstiegsphase (A-Indikator) setzt sich aus solchen der folgenden Parameter zusammen:

- **NO<sub>2</sub>**
- **Temperatur**
- **Windgeschwindigkeit**
- **Inversion:**
  - **Häufigkeit**
  - **Dynamik Untergrenze**
  - **Anteil Bodeninversion**

Der Wert eines einzelnen Indikators ist dabei gleich der Differenz des aktuellen Wertes zum Wintermittel des betreffenden Parameters, ausgedrückt in Einheiten von 0.01 Standardabweichungen des Wintermittels. Das Vorzeichen ist positiv für Differenzen in Richtung zu höheren PM10-Werten.

Beispiel: Das Wintermittel der Temperatur sei 5 °C mit einer Standardabweichung von 8 °C. Das Mittel eines konkreten Tages oder einer konkreten Phase sei 1 °C. Kältere Temperaturen weisen in Richtung zu höheren PM10-Werten; der PM10-Indikator dieser Temperatur ist also 50 Punkte  $[(5 - 1)/0.08]$ . Der Einbezug der Standardabweichung ist wichtig, weil sonst stärker streuende Parameter mehr Gewicht im Modell erhalten. Doppeltes Gewicht erhält aber NO<sub>2</sub>: Einerseits ist es Nitratlieferant, andererseits ein Indiz für den allgemeinen lufthygienischen Zustand der Atmosphäre. Meteorologie allein reicht nicht zur Erzeugung einer PM10-Belastungsphase.

Der Indikator des PM10-Ausgangswertes wird ebenfalls in Einheiten von 0.01 Standardabweichungen dargestellt. Beträgt also das Wintermittel 25 µg/m<sup>3</sup> mit einer Standardabweichung von 16 µg/m<sup>3</sup>, so führt ein Ausgangswert für einen

bestimmten Tag oder eine bestimmte Anstiegsphase von 21 µg/m<sup>3</sup> zu -25 Indikatorpunkten.

Der interessierende Indikator für PM10-Belastungsphasen (B-Indikator) ergibt sich aus der gleich gewichteten Summierung der beiden Indikatoren für Anstiegsphasen und PM10-Ausgangswert. Der Mittelwert aller Indikatoren für das Winterhalbjahr ist zwingend gleich null.

Für den Sedel ergeben sich die folgenden Mittelwerte für die oben beschriebenen Indikatoren.

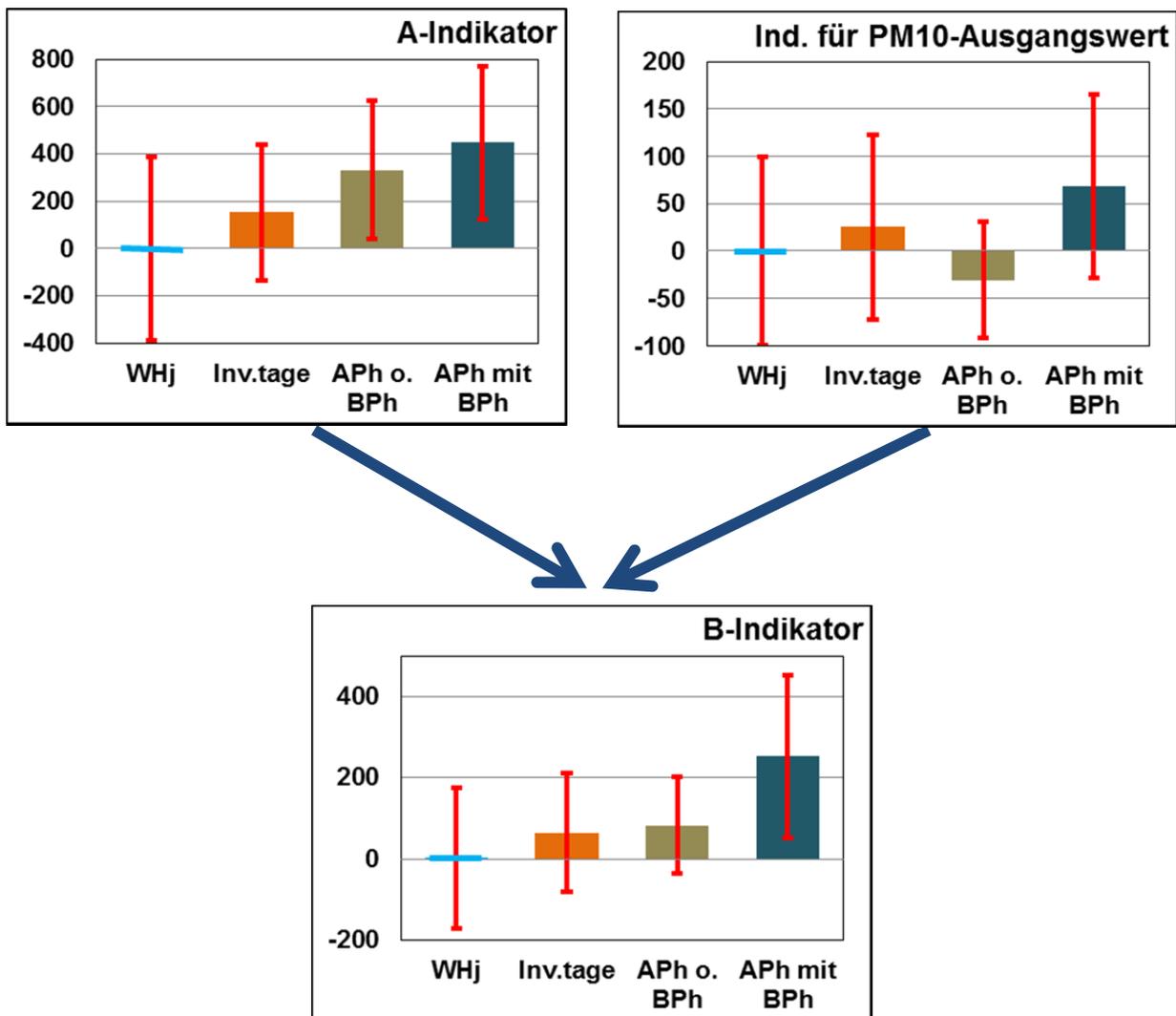


Abbildung 7.1: Mittelwerte der Indikatoren für nachhaltige Anstiegsphasen (A-Indikator), für den PM10-Ausgangswert des betreffenden Tages bzw. der betreffenden Phase und für Belastungsphasen (B-Indikator), Sedel, Winterhalbjahre 2001-2012. Erklärungen S. 48f.

Der A-Indikator zeichnet alle Anstiegsphasen (mit oder ohne nachfolgende Belastungsphase) aus (diejenigen mit Belastungsphase allerdings mehr). Im B-Indikator heben sich die Anstiegsphasen mit Belastungsphase deutlich von der Gesamtheit der Wintertage, den Inversionstagen und den übrigen Anstiegsphasen ab; er ist sehr selektiv bezüglich dieser Phasen, wobei stets eine verhältnismässig hohe Standardabweichung in Kauf zu nehmen ist.

## 7.2. Ergebnis des B-Indikators für Sedel

Jedem Tag der Winterhalbjahre 2001-2012 kann ein Wert des B-Indikators zugewiesen werden. Die Werte der Einflussparameter sind die entsprechenden Tagesmittel, der PM10-Ausgangswert ist das jeweilige Tagesmittel. In Anstiegsphasen betreffen die Werte der Einflussparameter jeweils das Phasenmittel. Die folgende Abbildung zeigt für Sedel für alle Tage im Winterhalbjahr sowie für alle Anstiegsphasen den 90%-Wert von PM10 gegen den B-Indikator. Da Tage und Phasen zusammen gezeigt werden, können nur Perzentile und keine Mittelwerte von PM10 dargestellt werden.

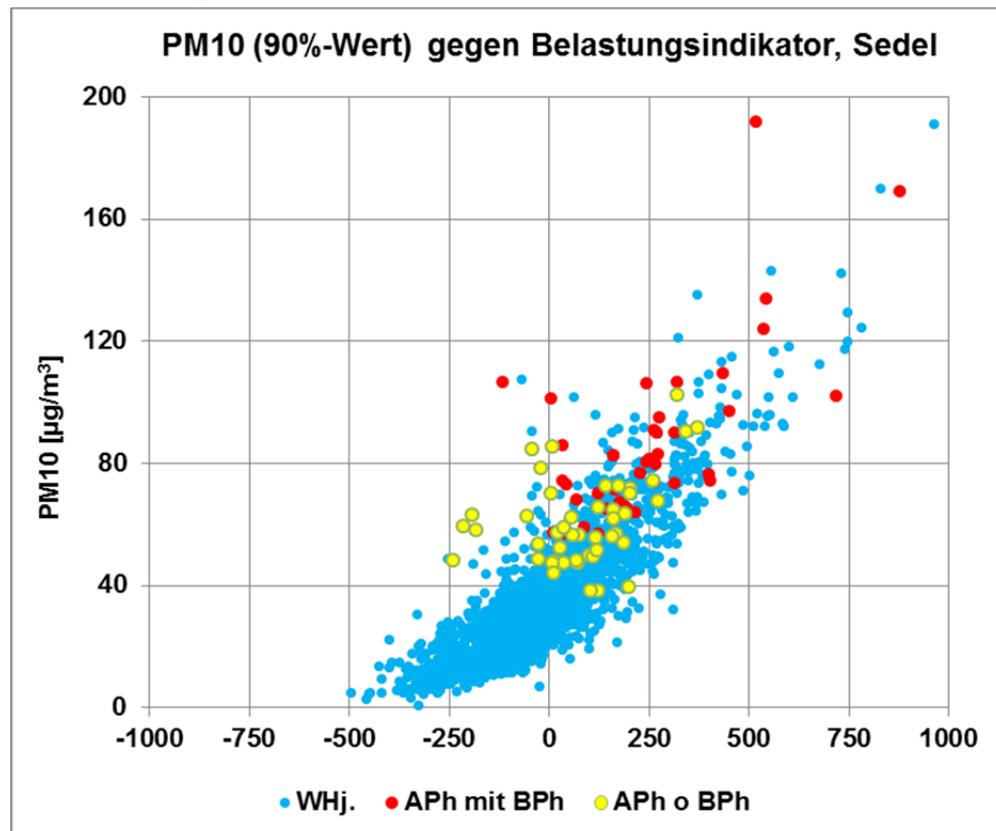


Abbildung 7.2: 90%-Werte von PM10 bei Sedel gegen B-Indikator. Alle Tage in den Winterhalbjahren 2001-2012 (WHj), Anstiegsphasen mit (Aph mit BPh) und ohne (Aph ohne BPh) Belastungsphase.

Die blaue Punktwolke besteht aus etwa 2000 Punkten. Höhere PM10-belastungen gehen klar mit höheren Werten des B-Indikators einher. Die Anstiegsphasen befinden sich im oberen Teil der Punktwolke, diejenigen mit Belastungsphase im obersten Teil, allerdings mit einem Überlappungsbereich mit den Anstiegsphasen ohne Belastungsphase. Die Übergänge sind fließend.

Die Untersuchung der Anstiegsphasen diente hauptsächlich dazu, die Parameter zu finden, welche mit erhöhten PM10-Werten einhergehen. Eigentlich interessieren vor allem bestimmte Tage, vor allem im Hinblick auf eine spätere Prognose, nämlich Belastungstage und 'BPUK-Tage ZCH', Tage an welchen retrospektiv betrachtet die Informationsstufe gemäss Konzept BPUK für die Zentralschweiz galt (s. S. 20).

Die folgende Abbildung zeigt für Sedel den 90%-Wert von PM10 gegen den B-Indikator für alle Belastungstage, alle BPUK-Tage und alle übrigen Tage im Winterhalbjahr.

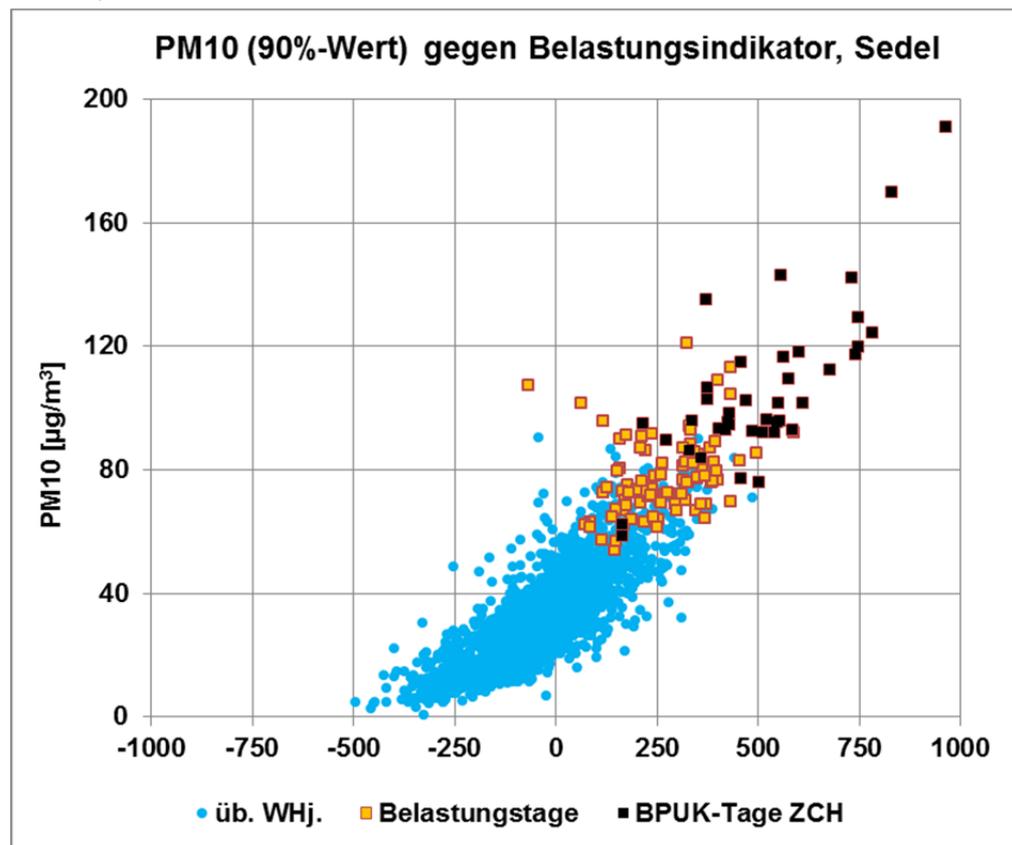


Abbildung 7.3: 90%-Werte von PM10 bei Sedel gegen B-Indikator. Belastungstage, 'BPUK-Tage ZCH' (Tage, an welchen retrospektiv betrachtet die Informationsstufe gemäss Konzept BPUK für die Zentralschweiz galt) und übrige Tage im Winterhalbjahr (üb. WHj.), Winterhalbjahre 2001-2012.

Der B-Indikator ist sehr selektiv gegenüber Belastungstagen und insbesondere BPUK-Tagen. Dies ist keineswegs selbstverständlich: Es könnte auch sein, dass BPUK-Tage als Extremereignisse stark von nicht erfassten Parametern abhängen, welche folglich den B-Indikator nicht beeinflussen. Dann würden die BPUK-Tage in der Grafik einfach oberhalb der übrigen Belastungstage liegen; sie liegen aber insgesamt in einem höheren Bereich des B-Indikators.

Mit dem B-Indikator werden alle gegenwärtig erfassbaren Einflussparameter für erhöhte PM10-Werte in einer einzigen Zahl zusammengefasst. Dabei gibt es Überlappungsbereiche zwischen Belastungstagen, BPUK-Tagen und übrigen Tagen. Wenn man späterhin von der Häufigkeit des bisherigen Auftretens auf die Wahrscheinlichkeit zukünftigen Auftretens schließen will, muss man mit diesen Überlappungen umgehen. Dabei gerät man in ein für Wahrscheinlichkeitsbetrachtungen typisches Dilemma, eine Art 'Unschärferelation': Je höher die Trefferwahrscheinlichkeit für einen prognostizierten Belastungstag ist, desto kleiner wird der Anteil der erfassten Belastungstage. Die folgenden Grafiken veranschaulichen dies.

Die erste Betrachtung erfolgt für Intervalle des B-Indikators in Schritten von 100. Der Anteil von Belastungstagen bzw. BPUK-Tagen an allen Tagen in einem bestimmten Intervall steigt mit zunehmendem B-Indikator.

Ab B-Indikatoren von 500 sind alle Tage Belastungstage, zu 92% BPUK-Tage. Ideal wäre ein möglichst steiler Anstieg von 0% auf 100%. Die BPUK-Tage sind dem Idealfall näher als die Belastungstage.

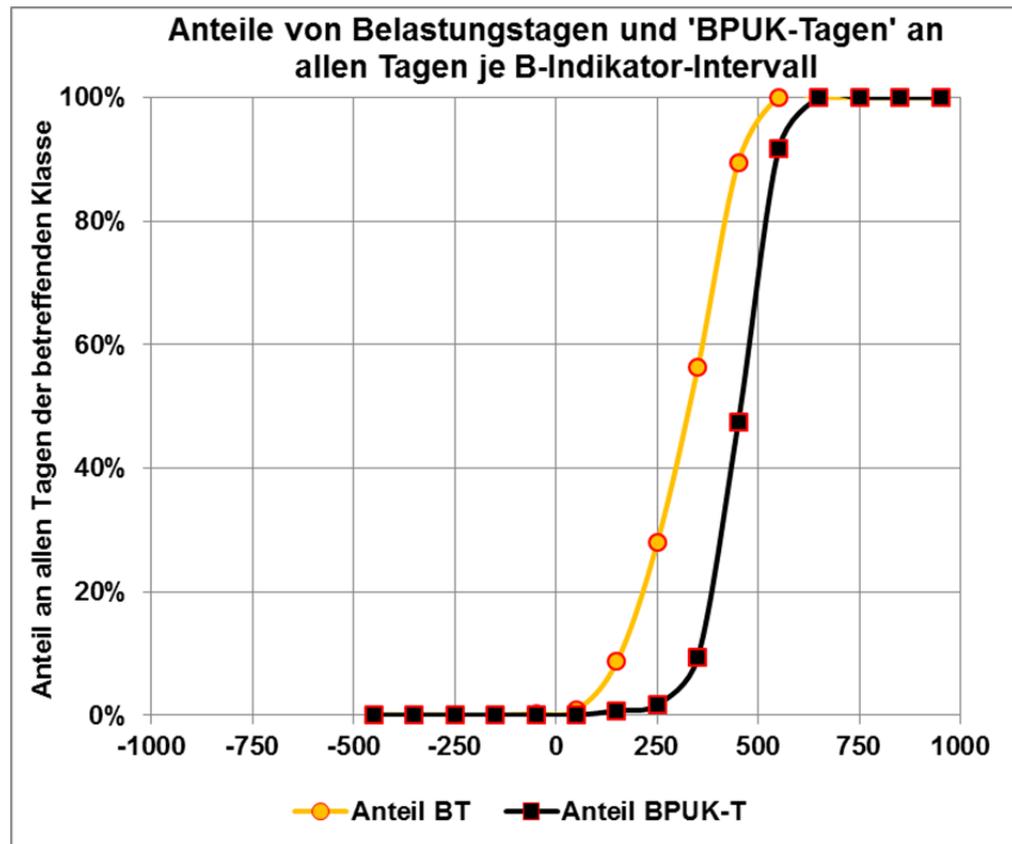


Abbildung 7.4: Anteile von Belastungstagen (BT) bzw. BPUK-Tagen an allen Tagen je Intervall von 100 des B-Indikators, Sedel, Winterhalbjahre 2001-2012. Lesebeispiel: Im Intervall des B-Indikators von 200-300 (Wert eingezeichnet für 250) sind knapp 30% aller Tage, welche einen B-Indikator in diesem Intervall aufweisen, Belastungstage.

Von entscheidender Bedeutung sind die kumulierten Anteile von Belastungstagen resp. BPUK-Tagen oberhalb bestimmter Schwellenwerte des B-Indikators. Man möchte also Aussagen machen wie "Tage mit einem B-Indikator von mehr als 400 sind zu 95% Belastungstage". Die folgende Grafik zeigt den **Prozentsatz von Belastungstagen an allen Tagen** oberhalb eines Schwellenwertes des B-Indikators in Abhängigkeit von diesem Schwellenwert. Sie zeigt als zweites den **Prozentsatz von Belastungstagen an allen Belastungstagen** oberhalb eines Schwellenwertes des B-Indikators. Mit Letzterem kann man Aussagen machen wie "Knapp 30% aller Belastungstage weisen einen B-Indikator von mehr als 400 auf".

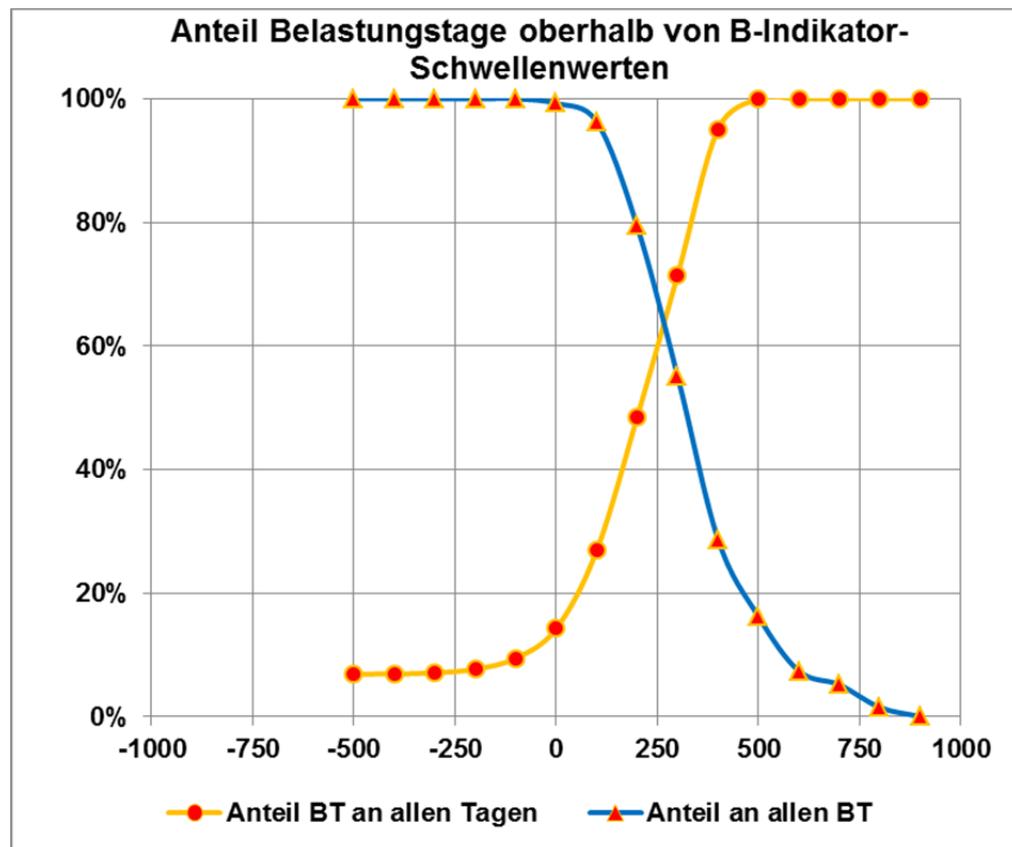


Abbildung 7.5: Anteil von Belastungstagen (BT) an allen Tagen bzw. an allen Belastungstagen oberhalb von B-Indikator-Schwellenwerten. Lesebeispiele: Von den Tagen mit einem B-Indikator >300 sind  $\frac{3}{4}$  Belastungstage; 55% aller Belastungstage weisen einen B-Indikator von >300 auf.

Die folgende Grafik zeigt die gleichen Parameter bezogen auf BPUK-Tage; die Kurven verschieben sich zu höheren Werten für den B-Indikator hin.

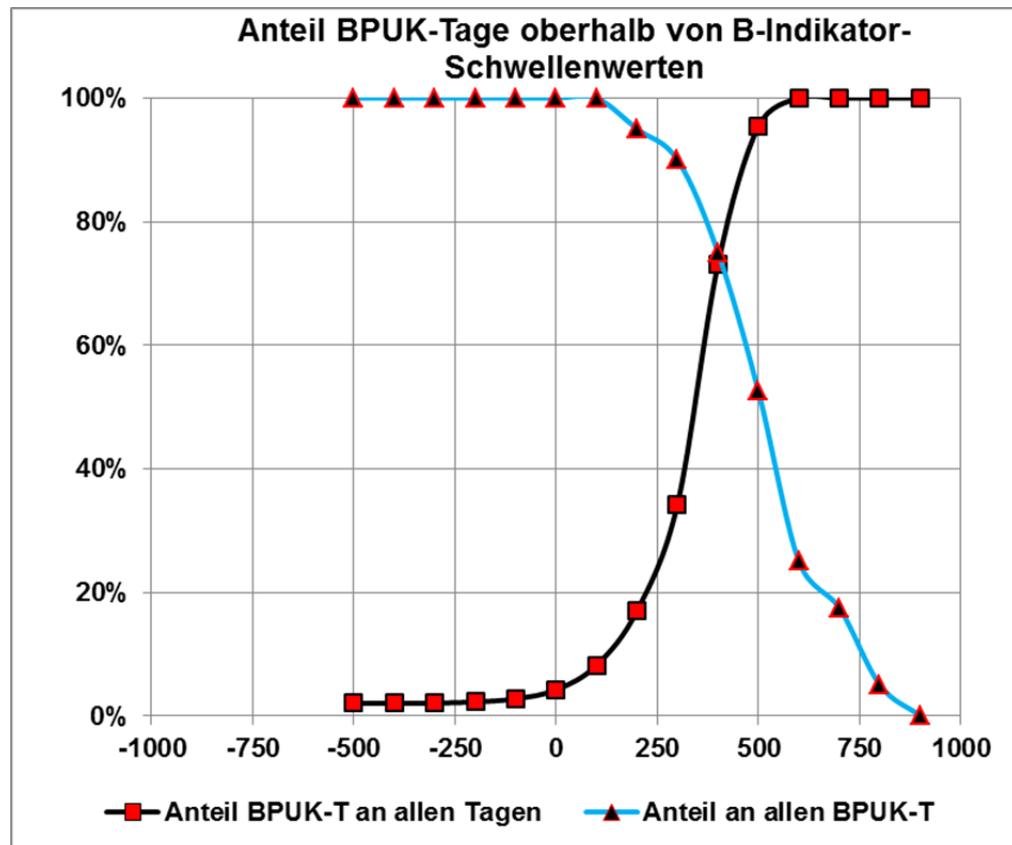


Abbildung 7.6: Anteil von BPUK-Tagen (BPUK-T) an allen Tagen bzw. an allen BPUK-Tagen oberhalb von B-Indikator-Schwellenwerten. Lesebeispiele: Von den Tagen mit einem B-Indikator >400 sind  $\frac{3}{4}$  BPUK-Tage;  $\frac{3}{4}$  aller BPUK-Tage weisen einen B-Indikator von >400 auf.

Es ist eine Ermessenssache, in welchem Umfang Unschärfen bezüglich des B-Indikators akzeptiert werden. Es ist denkbar, dass mit besserer Kenntnis des vertikalen Zustands der Atmosphäre (z.B. durch die Profilmessungen) die Unschärfe noch verringert werden könnte. Durch die Komplexität der Prozesse rund um PM10 wird sie aber immer in einem bestimmten Ausmass erhalten bleiben.

### 7.3. Diskussion der Inversionsprognose von MeteoSchweiz

MeteoSchweiz stellt im Winterhalbjahr regelmässig einen Inversionswetterbericht mit Prognosen für die nächsten Tage zur Verfügung. Diese Prognose müsste in erheblichem Masse modifiziert werden, wenn die Prognosewerte für die Indika-

torwerte verwendet werden sollten. Die nächste Abbildung zeigt ein Beispiel eines solchen Inversionswetterberichtes.

9. Februar 2012 20:57  
MeteoSCHWEIZ, Zürich



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement des Innern EDI  
Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie  
MeteoSCHWEIZ

## Inversionswetterbericht für die Zentral- und Ostschweiz

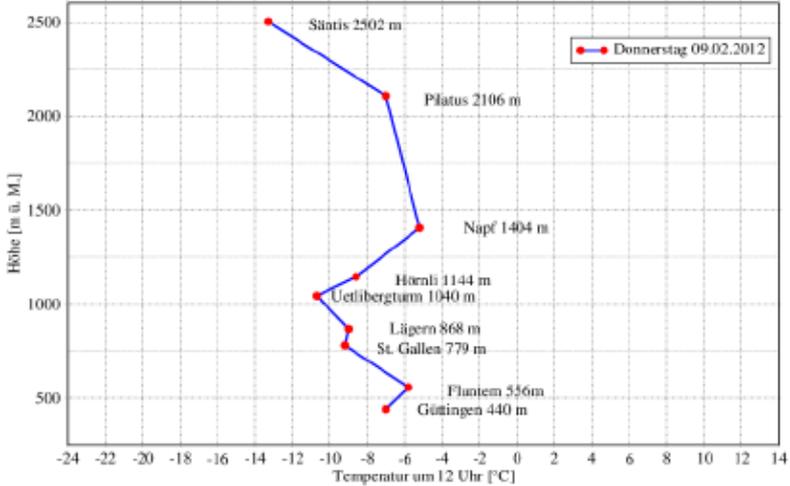
**Allgemeine Lage bis Mittwoch, 15.02.2012:**  
Am Freitag mit einer Störung zunächst keine Inversion. Im Laufe des Nachmittags Bildung einer recht hohen Inversion, von über 3000 Meter allmählich gegen 2500 Meter sinkend. Auf Samstag weiteres Absinken und Verstärken der Inversion. Im Laufe des Montags lässt die Bise allmählich nach und die Inversion sinkt weiter ab. Am Dienstag kommt eine Nordwestlage auf. Es werden Staffeln feuchter Luft zur Zentral- und Ostschweiz geführt. Es sind Schneefälle und Nordwestwinde, aber keine Inversionen zu erwarten.

**Tabelle Inversion und Bodenwind:**

Datum:	heute 10.02.2012	morgen 11.02.2012	Sonntag 12.02.2012	Montag 13.02.2012	Dienstag 14.02.2012	Mittwoch 15.02.2012
<b>Inversionsuntergrenze</b>	--	1300-1900m	1200-1700m	900-1200m	--	--
<b>Inversionsstärke</b>	keine	mittel	mittel	mittel	keine	keine
<b>Windrichtung</b>	NE (Bise)	NE (Bise)	NE (Bise)	N	NW	NW
<b>Windstärke [km/h]</b>	13-22	15-24	7-15	7-17	15-28	15-28
<b>Windstärke [m/s]</b>	4-6	4-7	2-4	2-5	4-8	4-8
<b>Temperatur 850 hPa</b>	-16	-10	-12	-9	-7	-7
<b>Windst. 850 hPa [km/h]</b>	28-37	33-43	28-37	15-22	19-46	28-46

Inversionsstärke: **keine**; **schwach**: 0-1.9 C/200 m; **mässig**: 2-3.9 C/200 m; **stark**: >=4 C/200 m

### Temperaturprofil des Vortages mit Bergstationen



**Abbildung 7.7: Beispiel eines Inversionswetterberichtes von MeteoSchweiz.**

Zunächst muss ganz allgemein festgehalten werden, dass auch die in dieser Tabelle vorkommenden Prognosewerte Fehlern unterworfen sind, wie alle meteorologischen Prognosen. Zu den einzelnen Prognosetermen ist im Hinblick auf eine Adaptierung für das Indikatormodell folgendes zu bemerken:

- Inversionen: Im Temperaturprofil müsste Güttingen durch Kloten ersetzt werden. Der Gradient zwischen Güttingen und Fluntern entspricht eher einem Horizontalgradienten (Region Zürich – Bodensee) denn einem Vertikalgradienten. Der Anteil Bodeninversionen müsste besser betrachtet werden, was aktuell (mit Güttingen) nicht möglich ist. Die Inversionsstärke und die tägliche Inversionsdauer (=Inversionshäufigkeit) hängen stark zusammen.
- Die Temperaturprognose müsste für die Bodenstationen erfolgen und nicht für das 850 hPa-Niveau (ca. 1500 m ü.M.); dies wäre allerdings schwieriger.

Möglicherweise könnten die Profilmessungen von MeteoSchweiz einerseits das Indikatormodell verbessern und andererseits und vor allem die Prognosefähigkeit für die Inputparameter des Indikatormodells verbessern.

**Fazit zu Kap. 7:**

**Der 'B-Indikator' ist ein Mass für die Wahrscheinlichkeit des Auftretens eines Belastungstages bzw. eines BPUK-Tages. Er wird aus den Parametern (→ Indikatoren) gebildet, deren Mittelwert in Anstiegsphasen und an Belastungstagen sich deutlich vom Wintermittel unterscheidet:**

- **PM10-Ausgangswert**
- **NO<sub>2</sub>**
- **Temperatur**
- **Windgeschwindigkeit**
- **Inversion:**
  - **Häufigkeit**
  - **Dynamik Untergrenze**
  - **Anteil Bodeninversion**

**Mit dem B-Indikator werden alle gegenwärtig erfassbaren Einflussparameter für erhöhte PM10-Werte in einer einzigen Zahl zusammengefasst. Für eine spätere effektive Prognose von Belastungsphasen müssten diese relevanten Parameter prognostiziert werden, was zurzeit nur zum Teil der Fall ist.**

**Der B-Indikator ist sehr selektiv gegenüber Belastungstagen und insbesondere BPUK-Tagen.**

**Die Prognosen im Inversionswetterbericht von MeteoSchweiz müssten im Hinblick auf eine Adaptierung für das Indikatormodell teilweise geändert werden.**

## 8. Fallstudie: Indikatoren der beiden Hochbelastungsphasen im Januar/Februar 2006

Im Januar und Februar 2006 kam es kurz hintereinander zu langandauernden hohen PM10-Belastungen. Wie zeigen sich diese beiden Phasen in den Indikatoren? Die folgenden Grafiken zeigen dies im Vergleich zu den Anstiegsphasen über alle elf Winterhalbjahre mit und ohne Belastungsphase.

Im Vergleich zu den Mittelwerten für die Anstiegsphasen mit Belastungsphasen in den elf Winterhalbjahren zeigen die Hochbelastungsphasen im 2006:

- **Markant höhere PM10-Ausgangswerte**; diese kommen durch **länger anhaltende Akkumulation** (die Phasen dauerten 10 bzw. 13 Tage lang) oder durch **PM10-Eintrag** zustande.
- **Deutlich höhere NO<sub>2</sub>-** und tiefere Ozon-Konzentrationen; dies ist ein Hinweis auf vermehrte Nitratbildung. Da gleichzeitig die NO<sub>x</sub>-Konzentrationen gleich oder leicht tiefer als im Mittel während der Anstiegsphasen war, waren offenbar die Konversionsbedingungen NO→NO<sub>2</sub> besonders gut.
- **Erheblich tiefere Temperaturen**; dies weist auf verstärkte Partikelkondensation hin.
- Andere Parameter stachen im Vergleich zu üblichen Anstiegsphasen nicht heraus.

Im Vergleich zwischen den beiden Hochbelastungsphasen im 2006 ist zu erwähnen:

- In der ersten Phase permanente Inversion mit absinkender Untergrenze → Ausfließen von Kaltluft; tiefe Globalstrahlung (Hochnebel).
- In der zweiten Phase hohe Inversionshäufigkeit, aber nicht permanent, mit deutlich ansteigender Untergrenze → dies kann wohl nur durch herangeführte Kaltluft erklärt werden. Nochmals deutlich erhöhter PM10-Ausgangswert.

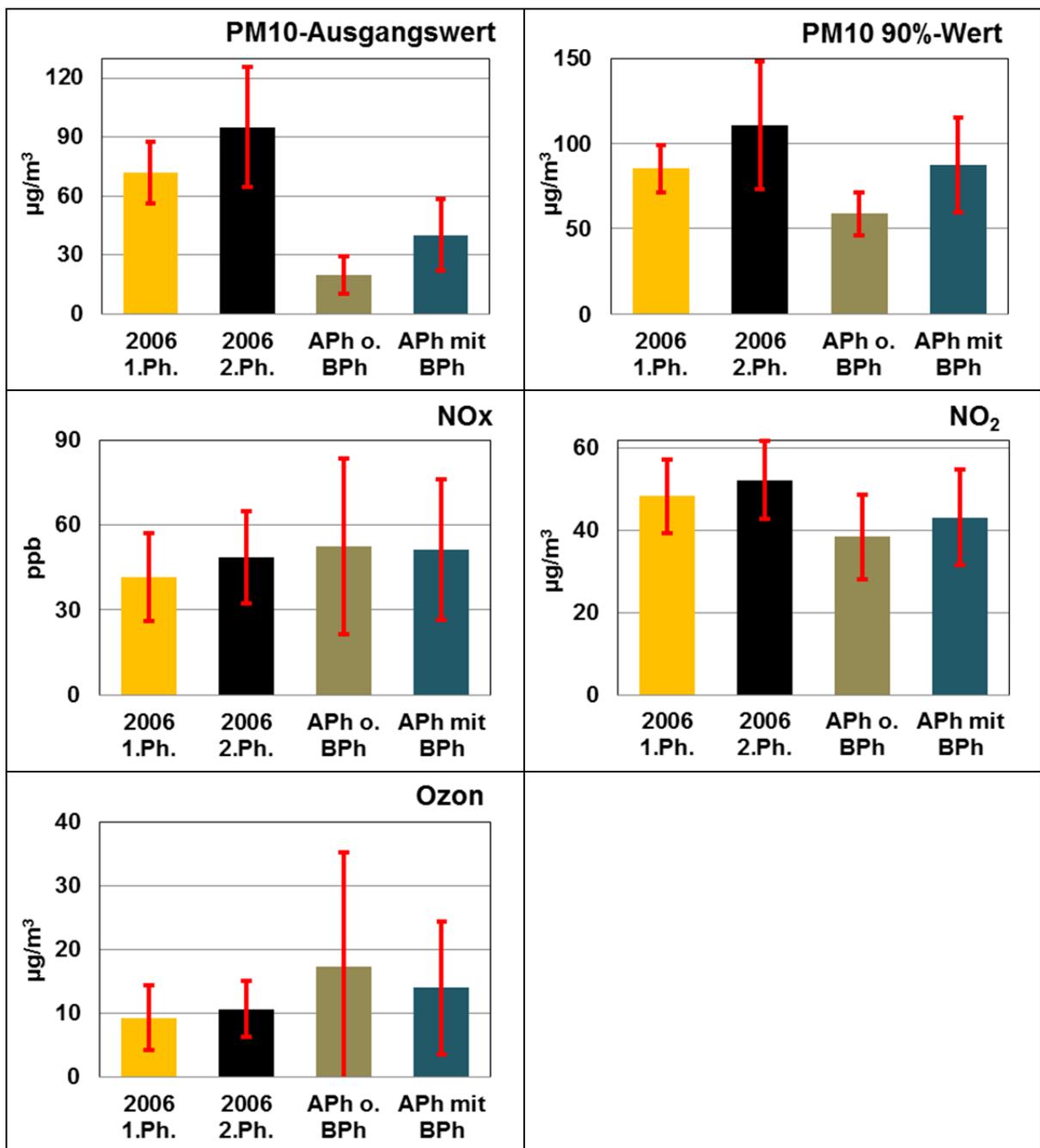


Abbildung 8.1: Mittlere tägliche Immissionskennzahlen und ihre Standardabweichungen für die beiden Hochbelastungsphasen 7.-16.1.2006 und 25.1.-6.2.2006 sowie mittlere Immissionskennzahlen und ihre Standardabweichungen für PM10-Anstiegsphasen ohne Belastungsphase (APh o. BPh) und solche im Vorfeld einer Belastungsphase (APh mit BPh). PM10-Ausgangswert (zu Beginn der Phase bzw. des Tages); 90%-Perzentil von PM10; NO<sub>x</sub>-, NO<sub>2</sub>- und Ozonmittelwert. Werte für Sedel.

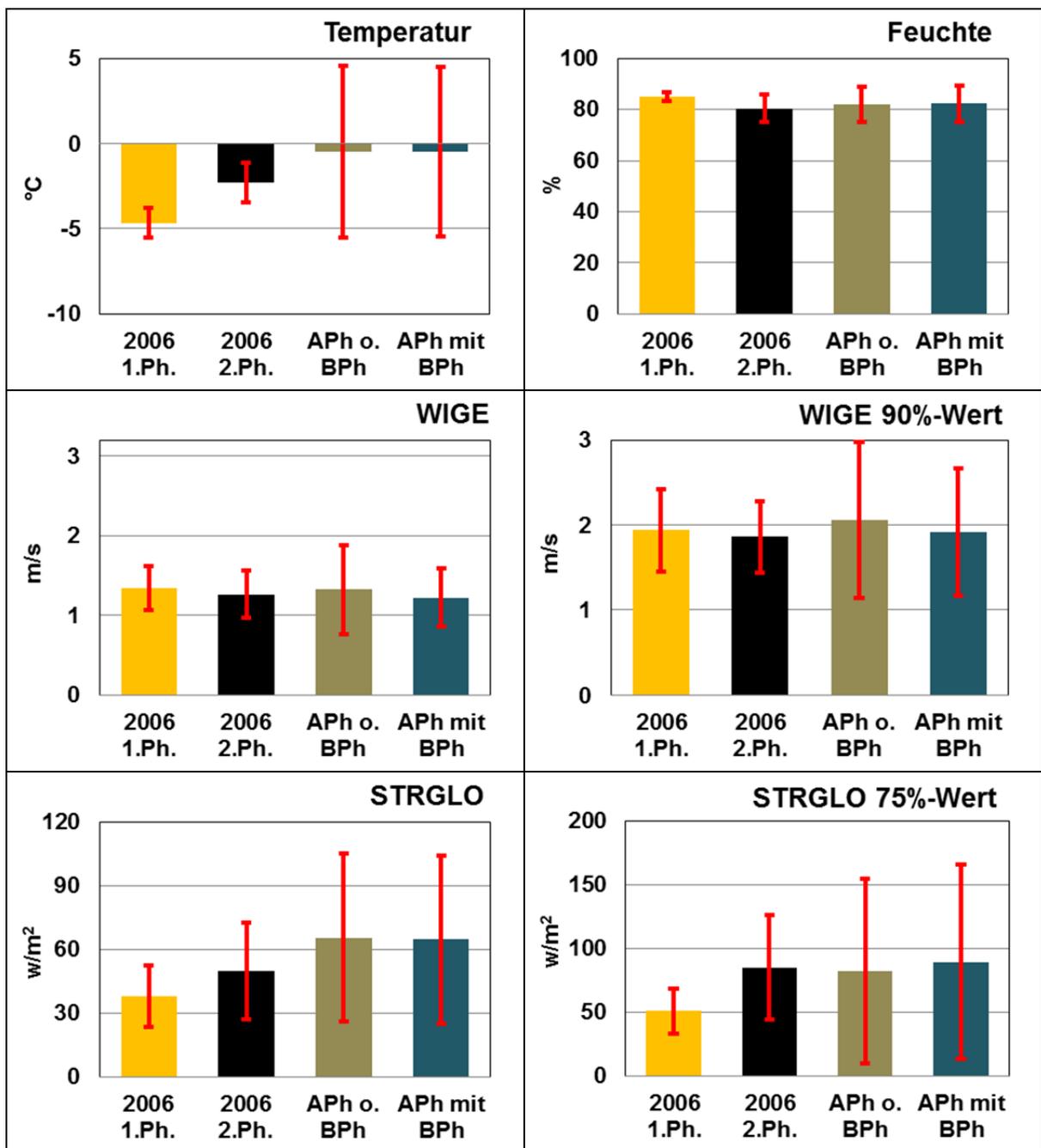


Abbildung 8.2: Mittlere tägliche meteorologische Kennzahlen und ihre Standardabweichungen für die beiden Hochbelastungsphasen 7.-16.1.2006 und 25.1.-6.2.2006 sowie mittlere meteorologische Kennzahlen und ihre Standardabweichungen für PM10-Anstiegsphasen ohne Belastungsphase (APH o. BPh) und solche im Vorfeld einer Belastungsphase (APH mit BPh). Temperatur; relative Luftfeuchtigkeit; Windgeschwindigkeit (WIGE; Mittelwert und 90%-Perzentil); Globalstrahlung (STRGLO; Mittelwert und 75%-Perzentil). Werte für Sedel.

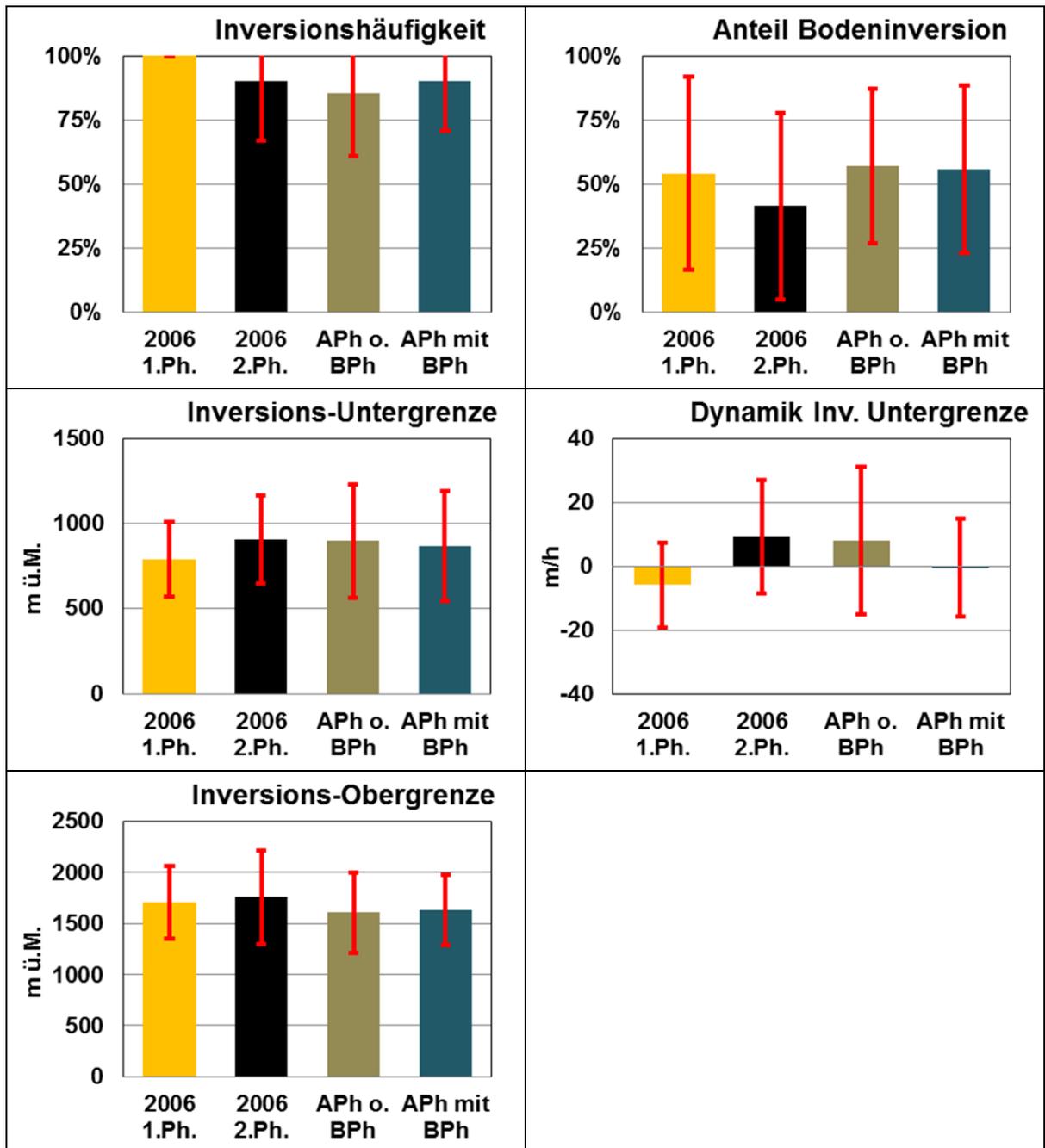
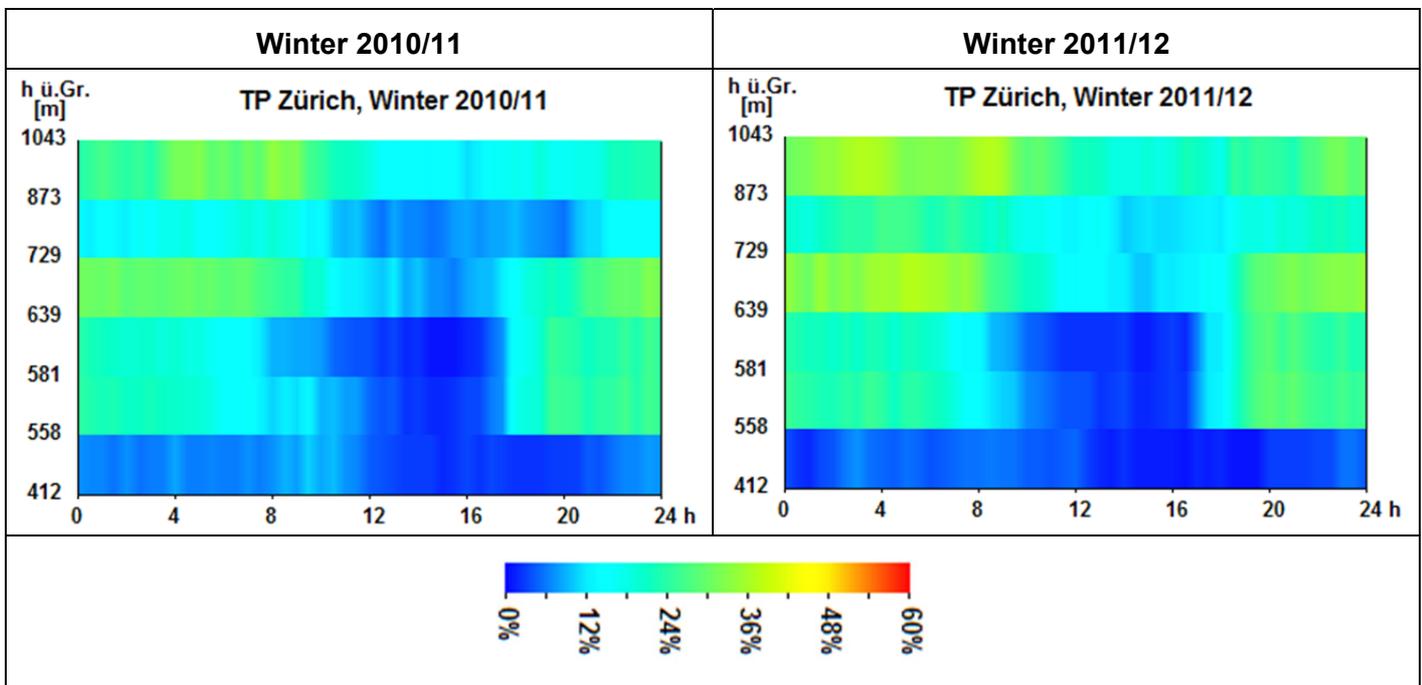


Abbildung 8.3: Mittlere tägliche Inversions-Kennzahlen und ihre Standardabweichungen für die beiden Hochbelastungsphasen 7.-16.1.2006 und 25.1.-6.2.2006 sowie mittlere Inversions-Kennzahlen und ihre Standardabweichungen für PM10-Anstiegsphasen ohne Belastungsphase (APh o. BPh) und solche im Vorfeld einer Belastungsphase (APh mit BPh). Inversionshäufigkeit; Anteil der Bodeninversionen an der Inversionszeit; Inversionsuntergrenze und ihre Dynamik (Veränderung während des Tages bzw. während der Anstiegsphase); Inversionsobergrenze. Inversionen vom TP Mittelland.

## 9. Fallstudie: Inversionen über Zürich

Verteilt über verschiedene Höhenlagen der Stadt Zürich besteht ein vertikales Temperaturprofil in diesem Raum. Die daraus bestimmten Inversionen wurden für die beiden Winterhalbjahre 2010/11 und 2011/12 untersucht und in Verbindung zu Immissionen an der Station Zürich-Kaserne gebracht.

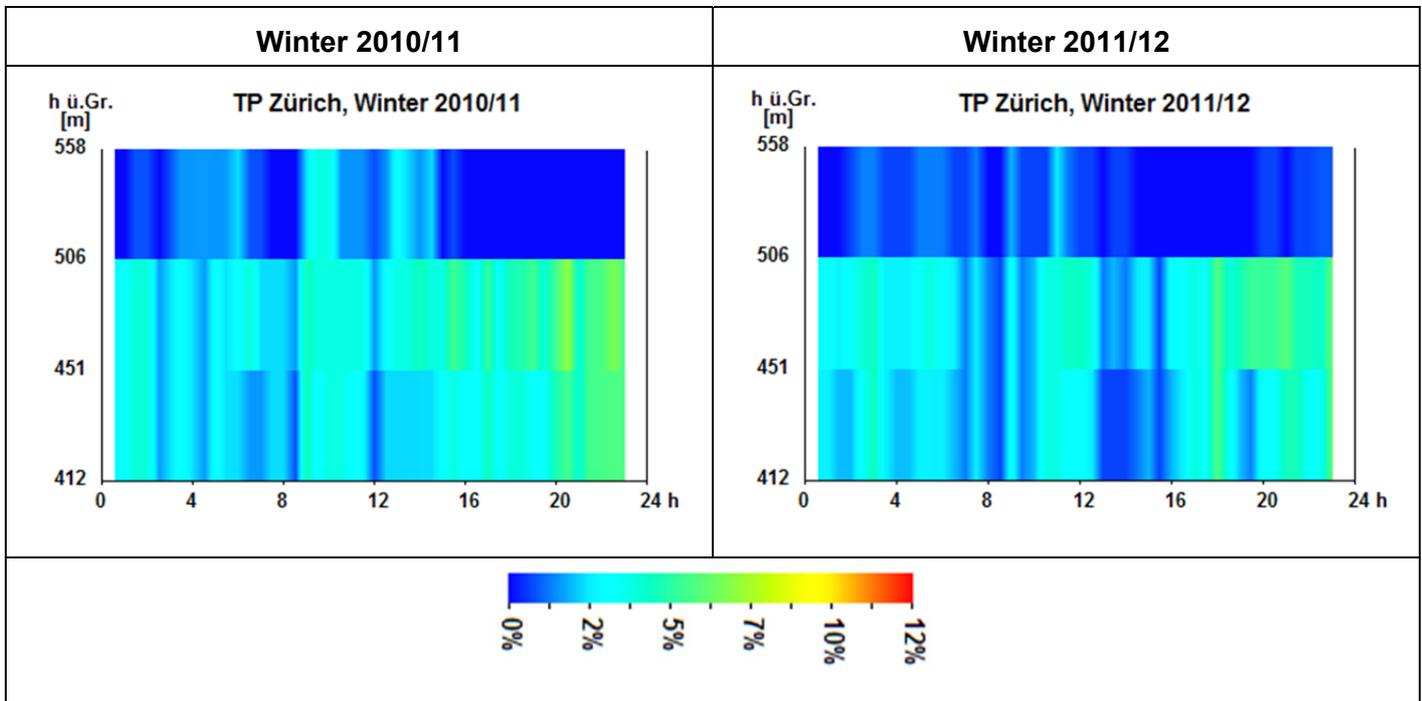
Die folgende Grafik zeigt die mittleren Inversionshäufigkeiten je Höhengschicht im mittleren Tagesgang für das TP Zürich für die beiden Winterhalbjahre 2010/11 und 2011/12. Hierbei wurden zunächst die untersten 150 Höhenmeter als eine Schicht behandelt.



**Abbildung 9.1: Inversionshäufigkeiten je Höhengschicht im mittleren Tagesgang, Temperaturprofil (TP) Zürich 412 – 1043 m ü.M., Winterhalbjahre 2010/11 und 2011/12.**

Beide Winterhalbjahre zeigen das gleiche Muster. Auf den untersten 150 Höhenmetern, also in der Luftschicht zwischen Innenstadt und Fluntern, gibt es praktisch keine Inversionen; der mittlere Temperaturgradient ist auch nahezu adiabatisch (in ungeschichteter Luft wird es mit der Höhe etwa um 1 °C kälter pro 100 m infolge des Druckabfalls). Es wird vermutet, dass dies ein Effekt der städtischen Wärmeinsel ist ("urban heat island").

Die untersten 150 Höhenmeter können in drei Schichten aufgeteilt werden. Das Inversionsauftreten nur isoliert in diesen drei Schichten betrachtet wird im Folgenden gezeigt.



**Abbildung 9.2: Inversionshäufigkeiten je Höhenschicht im mittleren Tagesgang, Temperaturprofil (TP) Zürich 412 – 558 m ü.M., Winterhalbjahre 2010/11 und 2011/12. ACHTUNG! ANDERE FARBSKALA ALS IN Abbildung 9.1.**

Von 23:30 bis 00:30 gibt es in obiger Abbildung keine Daten, weil dann an der Stampfenbachstrasse offenbar nie gemessen wird. Am Abend ist die Inversionshäufigkeit in den beiden unteren Schichten etwas höher. Die Schicht zwischen 500 und 550 m ü.M. (zwischen ETH und MeteoSchweiz Bodenpunkt) weist praktisch nie eine Inversion auf.

Es ist aber klar, dass die Immissionen in der Stadt Zürich viel häufiger als gemäss Abbildung 9.2 auf Inversionslagen reagieren, Inversionen, die oberhalb der städtischen Wärmeinsel liegen. Aus diesem Grunde wurde dieses Profil nicht für die vorliegende räumlich ausgedehnte Studie verwendet. Dennoch wurde überprüft, wie die NO<sub>x</sub>- und PM<sub>10</sub>-Immissionen an der Station Zürich-Kaserne auf die lokal städtischen Inversionen reagieren. Dazu wurde der Verlauf der Tageswerte betrachtet.

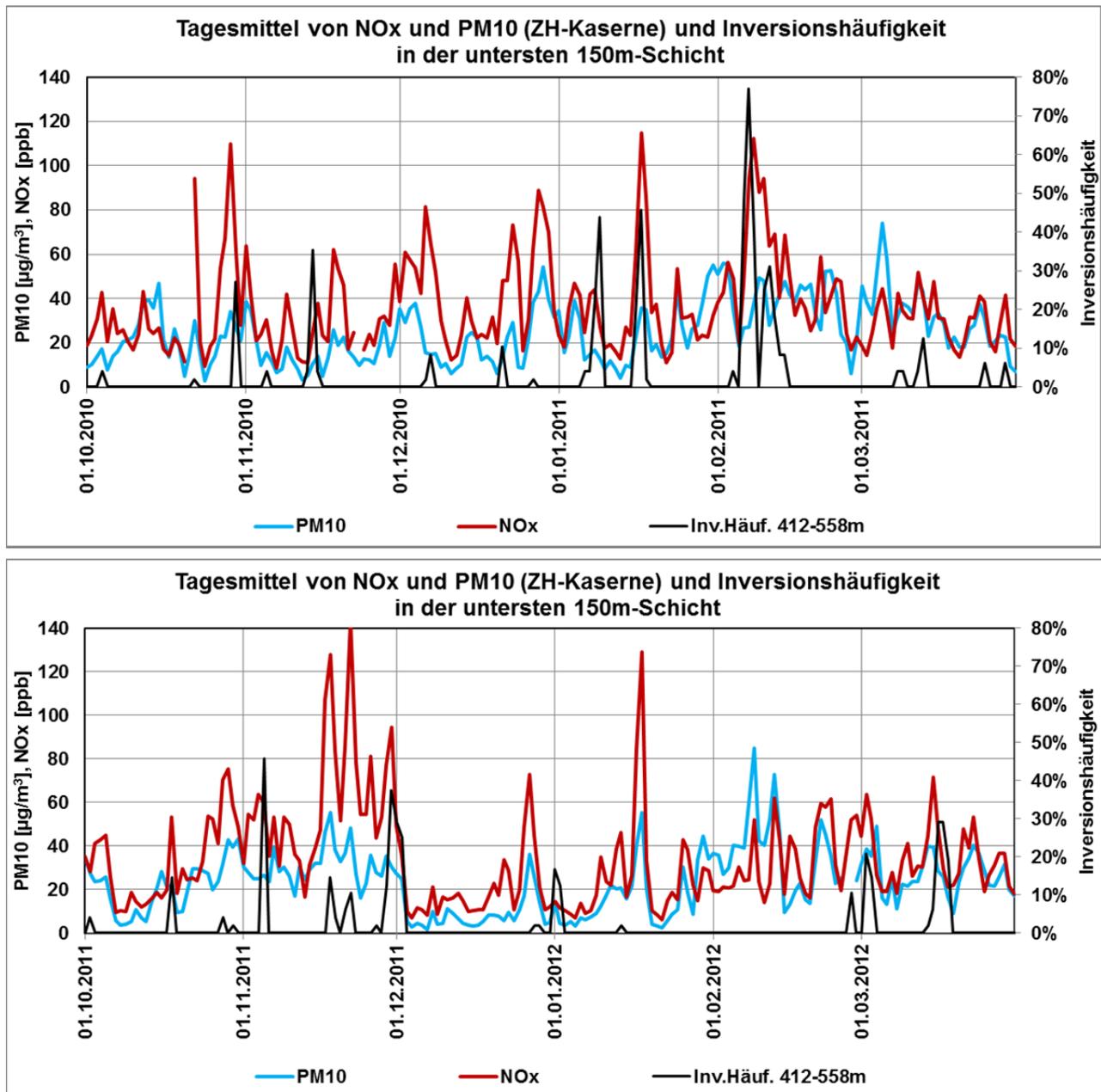


Abbildung 9.3: Tagesmittel von NOx und PM10 (ZH-Kaserne) und der Inversionshäufigkeit in der untersten 150m-Schicht über der Stadt Zürich, Winterhalbjahre 2010/11 (oben) bzw. 2011/12 (unten).

Die Inversionen in der untersten Schicht reichen jedenfalls nicht aus, um den meteorologischen Einfluss auf die Immissionen bei Zürich-Kaserne zu erklären. Viele Peaks sind nicht von Inversionen begleitet. Auf der anderen Seite gehen Inversionen in der untersten Schicht meistens mit einer erhöhten Immission einher, wobei NOx stärker reagiert als PM10.

Im Anhang A6 werden die Differenzen in den Inversionsparametern zwischen den TP Zürich und TP Mittelland bzw. TP St. Gallen und TP Mittelland gezeigt.



## Erklärung der Normierung der Überschreitungshäufigkeit des PM10-Grenzwertes in den Winterhalbjahren 2001-2012:

Die mittlere Überschreitungshäufigkeit des PM10-Grenzwertes wird berechnet, indem die Summe aller Tage mit Grenzwertüberschreitung in den Winterhalbjahren 2001-2012 durch die Summe aller Tage der Winterhalbjahre 2001-2012 dividiert wird. Für die Winterhalbjahre, für welche für eine bestimmte Station keine oder zu wenige Messungen vorliegen, wird eine Schätzung der Anzahl Grenzwertüberschreitungen gemacht.

Diese Schätzung wird wie folgt durchgeführt: Für jedes Winterhalbjahr  $i$  wird die mittlere Anzahl Grenzwertüberschreitungen  $\ddot{U}_{\text{ref},i}$  an den sechs Referenzstationen bestimmt. Für jede Station  $x$  wird dies für die vorhandenen Messjahre ebenfalls bestimmt ( $\ddot{U}_{x,i}$ ). Das Verhältnis  $v_{x,i} = \ddot{U}_{x,i} / \ddot{U}_{\text{ref},i}$  drückt aus, wie viele Grenzwertüberschreitungen es im Winterhalbjahr  $i$  an der Station  $x$  im Verhältnis zu den Referenzstationen gegeben hat. Der Mittelwert

$$w_x = \sum_{i=1}^n \left( \frac{v_{x,i}}{n} \right)$$

über alle gemessenen Winterhalbjahre ist ein Mass für die Überschreitungshäufigkeit an der Station  $x$  im Verhältnis zu den Referenzstationen.

Die Schätzung der Anzahl Überschreitungstage an der Station  $x$  in einem fehlenden Winterhalbjahr  $j$  ergibt sich dann zu

$$\ddot{U}_{x,j} = w_x * \ddot{U}_{\text{ref},j}$$

## Anhang A2: PM10-Belastungsphasen

**Tabelle A2.1: PM10-Belastungsphasen: Zeitpunkt, Anzahl Tage, Datum und Betrag des höchsten PM10-Tagesmittels, Winterhalbjahre 2001-2012. Rot: Informationsschwelle BPUK-Konzept im Laufe der Belastungsphase retrospektiv erreicht.**

Anfang	Ende	Tage	DatMax	PM10 max.	Anfang	Ende	Tage	DatMax	PM10 max.
01.01.2002	01.01.2002	1	01.01.2002	77	07.01.2006	16.01.2006	10	16.01.2006	103
05.01.2002	13.01.2002	9	12.01.2002	86	25.01.2006	06.02.2006	13	01.02.2006	165
16.01.2002	16.01.2002	1	16.01.2002	58	13.02.2006	14.02.2006	2	13.02.2006	60
13.02.2002	14.02.2002	2	13.02.2002	61	23.02.2006	25.02.2006	3	25.02.2006	62
17.02.2002	17.02.2002	1	17.02.2002	56	16.03.2006	20.03.2006	5	20.03.2006	70
06.03.2002	06.03.2002	1	06.03.2002	61	29.12.2006	29.12.2006	1	29.12.2006	67
15.03.2002	15.03.2002	1	15.03.2002	70	15.03.2007	16.03.2007	2	16.03.2007	86
12.12.2002	13.12.2002	2	13.12.2002	105	11.10.2007	12.10.2007	2	12.10.2007	56
10.01.2003	11.01.2003	2	10.01.2003	68	29.10.2007	29.10.2007	1	29.10.2007	55
13.01.2003	13.01.2003	1	13.01.2003	55	20.11.2007	22.11.2007	3	20.11.2007	58
14.02.2003	15.02.2003	2	15.02.2003	60	20.12.2007	20.12.2007	1	20.12.2007	55
18.02.2003	26.02.2003	9	21.02.2003	134	30.01.2008	30.01.2008	1	30.01.2008	58
10.11.2003	11.11.2003	2	10.11.2003	60	12.02.2008	14.02.2008	3	14.02.2008	85
22.11.2003	23.11.2003	2	23.11.2003	58	18.02.2008	20.02.2008	3	19.02.2008	64
10.12.2003	10.12.2003	1	10.12.2003	52	15.10.2008	15.10.2008	1	15.10.2008	58
19.12.2003	19.12.2003	1	19.12.2003	59	30.12.2008	31.12.2008	2	31.12.2008	58
26.12.2003	26.12.2003	1	26.12.2003	56	09.01.2009	10.01.2009	2	09.01.2009	64
07.01.2004	07.01.2004	1	07.01.2004	59	13.01.2009	17.01.2009	5	13.01.2009	62
24.01.2004	24.01.2004	1	24.01.2004	54	03.02.2009	03.02.2009	1	03.02.2009	50
21.02.2004	21.02.2004	1	21.02.2004	54	24.01.2010	24.01.2010	1	24.01.2010	65
05.03.2004	05.03.2004	1	05.03.2004	83	27.01.2010	27.01.2010	1	27.01.2010	54
03.12.2004	03.12.2004	1	03.12.2004	60	11.02.2010	18.02.2010	8	17.02.2010	86
10.12.2004	10.12.2004	1	10.12.2004	65	29.12.2010	29.12.2010	1	29.12.2010	54
14.12.2004	16.12.2004	3	15.12.2004	86	30.01.2011	02.02.2011	4	02.02.2011	56
16.01.2005	17.01.2005	2	17.01.2005	71	04.03.2011	06.03.2011	3	05.03.2011	74
06.02.2005	06.02.2005	1	06.02.2005	64	08.02.2012	09.02.2012	2	09.02.2012	85
25.02.2005	25.02.2005	1	25.02.2005	62	12.02.2012	13.02.2012	2	13.02.2012	73
23.12.2005	23.12.2005	1	23.12.2005	53					

# Anhang A3: Dokumentation der nachhaltigen PM10-Anstiege

Tabelle A3.1: Nachhaltige PM10-Anstiege für Sedel und Zürich-Kaserne, Winterhalbjahre 2001-2012.  
Rot: Anstiege im Vorfeld einer Belastungsphase; grün: gemeinsame Anstiege ohne Belastungsphase.

Anstiegsphasen Sedel				Anstiegsphasen ZH-Kaserne			
Anfang	Ende	Max. 24h-Anstieg [µg/m <sup>3</sup> ]	Dauer der Anstiegsphase [h]	Anfang	Ende	Max. 24h-Anstieg [µg/m <sup>3</sup> ]	Dauer der Anstiegsphase [h]
<b>WHj 2001/02</b>							
				04.10.2001 21:00	06.10.2001 02:00	21.8	29
				22.10.2001 12:30	23.10.2001 19:00	23.0	30.5
				03.11.2001 04:00	04.11.2001 14:30	31.8	34.5
				20.11.2001 18:00	21.11.2001 19:00	20.4	25
13.12.2001 11:30	15.12.2001 13:30	37.8	50	13.12.2001 15:30	15.12.2001 15:30	30.0	48
				19.12.2001 06:30	20.12.2001 12:30	21.5	30
31.12.2001 06:30	01.01.2002 14:30	35.5	32	31.12.2001 01:30	01.01.2002 23:00	57.3	45.5
02.01.2002 13:00	03.01.2002 14:00	20.9	25				
04.01.2002 09:00	06.01.2002 04:00	31.5	43	04.01.2002 01:30	06.01.2002 11:00	33.5	57.5
08.01.2002 09:00	09.01.2002 09:30	20.6	24.5	08.01.2002 09:30	09.01.2002 23:30	32.3	38
16.01.2002 10:30	17.01.2002 13:30	22.1	27	28.01.2002 13:00	30.01.2002 08:00	23.4	43
				07.02.2002 08:00	08.02.2002 08:30	20.3	24.5
12.02.2002 21:00	14.02.2002 14:30	62.1	41.5	12.02.2002 18:00	14.02.2002 12:00	78.8	42
05.03.2002 02:30	06.03.2002 12:00	23.5	33.5	04.03.2002 17:30	06.03.2002 03:30	25.6	34
				13.03.2002 13:30	14.03.2002 13:30	20.2	24
				30.03.2002 09:00	31.03.2002 09:00	20.0	24
<b>WHj 2002/03</b>							
				19.10.2002 14:30	20.10.2002 17:00	21.5	26.5
				11.11.2002 16:00	13.11.2002 06:00	26.7	38
				17.11.2002 12:30	18.11.2002 18:00	27.4	29.5
				12.12.2002 00:30	13.12.2002 22:00	42.2	45.5
27.12.2002 06:00	28.12.2002 11:30	22.2	29.5				
08.01.2003 13:00	11.01.2003 00:30	23.7	59.5	09.01.2003 16:30	11.01.2003 03:30	21.9	35
12.01.2003 16:00	14.01.2003 00:00	23.9	32	12.01.2003 11:30	13.01.2003 17:30	27.1	30
15.01.2003 22:00	17.01.2003 02:00	25.8	28				
				20.01.2003 13:00	21.01.2003 14:00	22.9	25
01.02.2003 04:30	02.02.2003 08:30	23.0	28				
07.02.2003 03:00	08.02.2003 09:00	25.3	30	07.02.2003 17:00	09.02.2003 08:00	26.3	39
17.02.2003 15:30	20.02.2003 05:30	29.0	62	17.02.2003 08:30	18.02.2003 11:00	20.2	26.5
				18.02.2003 19:30	20.02.2003 02:30	21.9	31
20.02.2003 08:00	21.02.2003 16:00	24.1	32	20.02.2003 03:00	22.02.2003 05:30	32.2	50.5
24.02.2003 23:30	26.02.2003 08:00	47.2	32.5				
03.03.2003 17:30	04.03.2003 17:30	26.3	24	03.03.2003 09:30	04.03.2003 21:30	28.6	36

Anstiegsphasen Sedel				Anstiegsphasen ZH-Kaserne			
Anfang	Ende	Max. 24h-Anstieg [µg/m3]	Dauer der Anstiegsphase [h]	Anfang	Ende	Max. 24h-Anstieg [µg/m3]	Dauer der Anstiegsphase [h]
<b>WHj 2003/04</b>							
				27.10.2003 20:00	29.10.2003 09:30	33.9	37.5
				03.11.2003 19:30	05.11.2003 00:00	22.8	28.5
				08.11.2003 15:00	10.11.2003 05:00	24.2	38
18.11.2003 19:00	20.11.2003 06:30	22.0	35.5				
21.11.2003 03:30	22.11.2003 08:30	21.6	29	20.11.2003 00:30	21.11.2003 03:30	22.5	27
03.12.2003 05:30	04.12.2003 06:30	20.4	25				
08.12.2003 02:00	09.12.2003 21:00	22.2	43				
16.12.2003 14:00	17.12.2003 19:00	21.6	29				
17.12.2003 19:30	19.12.2003 06:30	24.0	35	17.12.2003 18:30	18.12.2003 19:00	20.1	24.5
				24.12.2003 18:30	25.12.2003 23:30	21.1	29
09.02.2004 14:00	11.02.2004 04:00	24.3	38				
20.02.2004 04:00	22.02.2004 11:00	26.3	55	20.02.2004 05:30	21.02.2004 21:00	28.6	39.5
04.03.2004 04:30	06.03.2004 03:30	29.3	47	04.03.2004 04:00	06.03.2004 07:00	28.7	51
				30.03.2004 10:30	31.03.2004 14:00	21.3	27.5
<b>WHj 2004/05</b>							
15.11.2004 08:00	16.11.2004 19:30	26.1	35.5	15.11.2004 08:00	16.11.2004 20:30	24.3	36.5
24.11.2004 22:30	26.11.2004 02:30	21.2	28	24.11.2004 18:30	26.11.2004 16:30	31.2	46
02.12.2004 02:00	03.12.2004 13:30	23.4	35.5				
				07.12.2004 00:30	08.12.2004 00:30	20.1	24
09.12.2004 19:00	10.12.2004 20:00	20.2	25	09.12.2004 16:30	11.12.2004 01:00	31.2	32.5
15.12.2004 14:00	16.12.2004 17:30	25.3	27.5	13.12.2004 23:00	15.12.2004 07:00	31.5	32
07.01.2005 03:30	08.01.2005 08:00	21.6	28.5				
14.01.2005 02:00	15.01.2005 06:00	23.1	28				
26.01.2005 04:30	27.01.2005 06:00	20.2	25.5				
27.01.2005 22:00	29.01.2005 05:30	24.6	31.5				
05.02.2005 14:00	07.02.2005 00:00	22.6	34	05.02.2005 00:30	06.02.2005 17:00	29.7	40.5
28.02.2005 18:30	02.03.2005 08:30	31.5	38	28.02.2005 22:00	02.03.2005 17:30	35.5	43.5
06.03.2005 04:30	07.03.2005 16:00	54.1	35.5	06.03.2005 05:00	07.03.2005 11:00	37.4	30
21.03.2005 10:30	22.03.2005 16:00	20.5	29.5				
<b>WHj 2005/06</b>							
28.11.2005 16:30	30.11.2005 04:00	23.3	35.5				
				01.12.2005 17:00	02.12.2005 20:00	20.7	27
22.12.2005 12:30	24.12.2005 02:30	22.8	38	22.12.2005 05:00	23.12.2005 12:00	24.5	31
29.12.2005 14:00	31.12.2005 05:00	34.0	39				
12.01.2006 00:30	13.01.2006 03:30	21.5	27	11.01.2006 07:30	12.01.2006 16:30	44.4	33
				15.01.2006 14:30	16.01.2006 18:30	31.6	28
24.01.2006 02:00	25.01.2006 18:00	27.7	40	24.01.2006 04:00	25.01.2006 19:30	31.4	39.5
26.01.2006 22:00	28.01.2006 13:30	24.3	39.5	26.01.2006 17:00	27.01.2006 23:00	30.9	30
29.01.2006 13:00	01.02.2006 10:30	36.3	69.5	30.01.2006 02:00	31.01.2006 12:30	22.1	34.5
				31.01.2006 13:00	01.02.2006 18:00	50.7	29
12.02.2006 05:30	14.02.2006 09:30	25.9	52	12.02.2006 09:30	14.02.2006 06:00	23.3	44.5
				21.02.2006 21:00	23.02.2006 11:00	26.2	38
15.03.2006 04:30	16.03.2006 08:00	20.8	27.5				
				19.03.2006 07:00	20.03.2006 13:00	26.8	30

Anstiegsphasen Sedel				Anstiegsphasen ZH-Kaserne			
Anfang	Ende	Max. 24h-Anstieg [µg/m <sup>3</sup> ]	Dauer der Anstiegsphase [h]	Anfang	Ende	Max. 24h-Anstieg [µg/m <sup>3</sup> ]	Dauer der Anstiegsphase [h]
<b>WHj 2006/07</b>							
24.10.2006 21:00	26.10.2006 06:00	26.0	33				
16.11.2006 18:00	17.11.2006 19:30	20.9	25.5				
				24.11.2006 10:00	25.11.2006 15:30	23.7	29.5
13.12.2006 20:00	15.12.2006 07:30	27.5	35.5	13.12.2006 12:30	15.12.2006 06:30	30.1	42
20.12.2006 09:30	21.12.2006 18:00	25.1	32.5				
				17.02.2007 09:00	18.02.2007 14:30	22.6	29.5
14.03.2007 06:00	16.03.2007 07:30	28.6	49.5	14.03.2007 15:30	16.03.2007 19:30	25.6	52
				26.03.2007 11:00	27.03.2007 18:00	25.8	31
<b>WHj 2007/08</b>							
19.11.2007 01:30	20.11.2007 09:30	29.3	32	19.11.2007 04:00	20.11.2007 08:30	21.2	28.5
28.11.2007 02:30	29.11.2007 22:00	23.1	43.5				
31.12.2007 07:30	01.01.2008 17:30	21.4	34	31.12.2007 02:00	01.01.2008 17:00	39.7	39
02.01.2008 23:00	04.01.2008 11:30	23.0	36.5				
23.01.2008 00:00	24.01.2008 09:30	22.5	33.5				
29.01.2008 03:00	30.01.2008 06:00	20.3	27				
14.02.2008 11:30	15.02.2008 16:00	40.4	28.5	13.02.2008 04:30	14.02.2008 15:00	30.3	34.5
17.02.2008 07:00	18.02.2008 21:00	30.7	38	17.02.2008 06:00	18.02.2008 17:00	33.2	35
<b>WHj 2008/09</b>							
13.10.2008 23:00	15.10.2008 08:00	21.4	33				
15.10.2008 08:30	16.10.2008 10:00	30.1	25.5				
28.12.2008 17:00	30.12.2008 15:00	31.1	46				
12.01.2009 17:30	13.01.2009 22:30	26.4	29				
26.01.2009 06:00	27.01.2009 11:00	23.3	29				
01.02.2009 21:00	03.02.2009 05:30	20.7	32.5				
				19.02.2009 03:00	20.02.2009 09:30	21.4	30.5
				22.03.2009 12:30	23.03.2009 18:30	22.7	30
<b>WHj 2009/10</b>							
20.11.2009 04:00	21.11.2009 11:30	21.2	31.5				
				31.12.2009 03:00	01.01.2010 19:00	50.7	40
04.01.2010 04:00	05.01.2010 08:30	20.5	28.5				
18.01.2010 22:30	20.01.2010 10:00	23.1	35.5				
24.01.2010 06:00	25.01.2010 17:30	25.6	35.5	23.01.2010 11:30	25.01.2010 08:00	29.5	44.5
26.01.2010 17:00	28.01.2010 07:00	29.9	38	26.01.2010 14:00	28.01.2010 01:30	25.5	35.5
04.02.2010 06:30	05.02.2010 10:00	20.6	27.5	03.02.2010 23:00	05.02.2010 11:00	22.7	36
10.02.2010 23:00	12.02.2010 15:00	41.9	40	10.02.2010 23:00	12.02.2010 10:00	31.2	35
15.02.2010 15:30	18.02.2010 00:00	37.6	56.5	15.02.2010 13:00	17.02.2010 09:00	29.5	44
10.03.2010 06:00	11.03.2010 13:30	27.5	31.5				

Anstiegsphasen Sedel				Anstiegsphasen ZH-Kaserne			
Anfang	Ende	Max. 24h-Anstieg [µg/m3]	Dauer der Anstiegsphase [h]	Anfang	Ende	Max. 24h-Anstieg [µg/m3]	Dauer der Anstiegsphase [h]
<b>WHj 2010/11</b>							
27.11.2010 17:00	28.11.2010 21:00	20.6	28				
				26.12.2010 13:30	27.12.2010 19:30	21.1	30
17.01.2011 05:30	18.01.2011 08:00	20.4	26.5				
23.01.2011 14:30	24.01.2011 22:30	23.2	32	23.01.2011 18:30	25.01.2011 01:00	21.3	30.5
21.02.2011 19:30	23.02.2011 08:30	27.7	37	21.02.2011 11:00	22.02.2011 21:00	29.6	34
28.02.2011 07:30	02.03.2011 07:00	24.5	47.5	28.02.2011 08:00	02.03.2011 06:00	24.3	46
03.03.2011 19:30	05.03.2011 09:00	26.4	37.5	04.03.2011 02:00	05.03.2011 11:00	21.4	33
<b>WHj 2011/12</b>							
				17.01.2012 03:00	18.01.2012 13:00	22.9	34
29.01.2012 01:30	30.01.2012 18:30	34.4	41	28.01.2012 22:30	30.01.2012 16:30	34.5	42
08.02.2012 02:00	09.02.2012 21:30	35.5	43.5	08.02.2012 00:30	09.02.2012 20:00	37.5	43.5
12.02.2012 12:00	13.02.2012 20:00	26.4	32	12.02.2012 05:00	13.02.2012 19:30	31.3	38.5
21.02.2012 11:00	22.02.2012 18:30	20.6	31.5	21.02.2012 02:00	22.02.2012 17:30	23.3	39.5

**Tabelle A3.2: Auflistung der 55 Belastungsphasen, Winterhalbjahre 2001-2012. Gelb: Nachhaltiger PM10-Anstieg bei Zürich-Kaserne und Sedel; blau: Anstieg nur bei Sedel; rot: Anstieg nur bei Zürich-Kaserne; schwarz: kein Anstieg. MaxTag: Anzahl Tage des PM10-Maximums vor Ende der Belastungsphase; 1 = letzter Tag.**

Anfang	Ende	Dauer [Tage]	DatMax	PM10max [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ]	MaxTag [von Ende]	Vortag	PM10 Vortag ZH-Kas. [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ]	PM10 Vortag Sedel [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ]
01.01.2002	01.01.2002	1	01.01.2002	77	1	31.12.2001	20	22
05.01.2002	13.01.2002	9	12.01.2002	86	2	04.01.2002	41	56
16.01.2002	16.01.2002	1	16.01.2002	58	1	15.01.2002	47	45
13.02.2002	14.02.2002	2	13.02.2002	61	2	12.02.2002	15	20
17.02.2002	17.02.2002	1	17.02.2002	56	1	16.02.2002	38	43
06.03.2002	06.03.2002	1	06.03.2002	61	1	05.03.2002	56	49
15.03.2002	15.03.2002	1	15.03.2002	70	1	14.03.2002	62	50
12.12.2002	13.12.2002	2	13.12.2002	105	1	11.12.2002	48	62
10.01.2003	11.01.2003	2	10.01.2003	68	2	09.01.2003	46	56
13.01.2003	13.01.2003	1	13.01.2003	55	1	12.01.2003	40	48
14.02.2003	15.02.2003	2	15.02.2003	60	1	13.02.2003	44	38
18.02.2003	26.02.2003	9	21.02.2003	134	6	17.02.2003	36	30
10.11.2003	11.11.2003	2	10.11.2003	60	2	09.11.2003	52	48
22.11.2003	23.11.2003	2	23.11.2003	58	1	21.11.2003	44	46
10.12.2003	10.12.2003	1	10.12.2003	52	1	09.12.2003	41	50
19.12.2003	19.12.2003	1	19.12.2003	59	1	18.12.2003	48	62
26.12.2003	26.12.2003	1	26.12.2003	56	1	25.12.2003	43	51
07.01.2004	07.01.2004	1	07.01.2004	59	1	06.01.2004	56	49
24.01.2004	24.01.2004	1	24.01.2004	54	1	23.01.2004	45	39
21.02.2004	21.02.2004	1	21.02.2004	54	1	20.02.2004	32	27
05.03.2004	05.03.2004	1	05.03.2004	83	1	04.03.2004	52	37
03.12.2004	03.12.2004	1	03.12.2004	60	1	02.12.2004	46	56
10.12.2004	10.12.2004	1	10.12.2004	65	1	09.12.2004	34	40
14.12.2004	16.12.2004	3	15.12.2004	86	2	13.12.2004	51	47
16.01.2005	17.01.2005	2	17.01.2005	71	1	15.01.2005	49	44
06.02.2005	06.02.2005	1	06.02.2005	64	1	05.02.2005	49	35
25.02.2005	25.02.2005	1	25.02.2005	62	1	24.02.2005	51	47

Anfang	Ende	Dauer [Tage]	DatMax	PM10max [µg/m <sup>3</sup> ]	MaxTag [von Ende]	Vortag	PM10 Vortag ZH-Kas. [µg/m <sup>3</sup> ]	PM10 Vortag Sedel [µg/m <sup>3</sup> ]
23.12.2005	23.12.2005	1	23.12.2005	53	1	22.12.2005	43	38
07.01.2006	16.01.2006	10	16.01.2006	103	1	06.01.2006	36	42
25.01.2006	06.02.2006	13	01.02.2006	165	6	24.01.2006	44	45
13.02.2006	14.02.2006	2	13.02.2006	60	2	12.02.2006	37	36
23.02.2006	25.02.2006	3	25.02.2006	62	1	22.02.2006	47	44
16.03.2006	20.03.2006	5	20.03.2006	70	1	15.03.2006	41	62
29.12.2006	29.12.2006	1	29.12.2006	67	1	28.12.2006	50	40
15.03.2007	16.03.2007	2	16.03.2007	86	1	14.03.2007	45	44
11.10.2007	12.10.2007	2	12.10.2007	56	1	10.10.2007	40	43
29.10.2007	29.10.2007	1	29.10.2007	55	1	28.10.2007	52	44
20.11.2007	22.11.2007	3	20.11.2007	58	3	19.11.2007	50	48
20.12.2007	20.12.2007	1	20.12.2007	55	1	19.12.2007	49	49
30.01.2008	30.01.2008	1	30.01.2008	58	1	29.01.2008	49	55
12.02.2008	14.02.2008	3	14.02.2008	85	1	11.02.2008	40	59
18.02.2008	20.02.2008	3	19.02.2008	64	2	17.02.2008	35	40
15.10.2008	15.10.2008	1	15.10.2008	58	1	14.10.2008	41	46
30.12.2008	31.12.2008	2	31.12.2008	58	1	29.12.2008	40	50
09.01.2009	10.01.2009	2	09.01.2009	64	2	08.01.2009	44	44
13.01.2009	17.01.2009	5	13.01.2009	62	5	12.01.2009	52	49
03.02.2009	03.02.2009	1	03.02.2009	50	1	02.02.2009	45	52
24.01.2010	24.01.2010	1	24.01.2010	65	1	23.01.2010	35	44
27.01.2010	27.01.2010	1	27.01.2010	54	1	26.01.2010	30	32
11.02.2010	18.02.2010	8	17.02.2010	86	2	10.02.2010	37	38
29.12.2010	29.12.2010	1	29.12.2010	54	1	28.12.2010	43	44
30.01.2011	02.02.2011	4	02.02.2011	56	1	29.01.2011	38	42
04.03.2011	06.03.2011	3	05.03.2011	74	2	03.03.2011	33	40
08.02.2012	09.02.2012	2	09.02.2012	85	1	07.02.2012	39	45
12.02.2012	13.02.2012	2	13.02.2012	73	1	11.02.2012	40	56

# Anhang A4: Dokumentation der Einflussgrößen in Anstiegsphasen

Anstiegsphase ZH-Kaserne		ZUE-Kaserne								Inversion Mittelland								
Anfang	Ende	Max. 24h-Anstieg	Dauer der Anstiegsphase	NOx [ppb]	O3 [ppb]	TEMP	FEUCHTE	WIGE	STRGLO	UnterGr <	OberGr <	Häufigkeit	Dynamik UGr [m/h]	PM10 Ausgangswert	PM10 90%	WG 90%	STRGLO 75%	Anteil Bodeninv.
04.10.2001 21:00	06.10.2001 02:00	21.8	29	62	1.8	13.6	82	1.1	77	607	1120	95%	3	22	48	1.7	93	91%
22.10.2001 12:30	23.10.2001 19:00	23.0	30.5	73	6.4	13.1	73	1.3	92	739	1397	69%	44	6	38	2.4	155	79%
03.11.2001 04:00	04.11.2001 14:30	31.8	34.5	49	4.5	6.7	79	1.1	99	748	2211	100%	-8	17	65	1.7	188	67%
20.11.2001 18:00	21.11.2001 19:00	20.4	25	83	3.5	2.3	77	1.3	14	910	1349	100%	47	23	60	1.9	28	57%
13.12.2001 15:30	15.12.2001 15:30	30.0	48	20	11.4	-9.4	65	3.3	51	1385	2051	92%	-5	12	59	5.5	90	0%
19.12.2001 06:30	20.12.2001 12:30	21.5	30	30	8.0	-1.9	74	1.8	15	1261	1997	95%	-9	23	61	2.4	36	0%
31.12.2001 01:30	01.01.2002 23:00	57.3	45.5	32	11.0	-1.8	69	1.5	50	827	1431	49%	-9	16	89	2.2	59	80%
04.01.2002 01:30	06.01.2002 11:00	33.5	57.5	56	2.1	-4.4	79	1.7	34	704	1733	100%	-8	31	82	2.4	33	66%
08.01.2002 09:30	09.01.2002 23:30	32.3	38	53	2.8	-1.6	82	1.6	46	664	1983	100%	3	30	72	2.1	68	70%
28.01.2002 13:00	30.01.2002 08:00	23.4	43	75	6.3	7.7	74	2.0	43	656	1597	85%	-1	16	53	4.6	65	82%
07.02.2002 08:00	08.02.2002 08:30	20.3	24.5	34	7.1	5.2	80	2.1	39	1034	1289	56%	-22	10	43	3.1	25	57%
12.02.2002 18:00	14.02.2002 12:00	78.8	42	16	17.8	11.5	58	3.2	60	933	1423	41%	67	12	120	5.1	41	51%
04.03.2002 17:30	06.03.2002 03:30	25.6	34	74	3.2	5.5	72	1.4	83	738	1845	100%	-4	15	72	2.1	92	71%
13.03.2002 13:30	14.03.2002 13:30	20.2	24	73	10.2	12.7	52	1.5	126	668	1026	84%	27	34	78	2.7	215	80%
30.03.2002 09:00	31.03.2002 09:00	20.0	24	42	13.2	7.9	62	1.0	87	670	1177	61%	-1	39	62	1.7	198	80%
19.10.2002 14:30	20.10.2002 17:00	21.5	26.5	37	7.5	7.4	78	1.4	83	712	1226	81%	27	7	36	2.2	174	73%
11.11.2002 16:00	13.11.2002 06:00	26.7	38	67	5.6	7.4	83	1.5	34	564	986	86%	0	5	58	2.4	9	98%
17.11.2002 12:30	18.11.2002 18:00	27.4	29.5	67	4.6	7.9	82	1.2	39	766	1087	75%	49	2	45	1.9	37	82%
12.12.2002 00:30	13.12.2002 22:00	42.2	45.5	110	0.6	0.5	84	1.4	26	655	1504	100%	-11	44	131	2.0	28	83%
09.01.2003 16:30	11.01.2003 03:30	21.9	35	32	6.1	-6.6	71	2.7	13	1437	2128	100%	31	48	80	3.3	1	0%
12.01.2003 11:30	13.01.2003 17:30	27.1	30	54	7.9	-5.3	67	1.5	69	929	1919	100%	-12	31	72	2.2	138	48%
20.01.2003 13:00	21.01.2003 14:00	22.9	25	79	1.6	3.8	81	1.8	53	631	1251	100%	2	21	57	2.6	63	90%
07.02.2003 17:00	09.02.2003 08:00	26.3	39	57	5.7	1.7	73	1.3	28	766	1370	85%	-15	27	72	2.0	8	64%
17.02.2003 08:30	18.02.2003 11:00	20.2	26.5	24	22.6	-3.7	66	2.5	74	1888	2106	100%	-14	30	54	3.7	80	0%
18.02.2003 19:30	20.02.2003 02:30	21.9	31	56	9.5	-4.4	70	1.6	48	865	2173	100%	-7	55	97	2.1	50	46%
20.02.2003 03:00	22.02.2003 05:30	32.2	50.5	106	3.5	-2.1	75	1.5	93	640	1909	100%	3	105	153	2.2	116	80%
03.03.2003 09:30	04.03.2003 21:30	28.6	36	51	10.5	4.8	74	1.6	115	648	1056	63%	3	6	50	2.4	134	87%
27.10.2003 20:00	29.10.2003 09:30	33.9	37.5	108	2.0	3.8	77	1.2	65	608	1289	100%	-1	60	88	1.6	62	91%
03.11.2003 19:30	05.11.2003 00:00	22.8	28.5	81	4.2	10.0	76	1.6	86	789	1209	91%	16	13	49	2.8	135	85%
08.11.2003 15:00	10.11.2003 05:00	24.2	38	71	2.3	5.0	76	1.2	52	604	1971	100%	-7	21	67	1.8	44	91%
20.11.2003 00:30	21.11.2003 03:30	22.5	27	168	0.8	6.1	90	0.9	31	571	1761	100%	-2	37	98	1.3	31	95%
17.12.2003 18:30	18.12.2003 19:00	20.1	24.5	103	1.7	-0.4	81	1.5	53	590	1805	100%	4	34	55	2.7	71	88%
24.12.2003 18:30	25.12.2003 23:30	21.1	29	63	3.3	-3.0	71	1.1	48	555	2053	100%	0	22	53	1.6	25	100%
20.02.2004 05:30	21.02.2004 21:00	28.6	39.5	33	9.9	3.3	64	2.4	106	993	1468	100%	-18	20	59	3.0	141	21%
04.03.2004 04:00	06.03.2004 07:00	28.7	51	76	4.4	3.4	66	1.3	71	733	1280	91%	0	35	114	2.2	109	69%
30.03.2004 10:30	31.03.2004 14:00	21.3	27.5	59	15.9	11.4	54	1.4	289	821	1398	71%	-10	34	67	3.3	655	73%
15.11.2004 08:00	16.11.2004 20:30	24.3	36.5	69	5.9	1.1	72	1.5	87	1199	2070	100%	-6	20	49	2.5	160	45%
24.11.2004 18:30	26.11.2004 16:30	31.2	46	86	2.5	3.6	78	1.5	35	827	1609	97%	-14	19	71	2.5	58	53%

## OSTLUFT &amp; in-luft PM10

Anstiegsphase ZH-Kaserne		ZUE-Kaserne								Inversion Mittelland				PM10	PM10	WG	STRGLO	Anteil
Anfang	Ende	Max. 24h-Anstieg	Dauer der Anstiegsphase	NOx [ppb]	O3 [ppb]	TEMP	FEUCHTE	WIGE	STRGLO	UnterGr <	OberGr <	Häufigkeit	Dynamik UGr [m/h]	Ausgangswert	90%	90%	75%	Bodeninv.
07.12.2004 00:30	08.12.2004 00:30	20.1	24	35	2.8	2.9	79	1.5	13	1132	1577	100%	0	20	54	2.1	20	0%
09.12.2004 16:30	11.12.2004 01:00	31.2	32.5	65	0.9	1.5	81	1.4	12	1088	1401	100%	-4	38	86	1.8	1	8%
13.12.2004 23:00	15.12.2004 07:00	31.5	32	92	0.9	0.1	84	1.4	26	555	1670	100%	0	58	105	1.8	2	100%
05.02.2005 00:30	06.02.2005 17:00	29.7	40.5	36	9.1	0.1	76	1.4	73	836	1709	94%	-6	45	81	2.0	109	35%
28.02.2005 22:00	02.03.2005 17:30	35.5	43.5	52	21.4	-5.7	59	1.4	178	846	1513	88%	-1	18	81	2.2	399	64%
06.03.2005 05:00	07.03.2005 11:00	37.4	30	25	37.2	-3.0	73	2.3	75	666	830	38%	-42	25	68	3.2	139	87%
01.12.2005 17:00	02.12.2005 20:00	20.7	27	62	2.0	-0.9	76	1.9	38	682	1548	100%	-2	40	63	3.0	23	56%
22.12.2005 05:00	23.12.2005 12:00	24.5	31	58	6.1	1.0	73	1.4	29	867	1602	100%	-11	29	70	2.4	46	60%
11.01.2006 07:30	12.01.2006 16:30	44.4	33	89	3.7	-2.7	77	1.6	76	749	1877	100%	-10	37	120	2.3	162	63%
15.01.2006 14:30	16.01.2006 18:30	31.6	28	87	2.7	-4.3	77	1.4	61	575	1184	100%	0	59	124	1.9	96	95%
24.01.2006 04:00	25.01.2006 19:30	31.4	39.5	58	5.4	-4.1	71	1.7	50	897	2102	94%	-6	26	75	2.4	103	40%
26.01.2006 17:00	27.01.2006 23:00	30.9	30	47	5.3	-2.0	71	2.4	39	1120	1402	80%	3	39	94	3.0	40	2%
30.01.2006 02:00	31.01.2006 12:30	22.1	34.5	57	13.0	-0.5	68	2.1	78	884	1835	100%	-10	95	123	2.9	155	44%
31.01.2006 13:00	01.02.2006 18:00	50.7	29	125	3.1	0.4	76	1.3	79	614	2294	100%	-11	130	193	2.0	142	88%
12.02.2006 09:30	14.02.2006 06:00	23.3	44.5	50	8.8	-1.3	72	1.4	70	914	1952	100%	1	33	68	2.0	111	38%
21.02.2006 21:00	23.02.2006 11:00	26.2	38	28	9.8	3.9	76	2.1	8	1742	2012	100%	22	14	60	2.7	12	12%
19.03.2006 07:00	20.03.2006 13:00	26.8	30	37	25.4	4.3	63	1.3	240	823	2094	92%	-24	59	96	2.4	515	54%
24.11.2006 10:00	25.11.2006 15:30	23.7	29.5	117	2.4	11.2	73	1.4	71	570	1193	98%	-3	15	48	2.4	148	95%
13.12.2006 12:30	15.12.2006 06:30	30.1	42	134	2.2	3.0	81	1.2	43	599	1918	100%	-6	14	76	1.8	29	93%
17.02.2007 09:00	18.02.2007 14:30	22.6	29.5	51	4.7	4.1	74	1.6	152	618	1447	92%	-11	31	61	2.8	330	87%
14.03.2007 15:30	16.03.2007 19:30	25.6	52	57	19.0	11.5	60	1.6	171	657	1199	72%	-4	35	97	2.6	371	83%
26.03.2007 11:00	27.03.2007 18:00	25.8	31	59	19.6	10.2	57	1.5	274	803	1329	59%	-21	15	78	2.7	611	59%
19.11.2007 04:00	20.11.2007 08:30	21.2	28.5	87	1.8	0.3	77	1.6	43	555	1915	100%	0	39	60	2.4	49	100%
31.12.2007 02:00	01.01.2008 17:00	39.7	39	47	5.4	1.6	80	1.2	28	892	1249	81%	32	18	65	1.8	50	56%
13.02.2008 04:30	14.02.2008 15:00	30.3	34.5	120	3.5	2.9	68	1.2	142	763	1511	99%	6	54	97	2.1	337	70%
17.02.2008 06:00	18.02.2008 17:00	33.2	35	68	10.2	1.0	58	1.3	177	904	1792	100%	16	22	73	1.8	379	59%
19.02.2009 03:00	20.02.2009 09:30	21.4	30.5	63	7.0	-3.4	69	1.8	97	750	1402	85%	8	26	59	3.1	144	70%
22.03.2009 12:30	23.03.2009 18:30	22.7	30	25	28.4	7.9	49	2.5	213	646	1073	31%	48	23	60	4.4	432	84%
31.12.2009 03:00	01.01.2010 19:00	50.7	40	27	9.8	6.9	81	1.9	15	563	1303	47%	1	5	89	3.2	28	97%
23.01.2010 11:30	25.01.2010 08:00	29.5	44.5	59	4.1	1.0	75	1.0	50	652	1932	99%	-10	26	72	1.5	76	83%
26.01.2010 14:00	28.01.2010 01:30	25.5	35.5	26	15.5	-3.3	70	2.9	22	1346	2162	90%	-23	20	59	4.2	33	0%
03.02.2010 23:00	05.02.2010 11:00	22.7	36	98	3.9	3.5	75	1.2	62	587	1312	100%	-1	8	40	1.9	29	95%
10.02.2010 23:00	12.02.2010 10:00	31.2	35	28	14.7	-4.8	73	1.9	42	2335	2502	90%	7	43	99	2.5	58	0%
15.02.2010 13:00	17.02.2010 09:00	29.5	44	56	11.8	-2.0	66	1.6	97	642	1459	100%	-10	31	80	2.3	127	88%
26.12.2010 13:30	27.12.2010 19:30	21.1	30	58	4.8	-5.9	80	1.5	58	560	1588	93%	0	19	42	2.2	73	98%
23.01.2011 18:30	25.01.2011 01:00	21.3	30.5	48	5.2	-2.6	71	1.2	44	838	1690	73%	44	20	54	1.7	36	76%
21.02.2011 11:00	22.02.2011 21:00	29.6	34	48	4.5	1.6	85	1.9	37	1197	1403	67%	13	28	65	2.5	63	0%
28.02.2011 08:00	02.03.2011 06:00	24.3	46	20	22.4	4.4	71	2.6	36	1559	2221	74%	2	20	55	4.0	41	0%
04.03.2011 02:00	05.03.2011 11:00	21.4	33	40	8.1	2.2	73	1.8	97	996	1892	100%	-9	33	67	2.6	146	30%
17.01.2012 03:00	18.01.2012 13:00	22.9	34	114	3.0	-1.0	74	1.0	80	664	1918	100%	-2	27	67	1.4	168	81%
28.01.2012 22:30	30.01.2012 16:30	34.5	42	20	11.6	0.9	79	2.0	12	1459	2405	96%	-7	10	60	3.1	22	0%
08.02.2012 00:30	09.02.2012 20:00	37.5	43.5	39	12.6	-7.4	67	2.2	80	1365	1917	93%	-41	42	98	3.6	137	28%
12.02.2012 05:00	13.02.2012 19:30	31.3	38.5	46	17.8	-8.7	61	1.8	93	1057	1715	100%	-17	43	91	3.0	157	41%
21.02.2012 02:00	22.02.2012 17:30	23.3	39.5	55	9.6	0.4	69	1.1	149	955	2040	100%	4	18	55	1.7	285	43%

## OSTLUFT &amp; in-luft PM10

Anstiegsphase ZH-Kaserne		ZUE-Kaserne								Inversion Mittelland				PM10 Ausgangswert	PM10 90%	WG 90%	STRGLO 75%	Anteil Bodeninv.
		Max. 24h-Anstieg	Dauer der Anstiegsphase	NOx [ppb]	O3 [ppb]	TEMP	FEUCHTE	WIGE	STRGLO	UnterGr <	OberGr <	Häufigkeit	Dynamik UGr [m/h]					
Aph ohne BPh	Mittel	25.6	32.8	59.7	8.2	3.5	72.0	1.5	76	823	1456	81%	3.9	19	58	2.5	132.8	63%
	StdAbw	7.7	8.5	27.8	7.8	5.3	14.0	0.5	66	262	441	23%	20.1	11	16	1.0	154.3	33%
	Median	23.3	30.5	57.7	5.6	3.6	74.5	1.5	58	749	1397	88%	-0.6	19	59	2.4	64.8	73%
Aph mit BPh	Mittel	30.4	36.5	63	7.9	0.1	72	1.7	70	903	1777	94%	-2.3	40	89	2.5	112	56%
	StdAbw	11.0	7.9	32	6.3	4.8	8	0.5	47	382	325	13%	16.9	24	29	0.7	109	32%
	Median	29.1	35.0	57	6.1	-0.1	71	1.5	60	825	1840	100%	-4.8	34	82	2.3	86	62%
WHj	Mittel			38	13.6	5.7	72	2.1	64	1031	1589	66%	0.8	28	38	3.2	112	47%
	StdAbw			25	9.5	5.3	9	0.9	49	444	474	35%	59.5	20	22	1.3	105	37%
	Median			31	11.9	5.6	73	1.9	51	937	1593	78%	0.0	24	34	2.8	74	47%
Inversionstage >80% Inv. ohne APH	Mittel			46	8.2	5.3	74.1	1.8	61	1030	1724	97%	2.6	34	44	2.6	106.0	42%
	StdAbw			27	6.8	5.4	8.3	0.6	44	389	359	6%	24.1	20	20	0.9	95.1	34%
	Median			40	6.4	5.1	75.1	1.6	50	968	1735	100%	0.2	31	42	2.5	71.8	37%

Tabelle A4.1: Dokumentation zu den Einflussgrößen der Anstiegsphasen.

- **WHj: Alle Tage (Mitternacht – Mitternacht) der Winterhalbjahre 2001-2012;**
- **Inversionstage: Alle Tage (Mitternacht – Mitternacht) der Winterhalbjahre 2001-2012 mit einer Inversionshäufigkeit > 80% ohne die Tage mit einer Anstiegsphase;**
- **APh o. BPh: Alle PM10-Anstiegsphasen bei Zürich-Kaserne ohne Bezug zu einer Belastungsphase;**
- **APh mit BPh: Alle PM10-Anstiegsphasen bei Zürich-Kaserne im Vorfeld einer Belastungsphase (rote Zeilen in der Tabelle).**

# Anhang A5: Parameter der Anstiegsphasen für Zürich-Kaserne, Sedel und St. Gallen

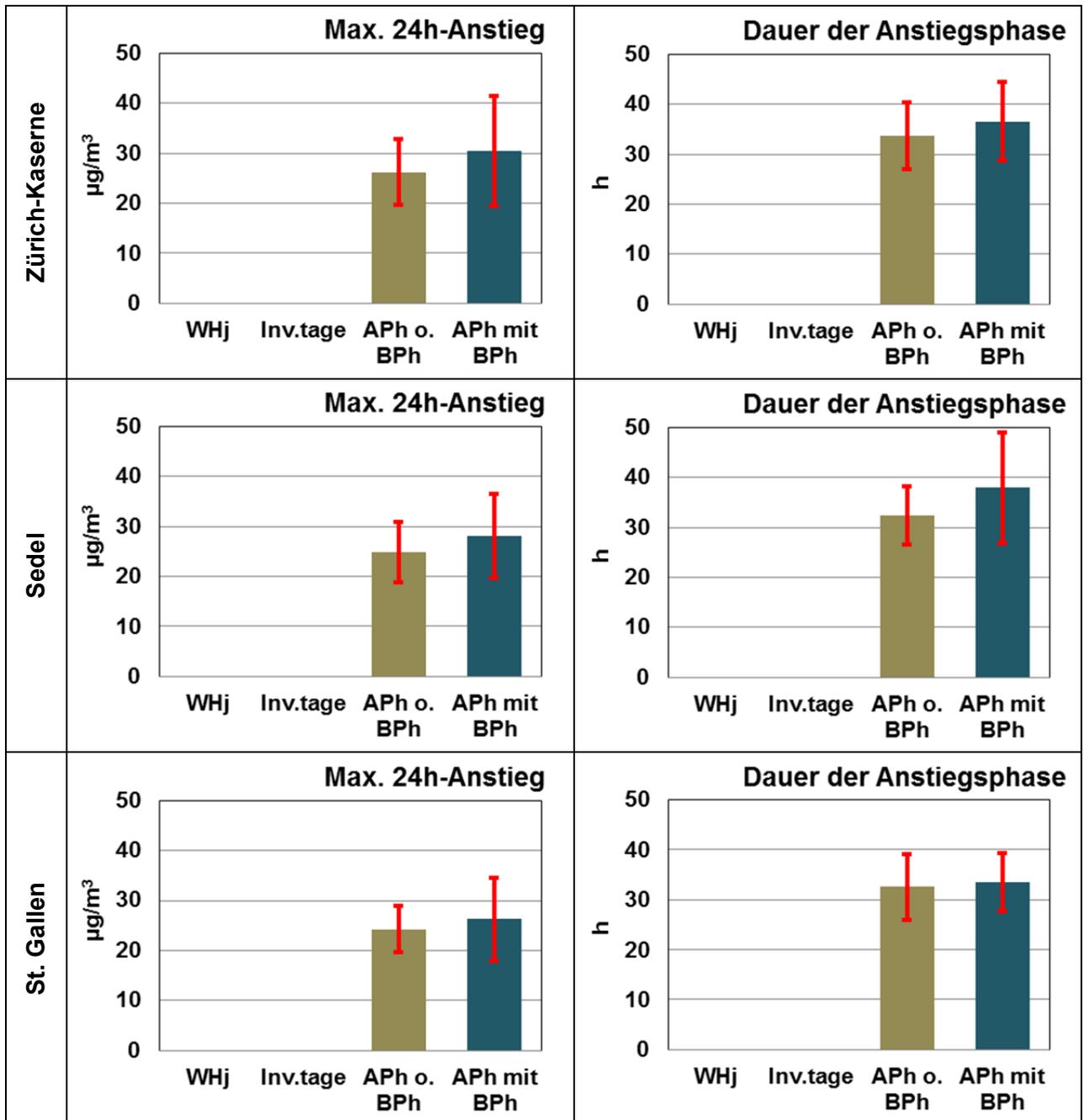
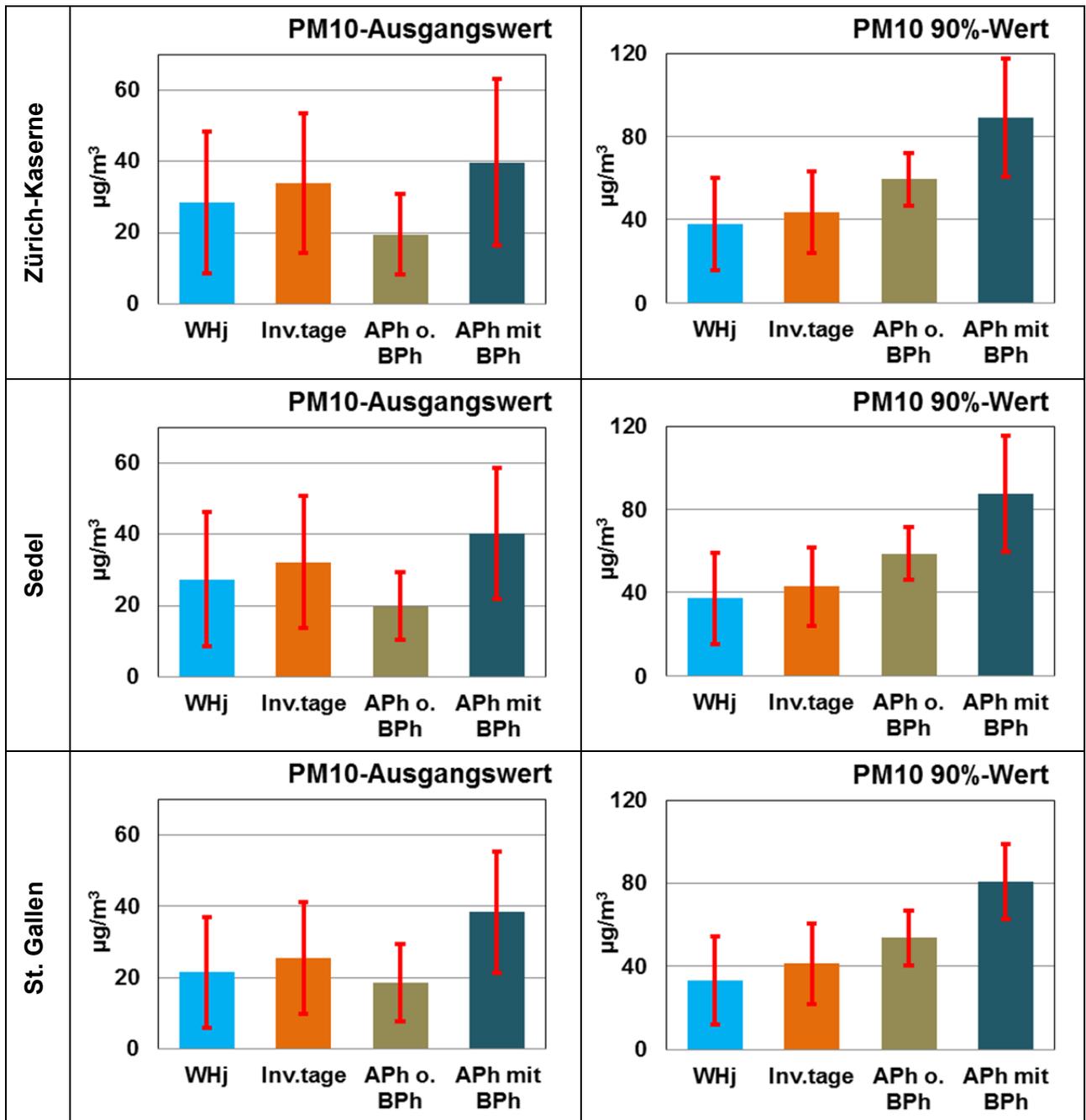
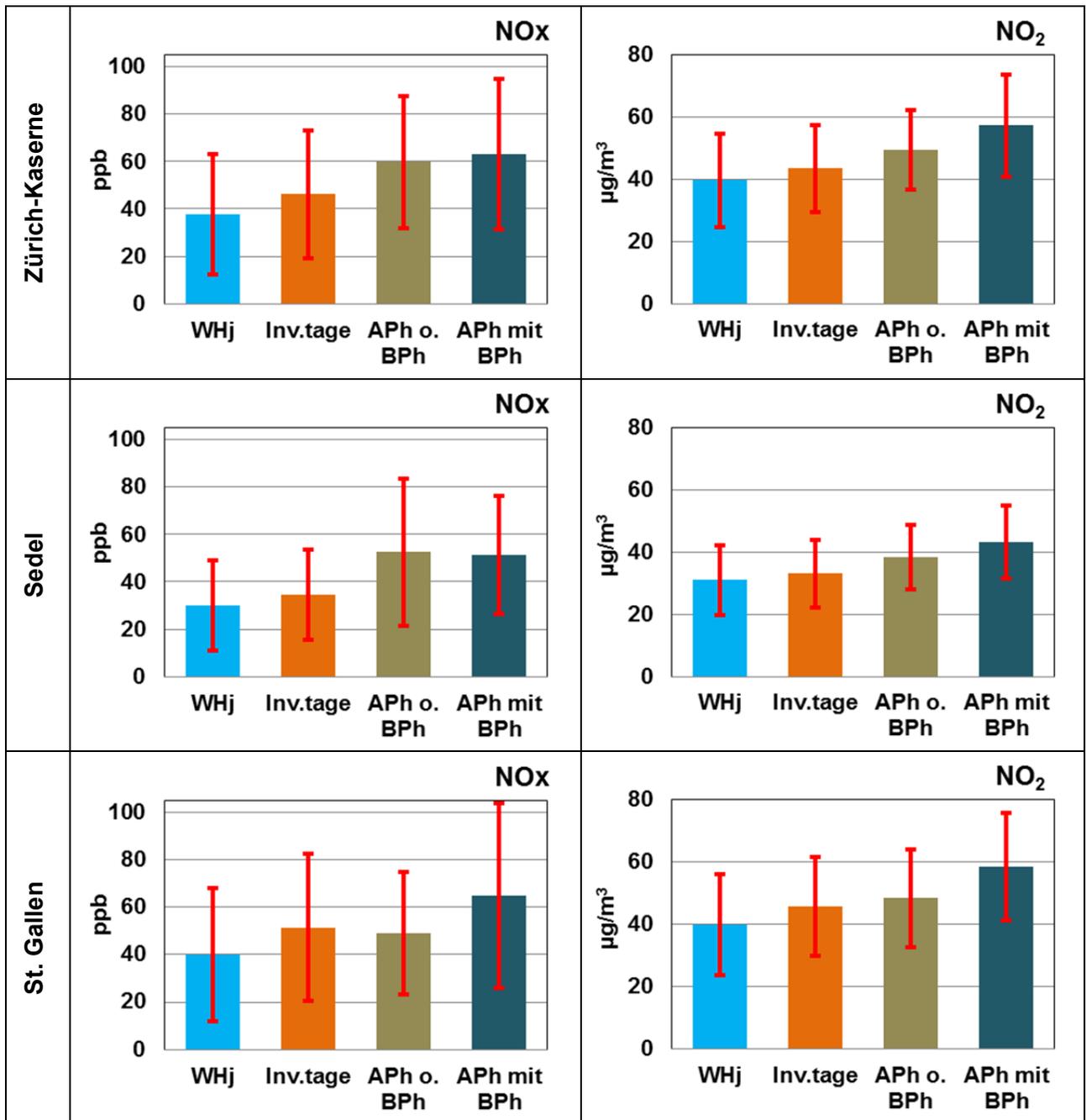


Abbildung A5.1: Charakterisierung der Anstiegsphasen ohne Belastungsphase (Aph o. BPh) und solche im Vorfeld einer Belastungsphase (Aph mit BPh): Maximaler 24h-Anstieg und Dauer der Anstiegsphase. Mittelwerte und ihre Standardabweichung (rote Balken).





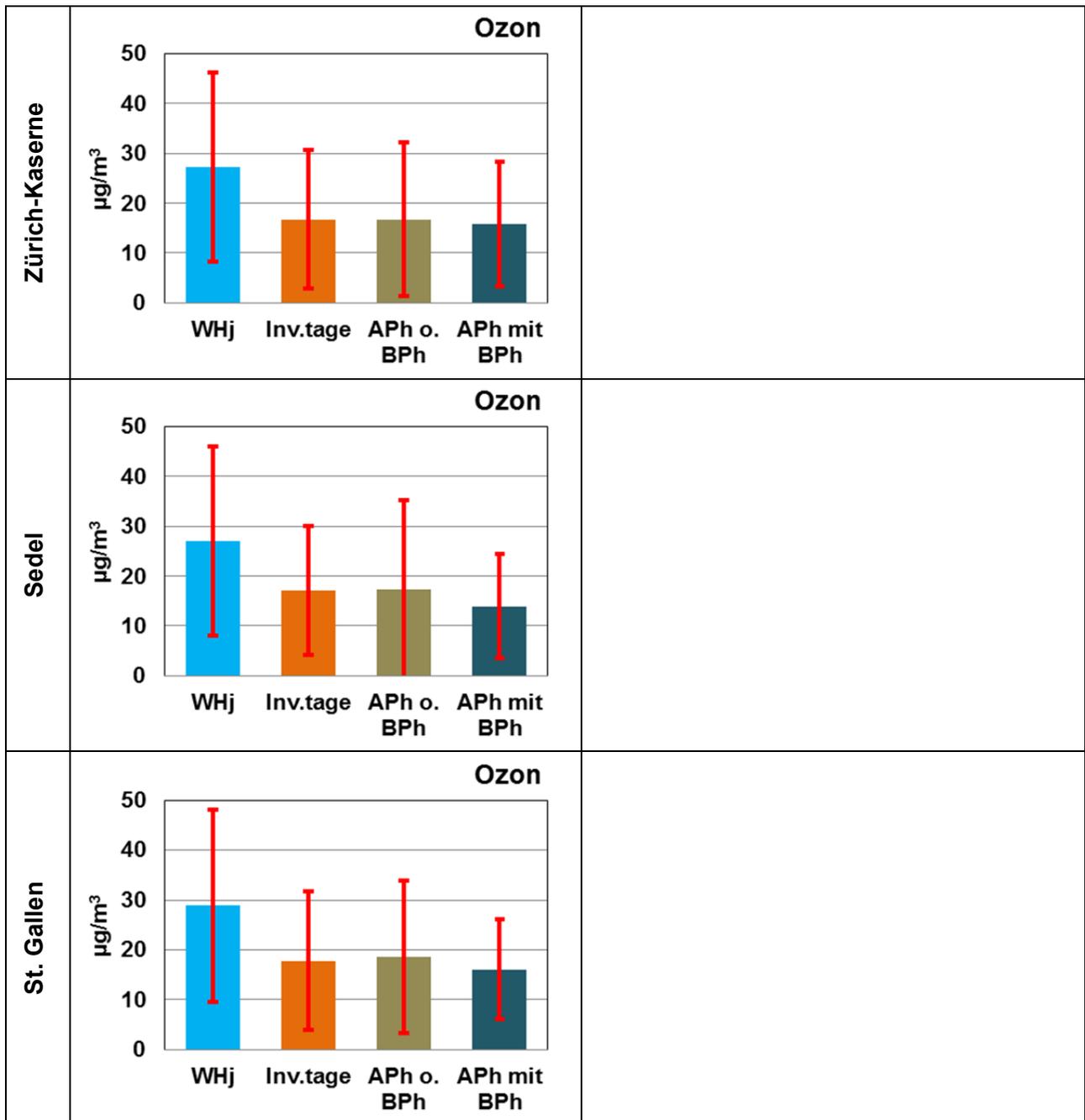
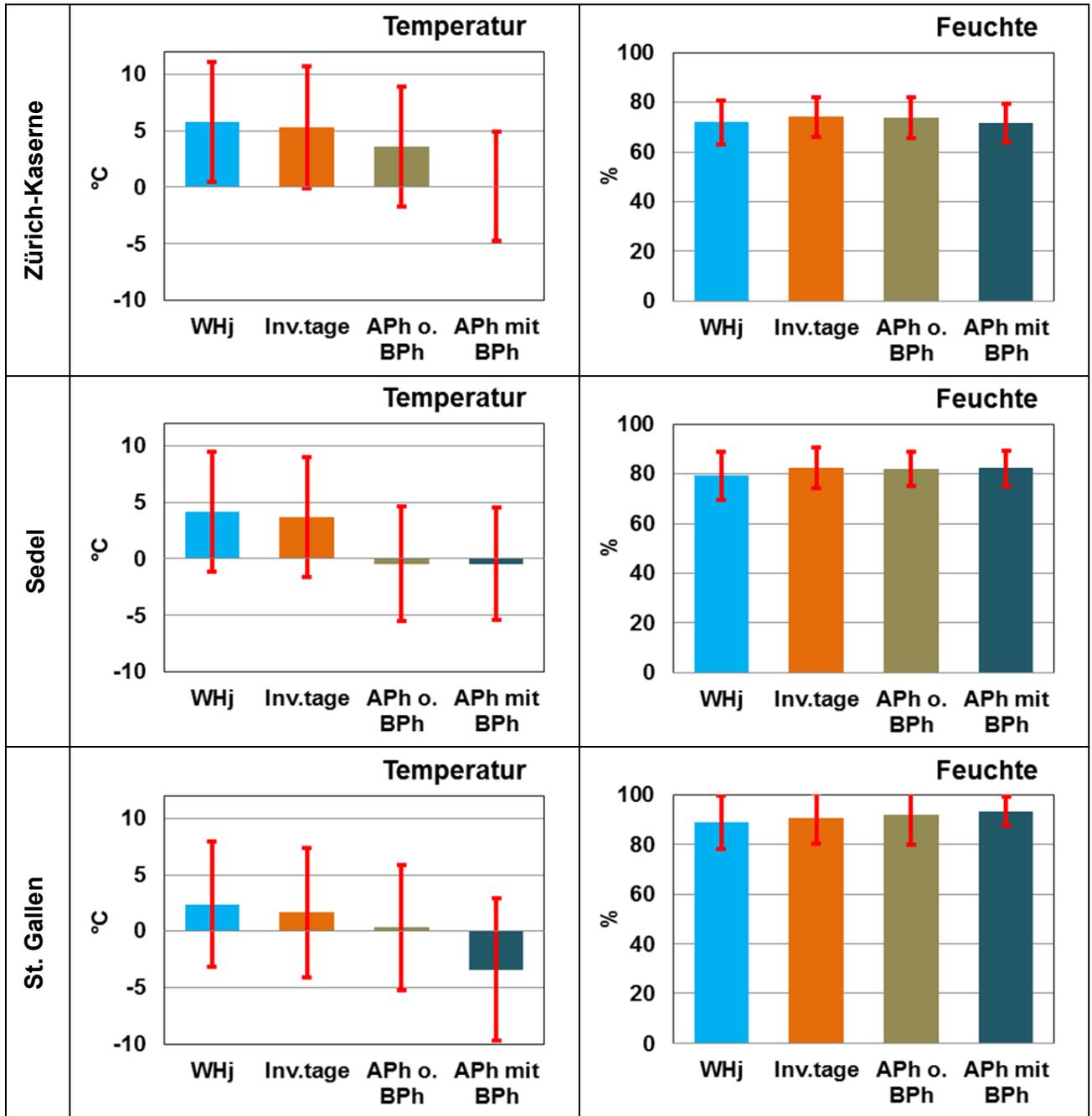
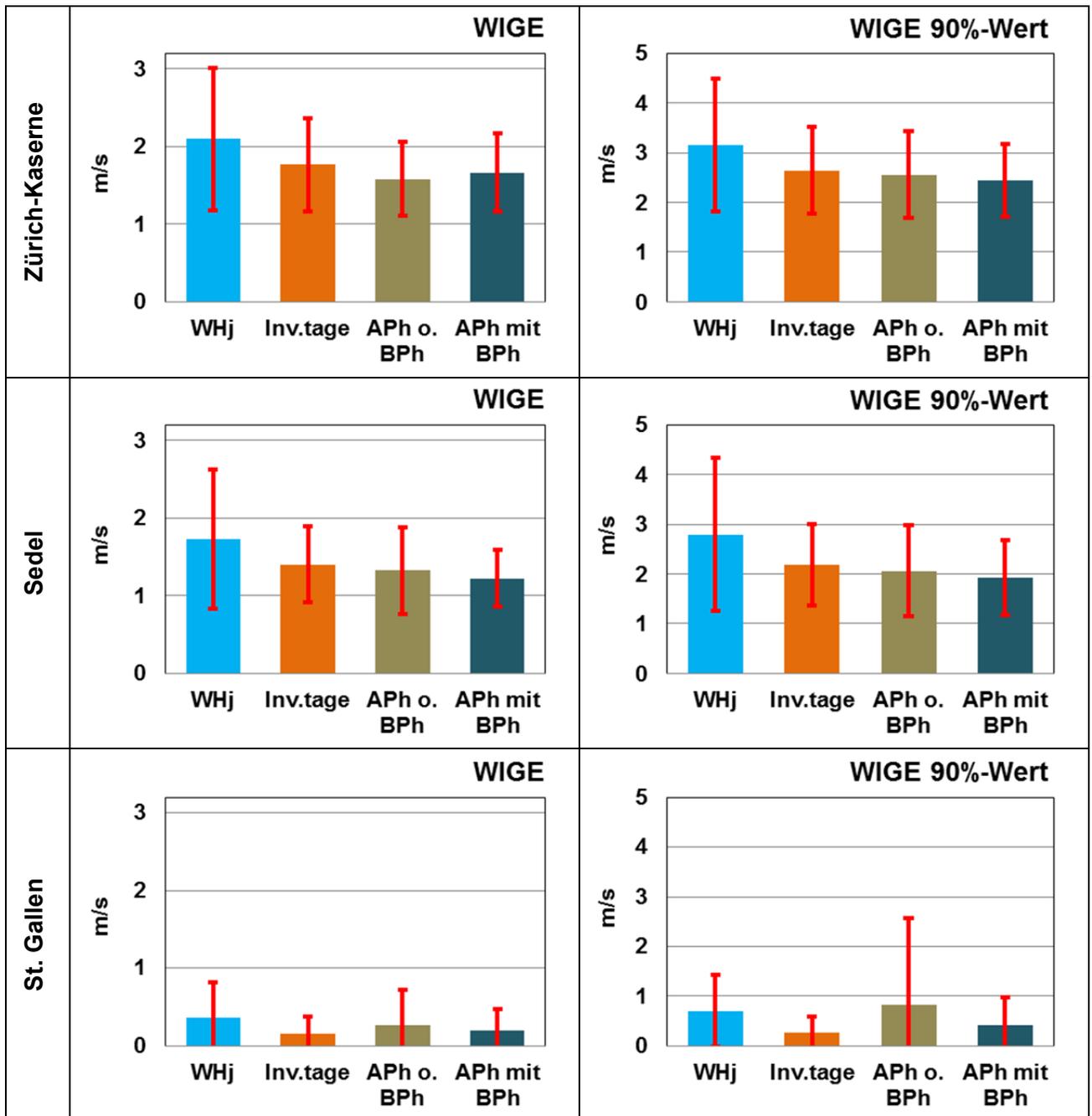


Abbildung A5.2: Mittlere tägliche Immissionskennzahlen und ihre Standardabweichungen für die Winterhalbjahre 2001-2012 (WHj) und die Inversionstage (>80% Inversionshäufigkeit; Tage ohne Anstiegsphasen) sowie mittlere Immissionskennzahlen und ihre Standardabweichungen für PM10-Anstiegsphasen ohne Belastungsphase (APh o. BPh) und solche im Vorfeld einer Belastungsphase (APh mit BPh). PM10-Ausgangswert (zu Beginn der Phase bzw. des Tages); 90%-Perzentil von PM10; NOx-, NO<sub>2</sub>- und Ozonmittelwert.





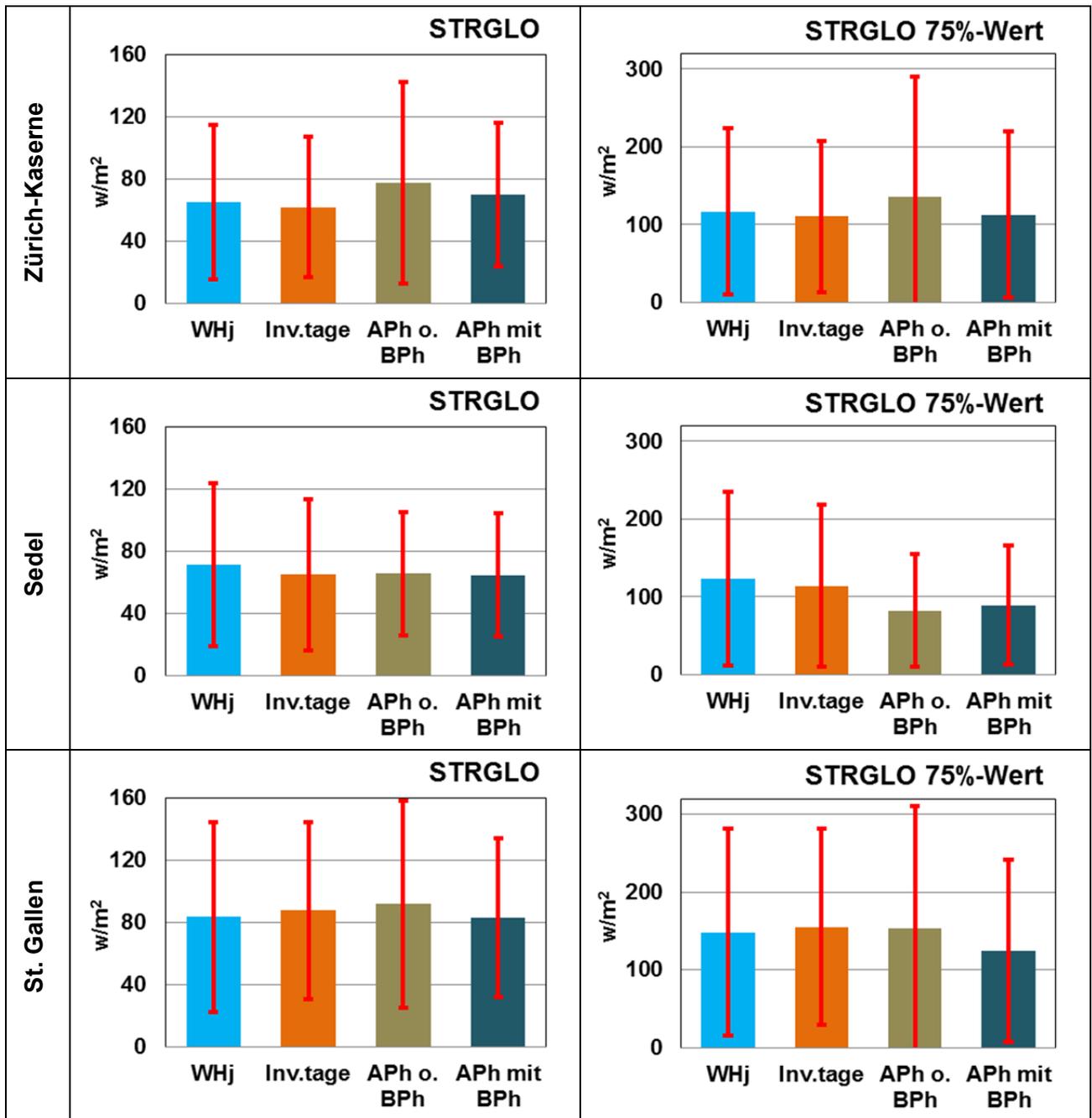
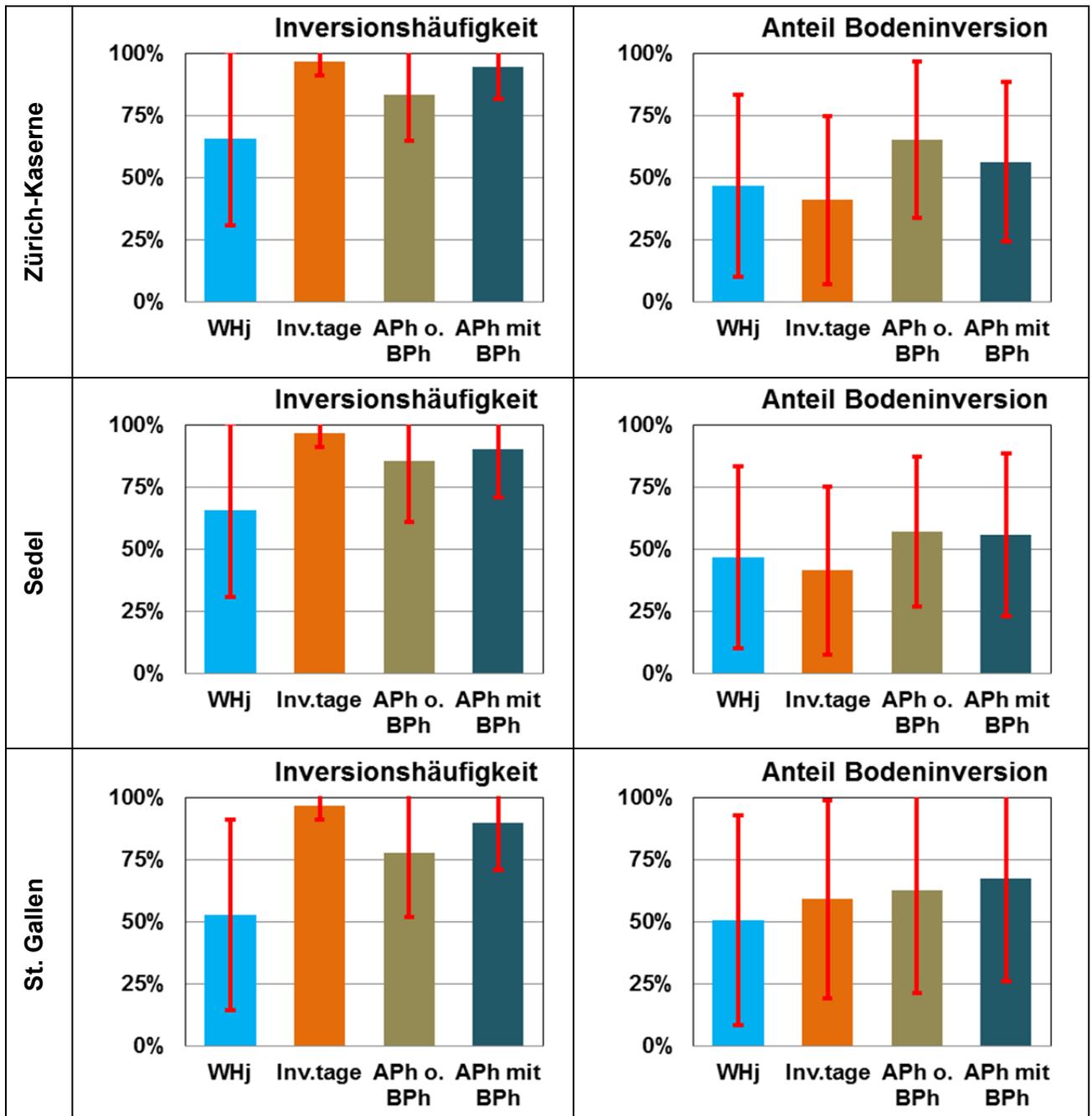
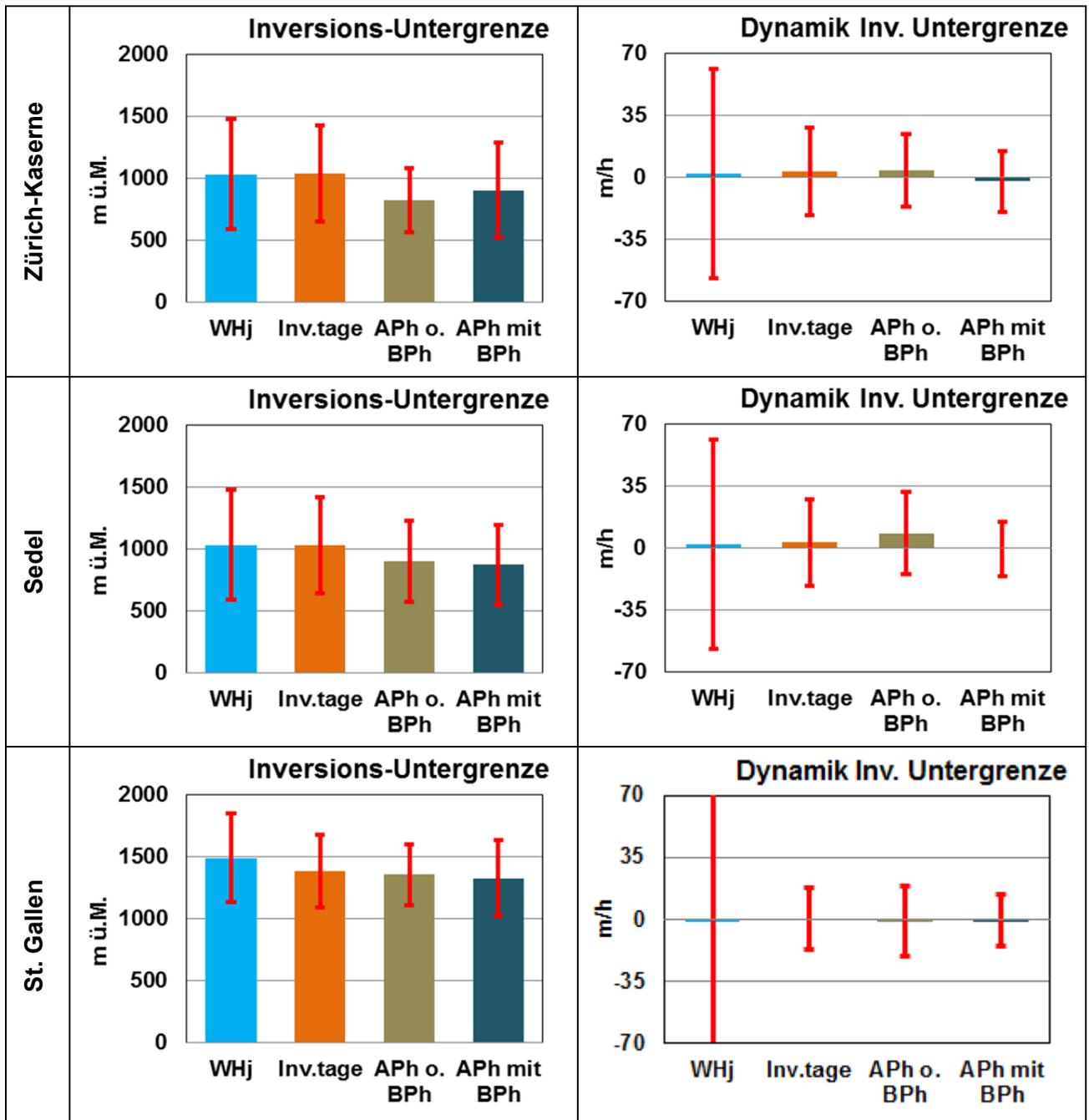


Abbildung A5.3: Mittlere tägliche meteorologische Kennzahlen und ihre Standardabweichungen für die Winterhalbjahre 2001-2012 (WHj) und die Inversionstage (>80% Inversionshäufigkeit; Tage ohne Anstiegsphasen) sowie mittlere meteorologische Kennzahlen und ihre Standardabweichungen für PM10-Anstiegsphasen ohne Belastungsphase (APH o. BPh) und solche im Vorfeld einer Belastungsphase (APH mit BPh). Temperatur; relative Luftfeuchtigkeit; Windgeschwindigkeit (WIGE; Mittelwert und 90%-Perzentil); Globalstrahlung (STRGLO; Mittelwert und 75%-Perzentil).





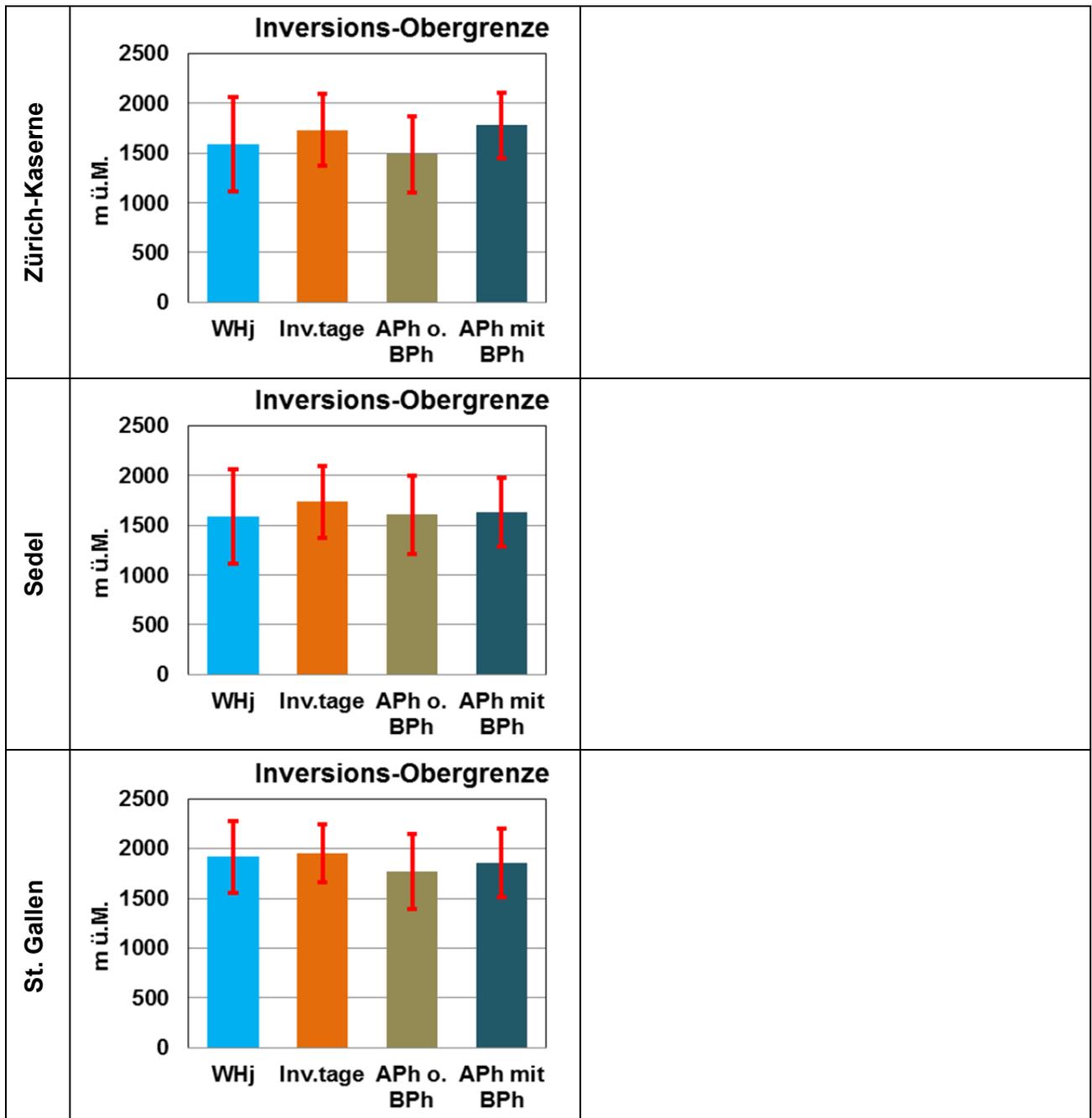
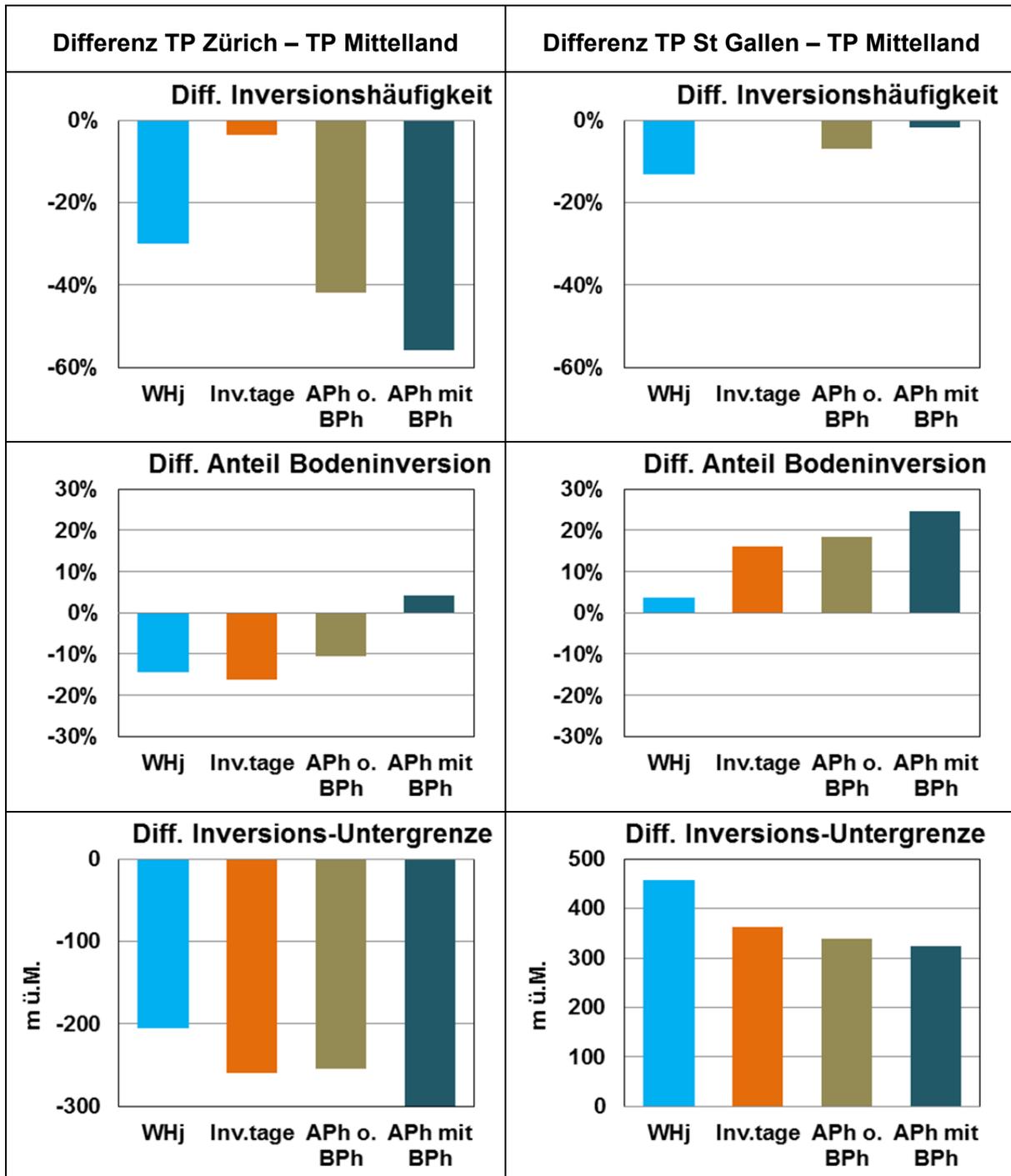


Abbildung A5.4: Mittlere tägliche Inversions-Kennzahlen und ihre Standardabweichungen für die Winterhalbjahre 2001-2012 (WHj) und die Inversionstage (>80% Inversionshäufigkeit; Tage ohne Anstiegsphasen) sowie mittlere Inversions-Kennzahlen und ihre Standardabweichungen für PM10-Anstiegsphasen ohne Belastungsphase (APh o. BPh) und solche im Vorfeld einer Belastungsphase (APh mit BPh). Inversionshäufigkeit; Anteil der Bodeninversionen an der Inversionszeit; Inversionsuntergrenze und ihre Dynamik (Veränderung während des Tages bzw. während der Anstiegsphase); Inversionsobergrenze.

# Anhang A6: Differenzen in Inversionsparametern zwischen TP Zürich und TP Mittelland bzw. TP St. Gallen und TP Mittelland



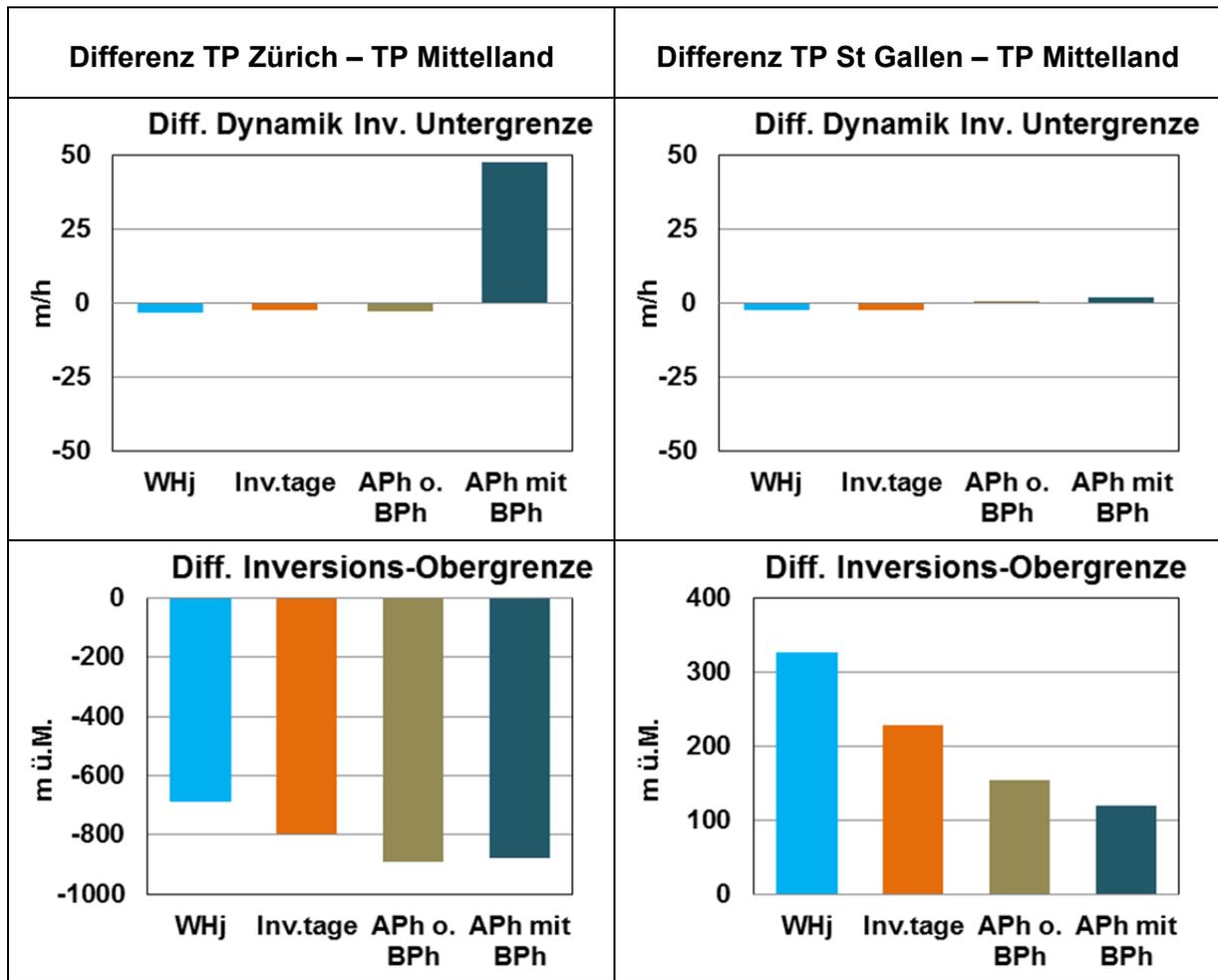


Abbildung A6.1: Differenzen zwischen TP Zürich und TP Mittelland bzw. TP St. Gallen und TP Mittelland: In den mittleren täglichen Inversions-Kennzahlen für die Winterhalbjahre 2001-2012 (WHj) und die Inversionstage (>80% Inversionshäufigkeit; Tage ohne Anstiegsphasen) sowie in den mittleren Inversions-Kennzahlen für PM10-Anstiegsphasen ohne Belastungsphase (APh o. BPh) und solche im Vorfeld einer Belastungsphase (APh mit BPh). Inversionshäufigkeit; Anteil der Bodeninversionen an der Inversionszeit; Inversionsuntergrenze und ihre Dynamik (Veränderung während des Tages bzw. während der Anstiegsphase); Inversionsobergrenze.