

Analyse der im NABEL gemessenen Anzahlkonzentrationen von Feinstaubpartikeln

Projektbericht

Michael Müller und Christoph Hüglin

Empa, Abteilung Luftfremdstoffe und Umwelttechnik
Überlandstrasse 129, 8600 Dübendorf

Dübendorf, 07.03.2014

Impressum

Auftraggeber: Bundesamt für Umwelt (BAFU), Abt. Luftreinhaltung und Chemikalien, CH-3003 Bern.
Das BAFU ist ein Amt des Eidg. Departements für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK).

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

Autor/Autorin: Michael Müller, Christoph Hüglin

Begleitung BAFU: Richard Ballaman, Rudolf Weber

Hinweis: Diese Studie/dieser Bericht wurde im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) verfasst. Für den Inhalt ist allein der Auftragnehmer verantwortlich.

Inhaltsverzeichnis

1	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen	5
2	Einleitung	7
2.1	Ausgangslage	7
2.2	Ziel des Projektes	7
3	Standorte und Messmethode.....	8
3.1	Messstandorte.....	8
3.2	Messmethode.....	9
4	Darstellung der Partikelanzahlkonzentration an sechs NABEL-Stationen.....	10
4.1	Kennzahlen der Partikelanzahlkonzentration an den sechs NABEL-Stationen	10
4.2	Abhängigkeit der Partikelanzahlkonzentration von der Meteorologie.....	17
4.3	Vergleich der Partikelanzahlkonzentration mit der Konzentration anderer Schadstoffe.....	20
5	Analyse erhöhter Partikelanzahlkonzentration.....	23
5.1	Definition einer erhöhten Partikelanzahlkonzentration.....	23
5.2	Charakterisierung von Ereignissen erhöhter Partikelanzahlkonzentration	23
5.3	Analyse der PNC Extremwerte an der Station Rigi-Seebodenalp.....	26
6	Vergleich zwischen VOC und Partikelanzahlkonzentration	28
7	Literaturverzeichnis	31
8	Anhang	32

1 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Der vorliegende Bericht gibt eine Übersicht über den mehrjährigen Verlauf der Anzahlkonzentration von Feinstaubpartikeln mit Durchmessern von einigen Nanometern bis wenigen Mikrometern an sechs Stationen des NABEL-Messnetzes. Die Messungen zeigen mit zunehmender Distanz zu den Emissionsquellen (insbesondere zum Strassenverkehr) klar abnehmende Partikelanzahlkonzentrationen. Liegt die mittlere jährliche Partikelanzahlkonzentration an verkehrsbelasteten Standorten wie Bern-Bollwerk und Härkingen (direkt nördlich der Autobahn A1) bei ungefähr 25000 Partikel/cm³, so ist der Jahresmittelwert an der ländlichen und erhöht (oberhalb 1000 m.ü.M.) gelegenen Messstation Rigi-Seebodenalp ungefähr zehn Mal kleiner (BAFU, 2013). Dennoch treten auch an der Messstation Rigi-Seebodenalp sowie an der ebenfalls ländlichen und erhöht gelegenen Messstation Chaumont kurzzeitig immer wieder untypisch hohe Partikelanzahlkonzentrationen auf. Es ist derzeit unklar, ob diese Ereignisse durch Transport von verschmutzten Luftmassen aus dem Mittelland verursacht werden, oder ob sehr kleine sekundäre Partikel in grosser Anzahl aus gasförmigen Vorläuferverbindungen gebildet werden. Eine solche Bildung von sekundären Partikeln kann insbesondere an ländlichen und quellenfernen Standorten erheblich zur Partikelanzahl in der Aussenluft beitragen (Birmilli et al., 2003, Cusack et al., 2013).

Das Hauptziel der nachfolgend beschriebenen Auswertungen war es zu klären, ob erhöhte Partikelanzahlkonzentrationen an den Stationen Rigi-Seebodenalp und Chaumont in erster Linie durch Neubildung von Partikeln aus gasförmigen Vorläuferverbindungen oder durch Transport von stärker belasteten Luftmassen verursacht werden. Aus den durchgeführten Auswertungen kann geschlossen werden, dass beide der genannten Prozesse sehr wahrscheinlich die Messungen der Partikelanzahlkonzentration an den ländlichen und erhöht gelegenen Stationen beeinflussen. Mit den vorhandenen Daten ist es allerdings nicht möglich quantitative Aussagen zum Einfluss von Partikelneubildung zu den gemessenen Partikelanzahlkonzentrationen zu treffen. Dazu wären wie in der Studie von Birmilli et al. (2003) grössenaufgelöste Partikelmessungen und gegebenenfalls Messungen von weiteren wichtigen Grössen wie gasförmiges H₂SO₄, Terpene oder OH⁻ notwendig. Zusammenfassend können die folgenden Zusammenhänge festgestellt beziehungsweise folgende Schlussfolgerungen gezogen werden:

1. Im Gegensatz zu den Stationen im schweizerischen Mittelland und der Station Lugano auf der Alpensüdseite sind an den erhöht gelegenen Stationen Chaumont und Rigi-Seebodenalp während der warmen Jahreszeit die Partikelanzahlkonzentrationen durchschnittlich höher als im Winter (siehe Abbildung 4 und Abbildungen A1 bis A6 im Anhang). Diese höheren Partikelanzahlkonzentrationen lassen sich durch eine stärkere Durchmischung der unteren Troposphäre im Frühling und Sommer und somit durch Transport von stärker belasteten Luftmassen aus dem Mittelland erklären. Diese Erklärung wird durch die mittleren Tagesgänge der Partikelanzahlkonzentrationen an beiden Stationen gestützt. In den frühen Nachmittagsstunden sind die Partikelanzahlkonzentrationen im Durchschnitt am höchsten (Abbildung 6). Zudem zeigen Auswertungen, dass an den Stationen Chaumont und Rigi-Seebodenalp die Partikelanzahlkonzentration sowie die Konzentration anderer Luftschadstoffe wie NO_x und SO₂ im Durchschnitt

- am höchsten sind, wenn der Wind aus Richtung der Siedlungsgebiete im Mittelland weht (Chaumont: Sektor Ost bis Südost; Rigi-Seebodenalp: Sektor Nordwest bis Nordost, siehe Abbildung 13).
2. An den Stationen Chaumont und Rigi-Seebodenalp sind keine klaren Abhängigkeiten zwischen Partikelanzahlkonzentration und anderen Luftschadstoffen feststellbar (Tabellen 5 und 6). Diese Feststellung einerseits, sowie andererseits auch der unterschiedliche mittlere Jahresgang der Partikelanzahlkonzentration verglichen mit NO_x , CO und SO_2 (Abbildungen A1 bis A6 im Anhang) legen nahe, dass andere Prozesse als reiner Transport von stärker belasteten Luftmassen zu den ländlichen und erhöht gelegenen Stationen die Partikelanzahlkonzentrationen Standorten massgeblich beeinflussen.
 3. Erhöhte Partikelanzahlkonzentrationen treten an den beiden Stationen Chaumont und Rigi-Seebodenalp vorwiegend im Frühling und Sommer auf (Kapitel 4). Individuelle Tagesgänge im Frühling und Sommer zeigen im Verlauf des späteren Vormittages häufig deutlich ansteigende Partikelanzahlkonzentrationen, die Messwerte bleiben an solchen Tagen typischerweise bis zum frühen Abend erhöht (Abbildung 18). Der Verlauf dieser Tagesgänge und die Höhe des Anstieges der Partikelanzahlkonzentrationen (ca. $10'000 \text{ Partikel/cm}^3$) sind sehr ähnlich zu den Messreihen während Episoden mit Partikelneubildung, welche von Birmili et al. (2003) an der ländlichen und auf 980 m.ü.M. in Süddeutschland (Allgäu) gelegenen Messstation Hohenpeissenberg erhoben wurden. Die Messstation Hohenpeissenberg ist bezüglich Lage und Belastungssituation gut vergleichbar mit den beiden NABEL-Stationen Chaumont und Rigi-Seebodenalp. Im Zeitraum von April 1998 bis August 2000 wurden an der Messstation Hohenpeissenberg basierend auf grössenaufgelösten Partikelmessungen sowie Messungen von weiteren wichtigen Parametern an 18% aller Tage Partikelneubildungsprozesse beobachtet. Gemäss Birmili et al. (2003) erfolgen Ereignisse mit Partikelneubildung bevorzugt in warmen, relativ trockenen und sauberen Luftmassen auf regionaler Skala (räumliche Ausdehnung ca. 100 km). Es kann davon ausgegangen werden, dass an den beiden NABEL-Messstationen Chaumont und Rigi-Seebodenalp Ereignisse mit Partikelneubildung in vergleichbarer Häufigkeit wie an der Station Hohenpeissenberg auftreten. Ein eindeutiger Nachweis solcher Episoden kann mit den vorliegenden Messungen allerdings nicht erbracht werden. Die Annahme, dass Partikelneubildungsprozesse auch an den ländlichen und erhöht gelegenen Standorten Chaumont und Rigi-Seebodenalp die Partikelanzahlkonzentration in der Aussenluft deutlich beeinflussen, wird durch die beobachtete Korrelation von Globalstrahlung und Partikelanzahlkonzentration gestützt (Tabellen 3 und 4).
 4. An der Messstation Rigi-Seebodenalp wurden im betrachteten Zeitraum (16.01.2007 bis 31.12.2012) insgesamt acht Ereignisse mit extremen Partikelanzahlkonzentrationen ($> 100'000 \text{ Partikel/cm}^3$) beobachtet (Abschnitt 5.3). Diese Extremwerte traten im Unterschied zu den Ereignissen mit erhöhten Partikelanzahlkonzentrationen nur kurzzeitig auf. Dieser Unterschied, sowie die Beobachtung, dass bei den meisten dieser extremen Ereignisse auch die Konzentration von CO stark erhöht war (Abbildungen 19) weisen darauf hin, dass Emissionsquellen in unmittelbarer Nähe der Station diese extremen Messwerte verursacht haben.

2 Einleitung

2.1 Ausgangslage

Im Jahr 2003 wurden an der NABEL-Station Chaumont Messungen der Partikelanzahlkonzentration von Feinstaubpartikeln aufgenommen, und in den Folgejahren auf andere Stationen und Stationstypen ausgeweitet. Heute werden Partikelanzahlkonzentrationen kontinuierlich an den NABEL-Stationen Basel-Binningen, Bern-Bollwerk, Härkingen, Lugano und Rigi-Seebodenalp durchgeführt. Die Aufnahme dieser Messungen im NABEL war durch die Tatsache begründet, dass die gesamte Anzahl von Feinstaubpartikeln einerseits von ultrafeinen Partikeln (UFP, Partikel mit einem Durchmesser kleiner als 100 nm) klar dominiert wird, andererseits diese UFP nur vernachlässigbar zur gesamten Feinstaubmasse beitragen und dadurch nicht durch massenbezogene Kenngrößen wie PM₁₀ beschrieben werden können. Toxikologische und zellbiologische Studien legen zudem nahe, dass ultrafeine Partikel gesundheitsschädigend wirken können. In der Zwischenzeit hat sich dieser Verdacht erhärtet, die Wirkungsmechanismen scheinen sich dabei von denen der grösseren, durch PM_{2.5} und PM₁₀ repräsentierten Partikeln zu unterscheiden (WHO, 2013). Das NABEL hat sich zum Ziel gesetzt die Anzahlkonzentration von UFP an typischen Belastungssituationen in der Schweiz zu erfassen, um die Auswirkungen der Massnahmen zur Minderung der Feinstaubbelastung auch auf die Partikelanzahl untersuchen zu können.

Die Messungen zeigen mit zunehmender Distanz zu den Emissionsquellen (insbesondere zum Strassenverkehr) klar abnehmende Partikelanzahlkonzentrationen. Liegt die mittlere jährliche Partikelanzahlkonzentration an verkehrsbelasteten Standorten wie Bern-Bollwerk und Härkingen (direkt nördlich der Autobahn A1) bei ungefähr 25'000 Partikel/cm³, so ist der Jahresmittelwert an der ländlichen und erhöht gelegenen Messstation Rigi-Seebodenalp ungefähr zehn Mal kleiner (BAFU, 2013). Dennoch treten auch an der Messstation Rigi-Seebodenalp kurzzeitig immer wieder untypisch hohe Partikelanzahlkonzentrationen auf. Es ist derzeit ungeklärt, ob diese Ereignisse durch Transport von verschmutzten Luftmassen aus dem Mittelland verursacht werden, oder ob sehr kleine sekundäre Partikel in grosser Anzahl aus gasförmigen Vorläuferverbindungen gebildet werden. Eine solche Bildung von sekundären Partikeln kann insbesondere an ländlichen und quellenfernen Standorten erheblich zur Partikelanzahl in der Aussenluft beitragen (Birmilli et al., 2003, Cusack et al., 2013).

2.2 Ziel des Projektes

Im Rahmen dieses Projektes werden die Partikelanzahlmessungen des NABEL vergleichend ausgewertet, dargestellt und diskutiert. Insbesondere werden die an den ländlichen und erhöht gelegenen Messstationen Chaumont (bis 2007) und Rigi-Seebodenalp (ab 2007) beobachteten Ereignisse mit stark erhöhten Partikelanzahlkonzentrationen detailliert untersucht. Unter Einbezug anderer gemessener Luftschadstoffe und den vorherrschenden meteorologischen Verhältnissen soll geklärt werden, ob diese Ereignisse durch Transport von verschmutzten Luftmassen aus dem Mittelland, oder durch sekundäre Bildungsprozesse verursacht werden.

3 Standorte und Messmethode

3.1 Messstandorte

Im Rahmen der Aktivitäten des Nationalen Beobachtungsnetzes für Luftfremdstoffe (NABEL) wird seit 2004 an den Stationen Basel-Binningen (BAS), Bern-Bollwerk (BER), Härkingen (HAE) und Lugano (LUG) und seit 2007 an der Station Rigi-Seebodenalp (RIG) die Anzahlkonzentration von Feinstaubpartikeln gemessen. Im Zeitraum 2003 bis 2006 wurden solche Messungen auch an der Station Chaumont (CHA) durchgeführt (Tabelle 1). Dieser Bericht fokussiert auf die Analyse der Partikelanzahlkonzentration an den NABEL-Messstationen Chaumont und Rigi-Seebodenalp, zwei ländliche Stationen, die auf über 1000 m über Meer gelegen sind. Als Vergleich und Referenz werden zudem die Partikelanzahlkonzentrationen an den übrigen vier genannten Messstationen untersucht. Ausserdem werden Konzentrationen anderer Schadstoffe sowie meteorologische Daten an den sechs Stationen analysiert. Die Datenanalyse beschränkt sich auf diejenigen Jahre, für die, abgesehen von kurzen Unterbrüchen, komplette Zeitreihen vorhanden sind (Ausnahme: Station Rigi, Jahr 2007). Die Analysen dieser Studie basieren auf bereinigten Daten des NABEL (10 Minuten Mittelwerte).

Die Station Chaumont (siehe Abbildung 1 und Tabelle 1) befindet sich nördlich von Neuenburg auf dem Hügelzug des Chaumont etwa 700 m über dem Neuenburgersee. Die Umgebung wird durch Wiesen und Weideland dominiert. Die nächsten Industriebetriebe liegen 5 - 10 km entfernt am Fusse des Chaumont in der Agglomeration von Neuenburg und in Cressier.

Die Station Rigi-Seebodenalp (siehe Abbildung 1 und Tabelle 1) befindet sich etwa 300 m südwestlich der Bergstation der Seebodenalpbahn auf der Krete der Mülmannsegg. Die Umgebung ist voralpin; Weideland und Waldpartien wechseln sich ab. Die Station liegt 600 m über dem Vierwaldstättersee und ist ca. 12 km von Luzern und Zug entfernt (BAFU, 2013).

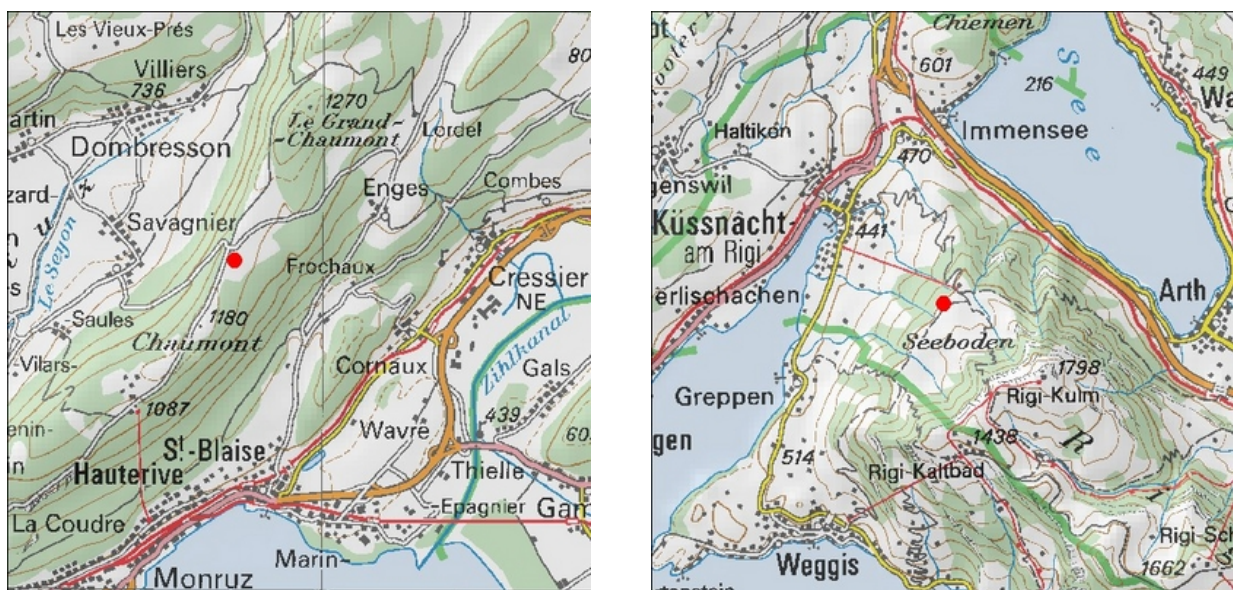


Abbildung 1: Standorte der NABEL-Messstationen Chaumont (links) und Rigi-Seebodenalp (rechts), dargestellt als rote Punkte.

3.2 Messmethode

Die an den NABEL-Standorten zur Messung der Partikelanzahlkonzentration eingesetzten Messgeräte sind in Tabelle 1 angegeben. Die Partikelanzahlkonzentration an den Stationen Chaumont und Rigi-Seebodenalp wurde über die ganze Zeit mit demselben Gerätetyp erfasst, während an den übrigen vier Stationen der Instrumententyp im Verlauf der Messaktivitäten ausgewechselt wurde. Weitere Informationen zur Messtechnik der Partikelanzahl und weiteren Schadstoffen finden sich in Empa (2013).

Station	Datum	Messinstrument	Im Bericht analysierte Daten
Basel-Binningen	11.08.2004-03.02.2009 seit 03.02.2009	TSI 3022A mit Verdünnungsstufe TSI 3775	01.01.2005-31.12.2012
Bern-Bollwerk	01.07.2004-28.04.2010 seit 28.04.2010	TSI 3022A mit Verdünnungsstufe TSI 3775 mit Verdünnungsstufe	01.01.2005-31.12.2012
Chaumont	30.04.2003-04.01.2007	TSI 3022A	01.01.2004-31.12.2006
Härkingen	26.04.2004-03.07.2009 seit 03.07.2009	TSI 3022A mit Verdünnungsstufe TSI 3775 mit Verdünnungsstufe	01.01.2005-31.12.2012
Lugano-Università	23.07.2004-19.01.2010 seit 19.01.2010	TSI 3022A mit Verdünnungsstufe TSI 3775 mit Verdünnungsstufe	01.01.2005-31.12.2012
Rigi-Seebodenalp	seit 16.01.2007	TSI 3775	16.01.2007-31.12.2012

Tabelle 1: Zur Messung der Partikelanzahlkonzentration eingesetzte Messgeräte.

4 Darstellung der Partikelanzahlkonzentration an sechs NABEL-Stationen

4.1 Kennzahlen der Partikelanzahlkonzentration an den sechs NABEL-Stationen

Die mittlere jährliche Partikelanzahlkonzentration variiert je nach Standort (Tabelle 2). Der wichtigste Einflussfaktor für die Partikelanzahlkonzentration an einem Standort ist das Verkehrsaufkommen in der näheren Umgebung. Sehr hohe Partikelanzahlkonzentrationen können aber auch an Standorten fernab von grossen Strassen auftreten, z.B. wurde an der Station Rigi-Seebodenalp eine maximale Anzahlkonzentration von 494'029 Partikeln pro cm^3 (10 Minuten Mittelwert) gemessen. Ein für diese Station ausserordentlicher Wert, ist der Medianwert der Partikelanzahlkonzentration an dieser Station doch etwa fünfmal geringer als in Basel-Binningen, einer ebenfalls nicht direkt verkehrsbelasteten Station.

Die Messungen an den Standorten Basel-Binningen, Bern-Bollwerk, Härkingen und Lugano-Universität im Zeitraum 2005 bis 2012 deuten auf einen negativen Trend in der Partikelanzahlkonzentration hin (Abbildung 2). Änderungen an den Messeinrichtungen (z.B. zwischenzeitliche Modifikation des Lufteinlasses an der Station Härkingen zwischen Nov. 2008 und Feb. 2011) sowie Veränderungen in der Stationsumgebung (z.B. Baustellen) überlagern allerdings diesen Trend.

Die mittlere Partikelanzahlkonzentration an der Station Rigi-Seebodenalp ist für den Zeitraum 2007 bis 2012 ungefähr konstant. Dasselbe gilt für die Station Chaumont für den Zeitraum 2004 bis 2006 (Abbildung 2 und Abbildung 3).

Die Messungen an den NABEL-Stationen zeigen saisonale Schwankungen der Partikelanzahlkonzentrationen (Abbildung 4). Stationen in tieferen Lagen (Basel-Binningen, Bern-Bollwerk, Härkingen, Lugano-Universität) weisen im Winter durchschnittlich höhere Konzentrationen auf als im Sommer. Die mittlere Partikelanzahlkonzentration an Stationen in höheren Lagen (Chaumont, Rigi-Seebodenalp) ist dagegen im Sommer höher als im Winter. In den Abbildungen 5 und 6 sind die mittleren Wochen- und Tagesgänge der Partikelanzahlkonzentrationen an den verschiedenen Messstationen dargestellt.

Je nach Jahreszeit ist die Partikelanzahlkonzentration in Basel-Binningen 3-6 Mal höher als in Rigi-Seebodenalp, wobei der Faktor in den Sommermonaten geringer ist als in den Wintermonaten (Abbildung 7 und Abbildung 8). Ähnliches gilt für die SO_2 - und NO_x -Konzentration (Abbildung 9 bis Abbildung 12).

Station	N	Min	Q10	Q25	Median	Mittelwert	Q75	Q90	Q99	Max
Basel	418484	283	3726	6306	10681	12838	16732	24033	46932	229116
Bern	413215	677	9165	13900	28816	22263	36440	56730	110450	717940
Härkingen	417420	425	5605	10043	33953	22706	46677	77841	155391	449524
Lugano	414924	279	5287	8708	22226	15978	28628	46539	99976	435196
Rigi	312620	3	1026	1650	3151	2591	3932	5659	12140	494029
Chaumont	155417	127	1310	1979	3763	3055	4511	6645	16426	89628

Tabelle 2: Kennzahlen der an NABEL-Stationen gemessenen Partikelanzahlkonzentrationen. N bezeichnet die Anzahl der 10 Minuten Mittelwerte. Q10, Q25, Q75, Q90 und Q99 bezeichnen die entsprechenden Quantile. Der Zeitraum der Messungen ist in Tabelle 1 für jede Station angegeben.

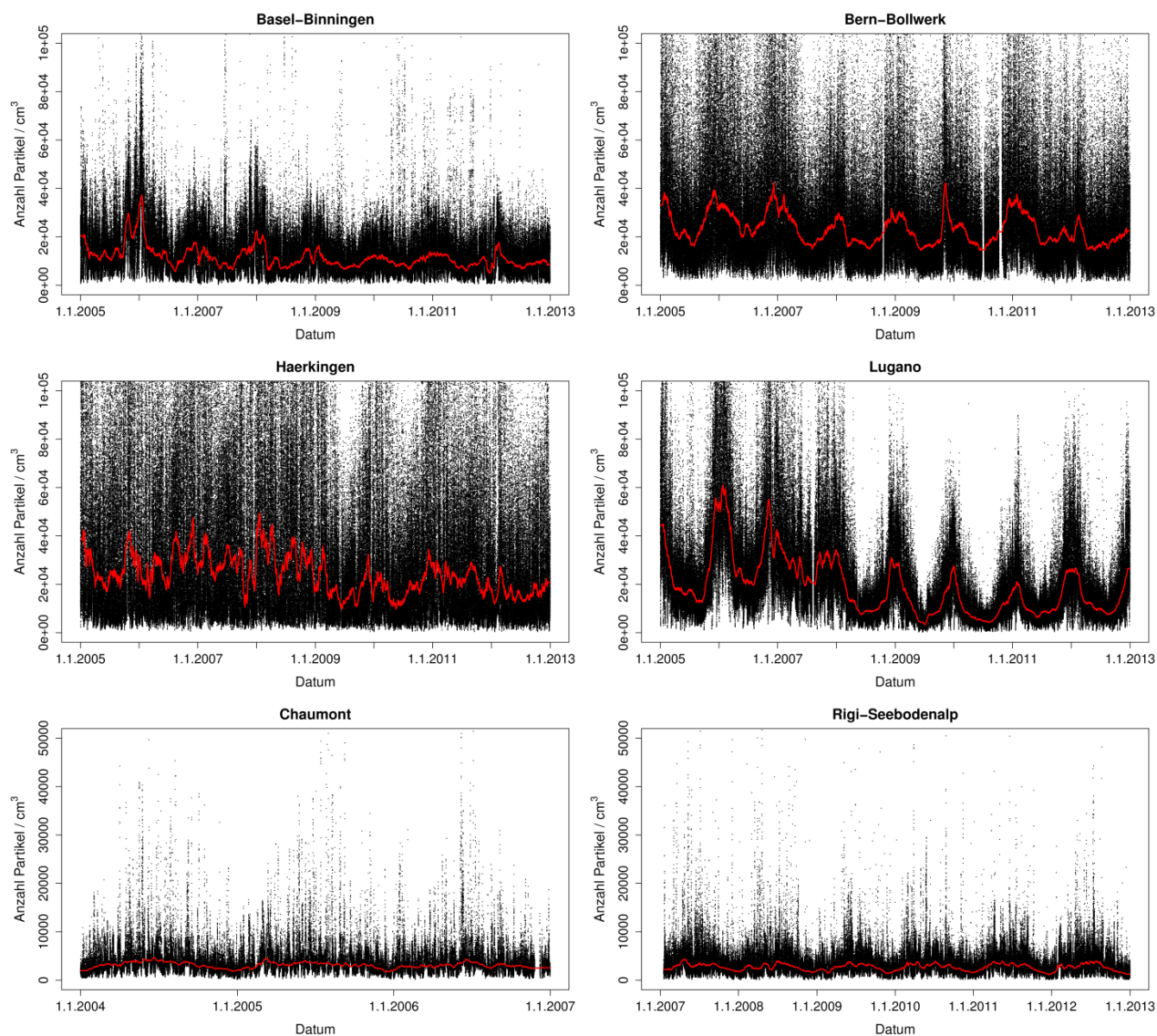


Abbildung 2: Zeitreihen der Partikelanzahlkonzentration an den NABEL-Stationen an denen Messwerte vorliegen (10 Minuten Mittelwerte). Die rote Linie zeigt den gleitenden Medianwerte (Fensterweite: 30 Tage). Die Zeitbereiche der Stationen Chaumont und Rigi-Seebodenalp unterscheiden sich von denen der vier anderen Stationen. Ausserdem wurde für die Grafiken dieser beiden Stationen ein kleinerer Skalenbereich der y-Achse gewählt.

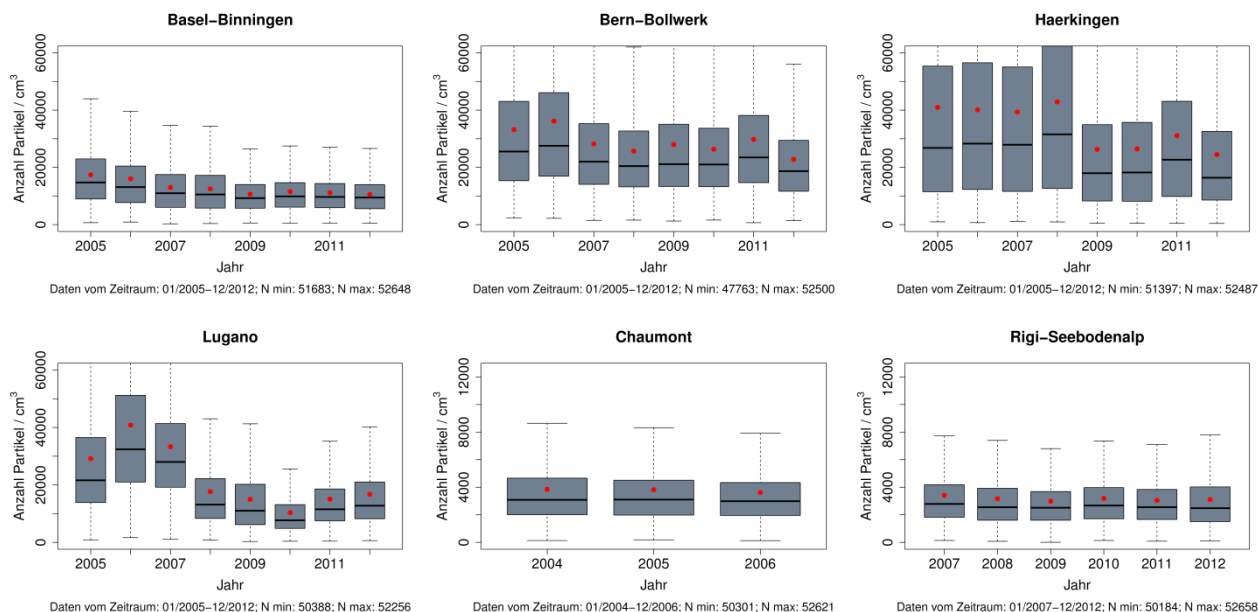


Abbildung 3: Boxplots der Partikelanzahlkonzentration an NABEL-Stationen für den Zeitraum 2005-2012 (Chaumont: 2004-2006, Rigi-Seebodenalp: 2007-2012). Die schwarzen Querstriche zeigen die jährlichen Medianwerte der Partikelanzahlkonzentration, die roten Punkte kennzeichnen die mittlere jährliche Partikelanzahlkonzentration. Für die Grafiken der Stationen Chaumont und Rigi-Seebodenalp wurde ein kleinerer Skalenbereich der y-Achse gewählt.

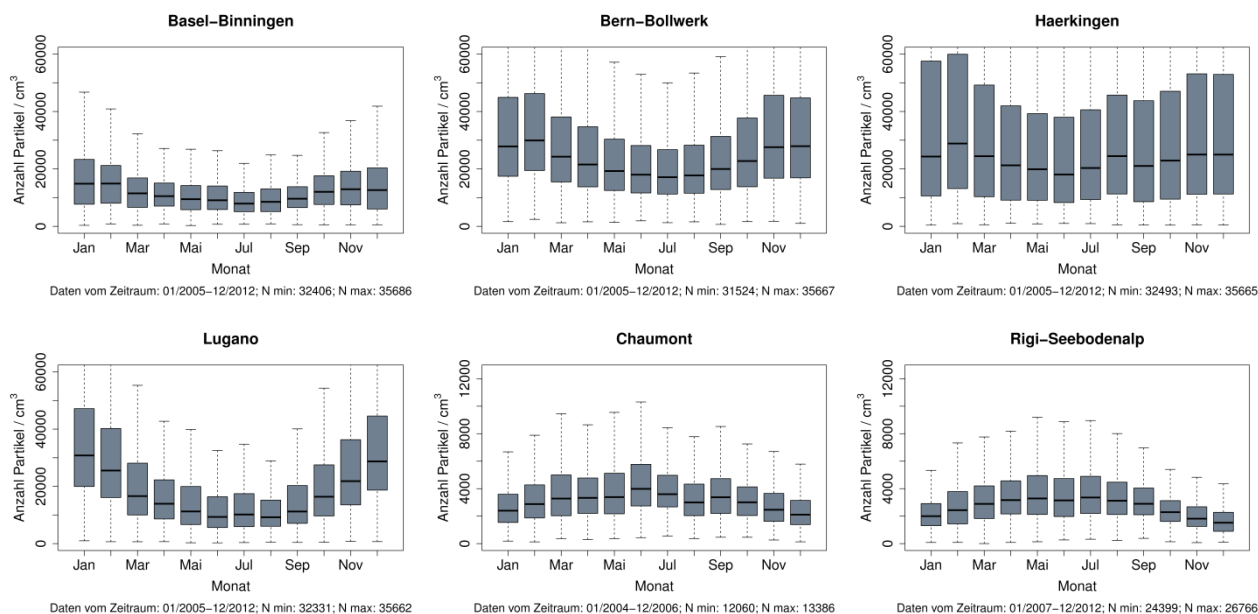


Abbildung 4: Boxplots der Partikelanzahlkonzentration an NABEL-Stationen nach Monat. Für die Abbildungen der Stationen Chaumont und Rigi-Seebodenalp wurde ein kleinerer Skalenbereich der y-Achse gewählt.

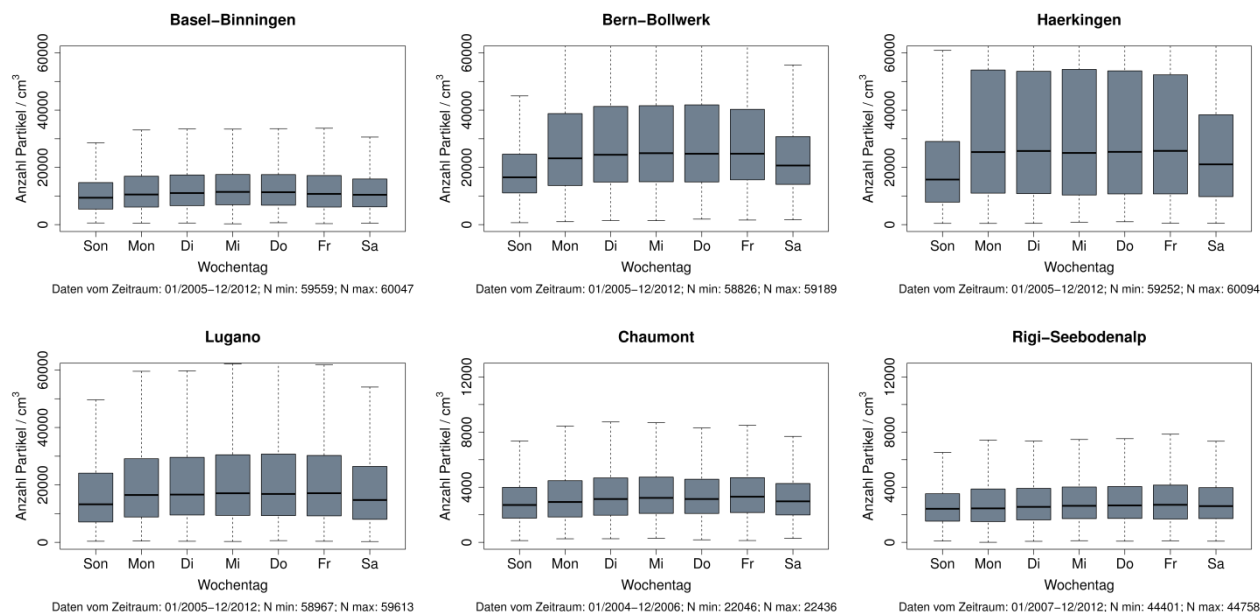


Abbildung 5: Boxplots der Partikelanzahlkonzentration an NABEL-Stationen nach Wochentag. Für die Abbildungen der Stationen Chaumont und Rigi-Seebodenalp wurde ein kleinerer Skalenbereich der y-Achse gewählt.

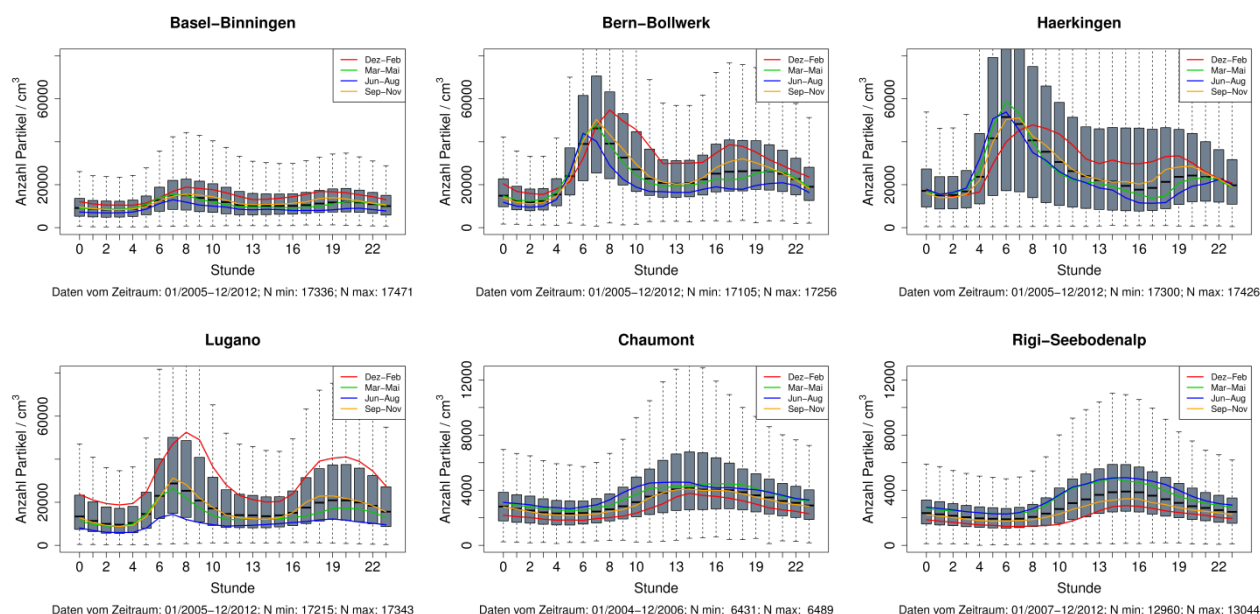


Abbildung 6: Boxplots der Partikelanzahlkonzentration an NABEL-Stationen nach Tageszeit. Die roten Linien zeigen die Medianwerte nach Jahreszeit. Für die Abbildungen der Stationen Chaumont und Rigi-Seebodenalp wurde ein kleinerer Skalenbereich der y-Achse gewählt.

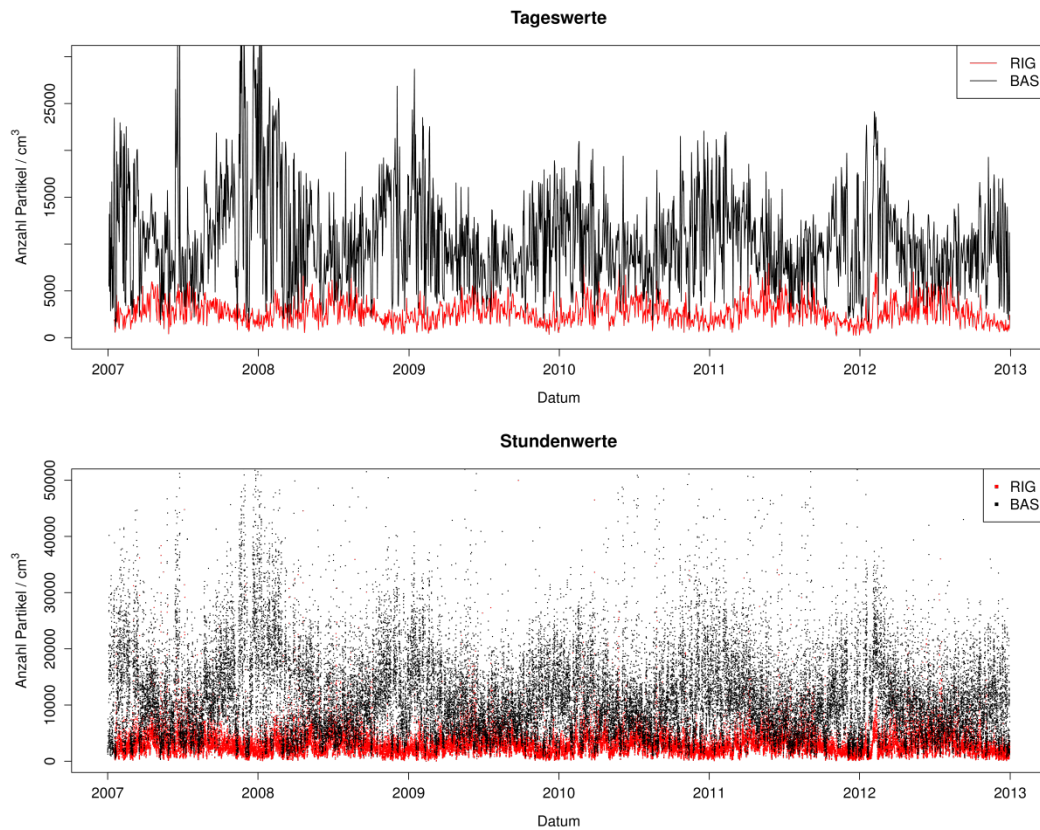


Abbildung 7: Tages- und Stundenmittelwerte (Median) der Partikelanzahlkonzentration an den Stationen Rigi-Seebodenalp (rot dargestellt) und Basel (schwarz dargestellt).

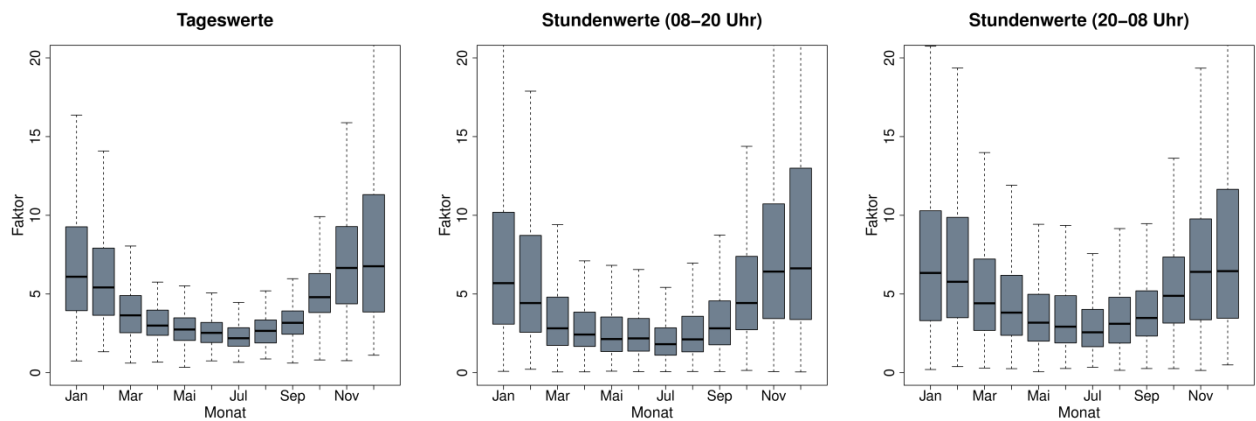


Abbildung 8: Partikelanzahlkonzentrationen in Basel-Binningen im Verhältnis zur Partikelanzahlkonzentration an der Station Rigi-Seebodenalp. Als Tages- und Stundenmittelwerte wurden die Medianwerte der jeweiligen Zeitperiode verwendet.

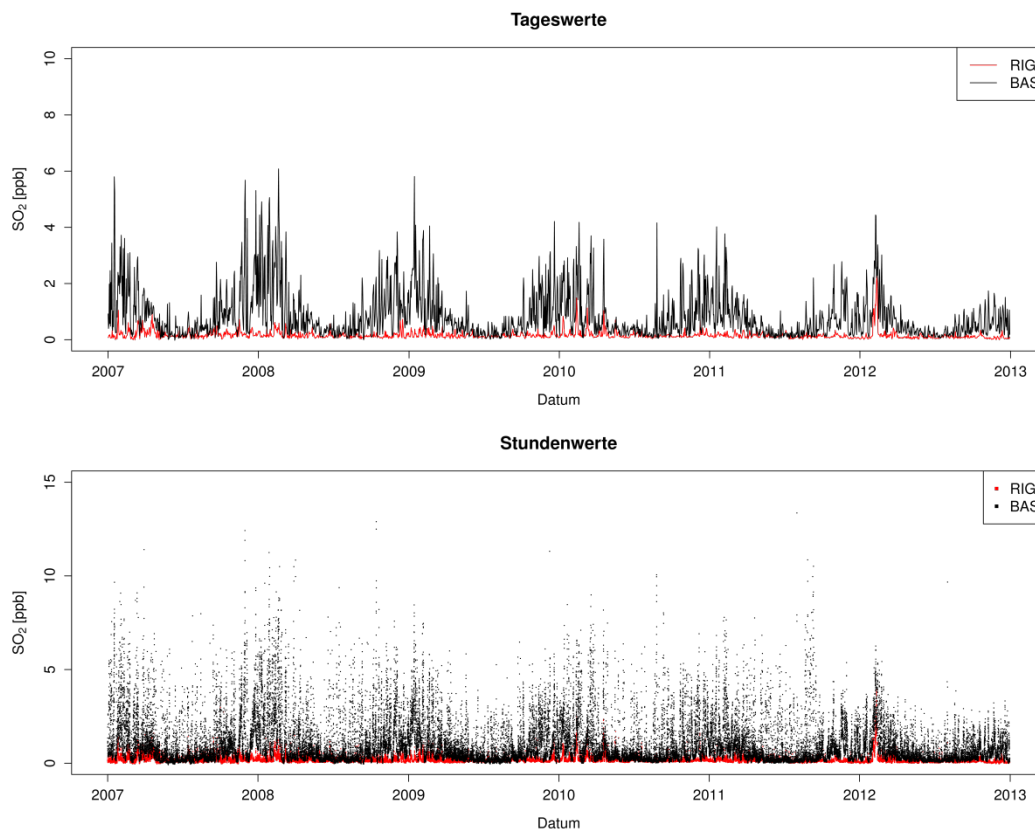


Abbildung 9: Tages- und Stundenmittelwerte (Median) der SO₂-Konzentration an den Stationen Rigi (rot dargestellt) und Basel (schwarz dargestellt).

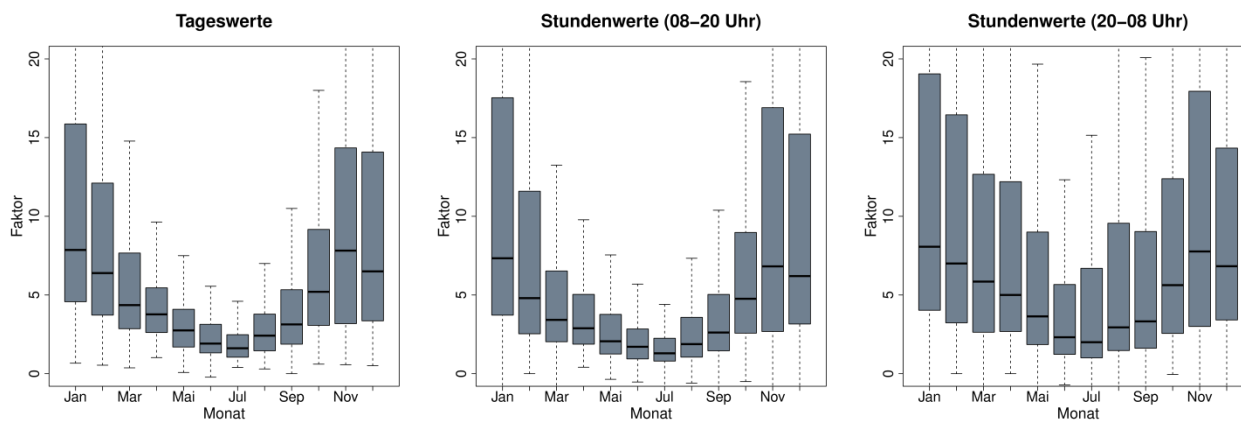


Abbildung 10: SO₂-Konzentration in Basel-Binningen im Verhältnis zur SO₂-Konzentration in Rigi-Seebodenalp. Als Tages- und Stundenmittelwerte wurden die Medianwerte der jeweiligen Zeitperiode verwendet.

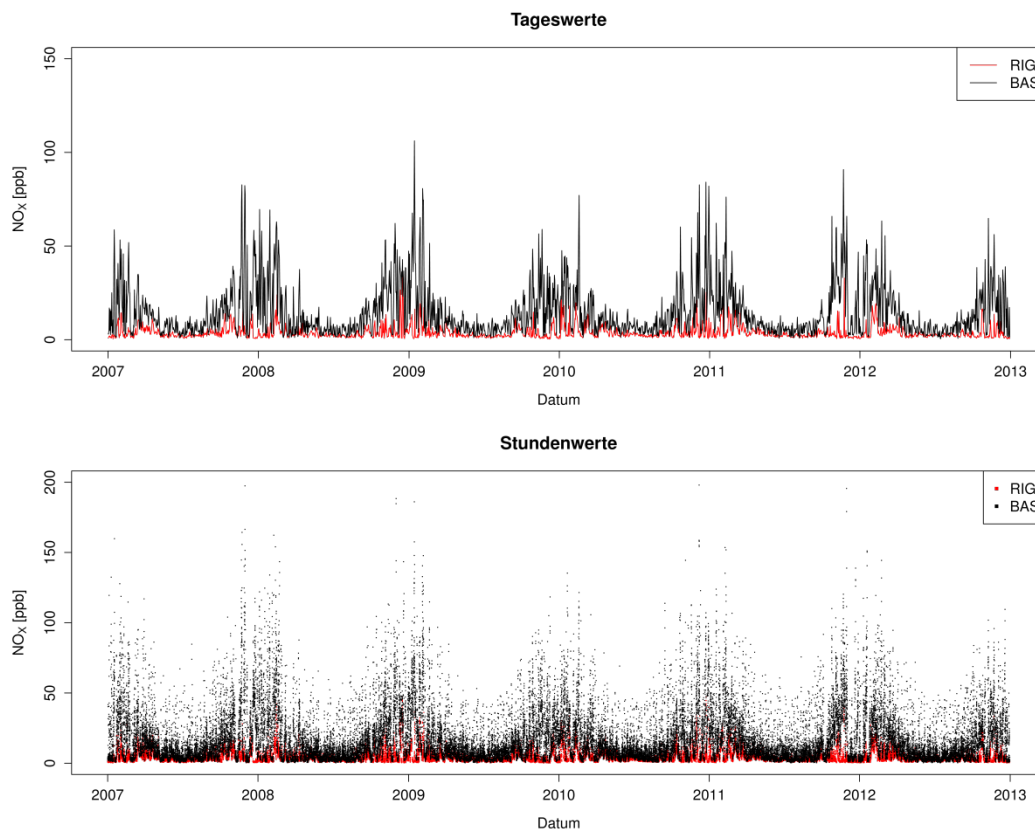


Abbildung 11: Tages- und Stundenmittelwerte (Median) der NO_x-Konzentration an den Stationen Rigi (rot dargestellt) und Basel-Binningen (schwarz dargestellt).

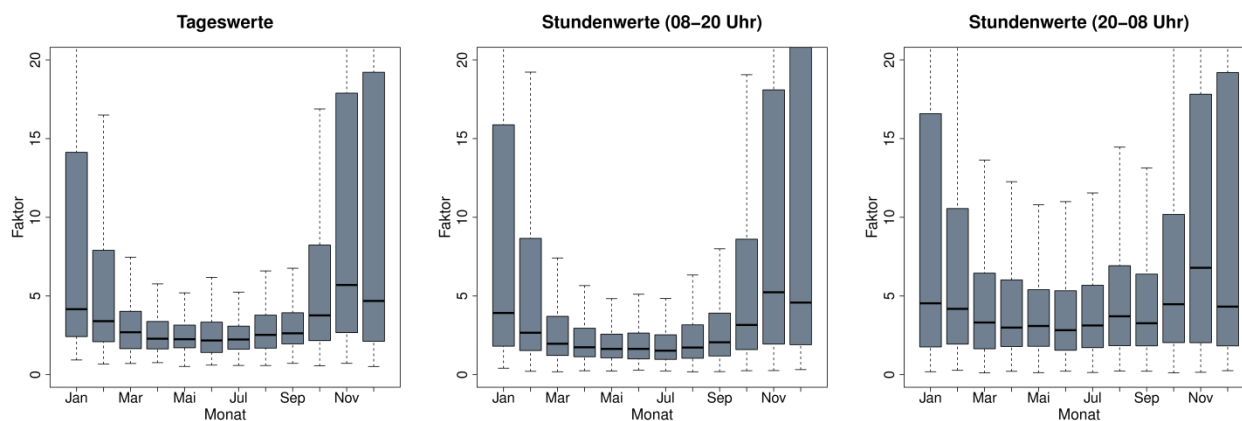


Abbildung 12: NO_x-Konzentration in Basel-Binningen im Verhältnis zur NO_x-Konzentration an der Station Rigi-Seebodenalp. Als Tages- und Stundenmittelwerte wurden die Medianwerte der jeweiligen Zeitperiode verwendet.

4.2 Abhängigkeit der Partikelanzahlkonzentration von der Meteorologie

Die Analyse der Partikelanzahlkonzentrationen in Abhängigkeit von meteorologischen Messgrößen soll Hinweise zu den Prozessen liefern, welche zu erhöhten Partikelanzahlkonzentrationen an den Stationen Rigi-Seebodenalp und Chaumont führen.

Korrelationskoeffizienten berechnet aus Zeitreihen meteorologischer Messgrößen und Luftschadstoffen sind sowohl für zeitlich höher aufgelöste Werte, als auch für Tagesmittelwerte entweder klein (z.B. zwischen Luftdruck und gemessenen Schadstoffen), oder widerspiegeln in erster Linie Konzentrationsunterschiede in Abhängigkeit der Jahreszeit (z.B. Temperatur und O₃) (Tabellen 3 und 4). Für die Stationen Chaumont und Rigi-Seebodenalp sind im Hinblick auf die Möglichkeit der Partikelbildung durch Photo-Oxidation die Korrelationen der täglichen Mittelwerte der Globalstrahlung und der Partikelanzahlkonzentration zu beachten.

Die gemessenen Schadstoffkonzentrationen an den NABEL-Stationen hängen auch von der Distanz zu wichtigen Emissionsquellen sowie der momentanen Windrichtung ab (Abbildung 13 und Abbildung 14). Die durchschnittlichen Konzentrationen bei verschiedenen Windrichtungen variieren nach Station und Schadstoff. Beachtenswert ist in dieser Hinsicht die Station Härkingen, die nördlich der in Ost-West Richtung verlaufenden Autobahn A1 liegt. Für die Stationen Chaumont und Rigi-Seebodenalp sind die Partikelanzahl-, SO₂- und NO_x-Konzentrationen bei Windrichtungen aus den Sektoren 90°–157.5° bzw. 292.5°–67.5° am höchsten. Für die Analyse der Windrichtungsabhängigkeit von Schadstoffkonzentrationen wurden nur diejenigen 10 Minuten Intervalle verwendet, bei denen die zugehörige mittlere Windgeschwindigkeit mindestens 0.5 m/s beträgt.

BAS									BER								
	SO ₂	NO _x	NO ₂	NO	O ₃	CO	PM10	PNC		SO ₂	NO _x	NO ₂	NO	O ₃	CO	PM10	PNC
Druck	0.13	0.14	0.13	0.13	-0.14	NA	0.20	0.16	Druck	NA	0.07	0.03	0.08	-0.11	0.09	0.12	0.06
Temperatur	-0.37	-0.41	-0.49	-0.28	0.63	NA	-0.32	-0.21	Temperatur	NA	-0.26	-0.18	-0.26	0.55	-0.29	-0.28	-0.19
Feuchte	0.13	0.26	0.27	0.21	-0.71	NA	0.10	0.03	Feuchte	NA	0.17	-0.02	0.23	-0.68	0.13	-0.01	0.06
Strglo	-0.10	-0.12	-0.21	-0.03	0.48	NA	-0.07	0.04	Strglo	NA	-0.12	-0.11	-0.11	0.54	-0.18	0.02	-0.05

HAE									LUG								
	SO ₂	NO _x	NO ₂	NO	O ₃	CO	PM10	PNC		SO ₂	NO _x	NO ₂	NO	O ₃	CO	PM10	PNC
Druck	0.11	0.01	-0.04	0.02	-0.08	0.07	0.15	0.03	Druck	0.24	0.13	0.12	0.11	-0.08	0.16	0.26	0.21
Temperatur	-0.23	-0.20	-0.14	-0.21	0.50	-0.45	-0.29	-0.16	Temperatur	-0.66	-0.48	-0.53	-0.39	0.75	-0.50	-0.25	-0.39
Feuchte	0.09	0.26	0.12	0.28	-0.74	0.35	0.10	0.17	Feuchte	0.08	0.23	0.24	0.18	-0.46	0.26	0.22	0.06
Strglo	-0.02	-0.12	-0.10	-0.11	0.52	-0.25	-0.05	-0.06	Strglo	-0.20	-0.20	-0.26	-0.13	0.51	-0.24	-0.12	-0.14

CHA									RIG								
	SO ₂	NO _x	NO ₂	NO	O ₃	CO	PM10	PNC		SO ₂	NO _x	NO ₂	NO	O ₃	CO	PM10	PNC
Druck	0.02	-0.07	-0.08	-0.01	0.15	NA	0.09	0.13	Druck	0.04	-0.04	-0.04	-0.01	0.08	-0.13	0.17	0.10
Temperatur	-0.14	-0.28	-0.29	-0.10	0.56	NA	0.16	0.27	Temperatur	-0.19	-0.35	-0.37	-0.15	0.57	-0.49	0.13	0.24
Feuchte	-0.12	0.07	0.09	-0.01	-0.54	NA	-0.17	-0.35	Feuchte	-0.05	0.30	0.30	0.15	-0.58	0.24	-0.03	-0.14
Strglo	0.16	0.09	0.01	0.33	0.28	NA	0.06	0.44	Strglo	0.12	0.02	-0.03	0.18	0.27	-0.03	0.17	0.34

Tabelle 3: Korrelationskoeffizienten (Pearson-Korrelation) berechnet aus Zeitreihen (10 min Mittelwerte) meteorologischer Messgrößen und Luftschadstoffen. PNC und Strglo bezeichnen die Partikelanzahlkonzentration bzw. die Globalstrahlung. Der Zeitbereich der verwendeten Daten ist in Tabelle 1 enthalten.

BAS									BER								
	SO ₂	NO _x	NO ₂	NO	O ₃	CO	PM10	PNC		SO ₂	NO _x	NO ₂	NO	O ₃	CO	PM10	PNC
Druck	0.15	0.17	0.16	0.17	-0.15	NA	0.24	0.22	Druck	NA	0.11	0.05	0.12	-0.12	0.13	0.17	0.10
Temperatur	-0.43	-0.52	-0.59	-0.40	0.63	NA	-0.39	-0.31	Temperatur	NA	-0.41	-0.37	-0.40	0.59	-0.49	-0.41	-0.35
Feuchte	0.06	0.33	0.28	0.34	-0.67	NA	0.12	0.04	Feuchte	NA	0.29	0.06	0.35	-0.68	0.29	0.06	0.10
Strglo	-0.24	-0.39	-0.39	-0.34	0.69	NA	-0.15	-0.09	Strglo	NA	-0.38	-0.22	-0.40	0.70	-0.38	-0.17	-0.22

HAE									LUG								
	SO ₂	NO _x	NO ₂	NO	O ₃	CO	PM10	PNC		SO ₂	NO _x	NO ₂	NO	O ₃	CO	PM10	PNC
Druck	0.15	-0.01	-0.07	0.01	-0.07	0.08	0.19	0.04	Druck	0.27	0.18	0.17	0.16	-0.06	0.22	0.31	0.28
Temperatur	-0.37	-0.26	-0.24	-0.26	0.49	-0.53	-0.37	-0.23	Temperatur	-0.79	-0.70	-0.74	-0.59	0.80	-0.70	-0.32	-0.51
Feuchte	0.22	0.37	0.24	0.39	-0.70	0.42	0.15	0.28	Feuchte	0.03	0.29	0.30	0.25	-0.38	0.33	0.26	0.01
Strglo	-0.23	-0.27	-0.21	-0.28	0.66	-0.39	-0.18	-0.17	Strglo	-0.54	-0.63	-0.65	-0.54	0.82	-0.63	-0.30	-0.37

CHA									RIG								
	SO ₂	NO _x	NO ₂	NO	O ₃	CO	PM10	PNC		SO ₂	NO _x	NO ₂	NO	O ₃	CO	PM10	PNC
Druck	0.02	-0.09	-0.09	-0.03	0.17	NA	0.13	0.22	Druck	0.05	-0.05	-0.05	-0.02	0.10	-0.14	0.20	0.21
Temperatur	-0.26	-0.39	-0.38	-0.36	0.60	NA	0.23	0.34	Temperatur	-0.26	-0.45	-0.46	-0.28	0.60	-0.55	0.13	0.38
Feuchte	-0.21	0.06	0.06	0.00	-0.57	NA	-0.30	-0.53	Feuchte	-0.09	0.31	0.31	0.21	-0.59	0.23	-0.07	-0.28
Strglo	0.11	-0.11	-0.11	-0.05	0.73	NA	0.37	0.66	Strglo	0.04	-0.21	-0.22	-0.14	0.68	-0.22	0.30	0.64

Tabelle 4: Korrelationskoeffizienten (Pearson-Korrelation) berechnet aus Zeitreihen täglicher Mittelwerte meteorologischer Messgrößen und Luftschadstoffen. PNC und Strglo bezeichnen die Partikelanzahlkonzentration bzw. die Globalstrahlung. Der Zeitbereich der verwendeten Daten ist in Tabelle 1 enthalten.

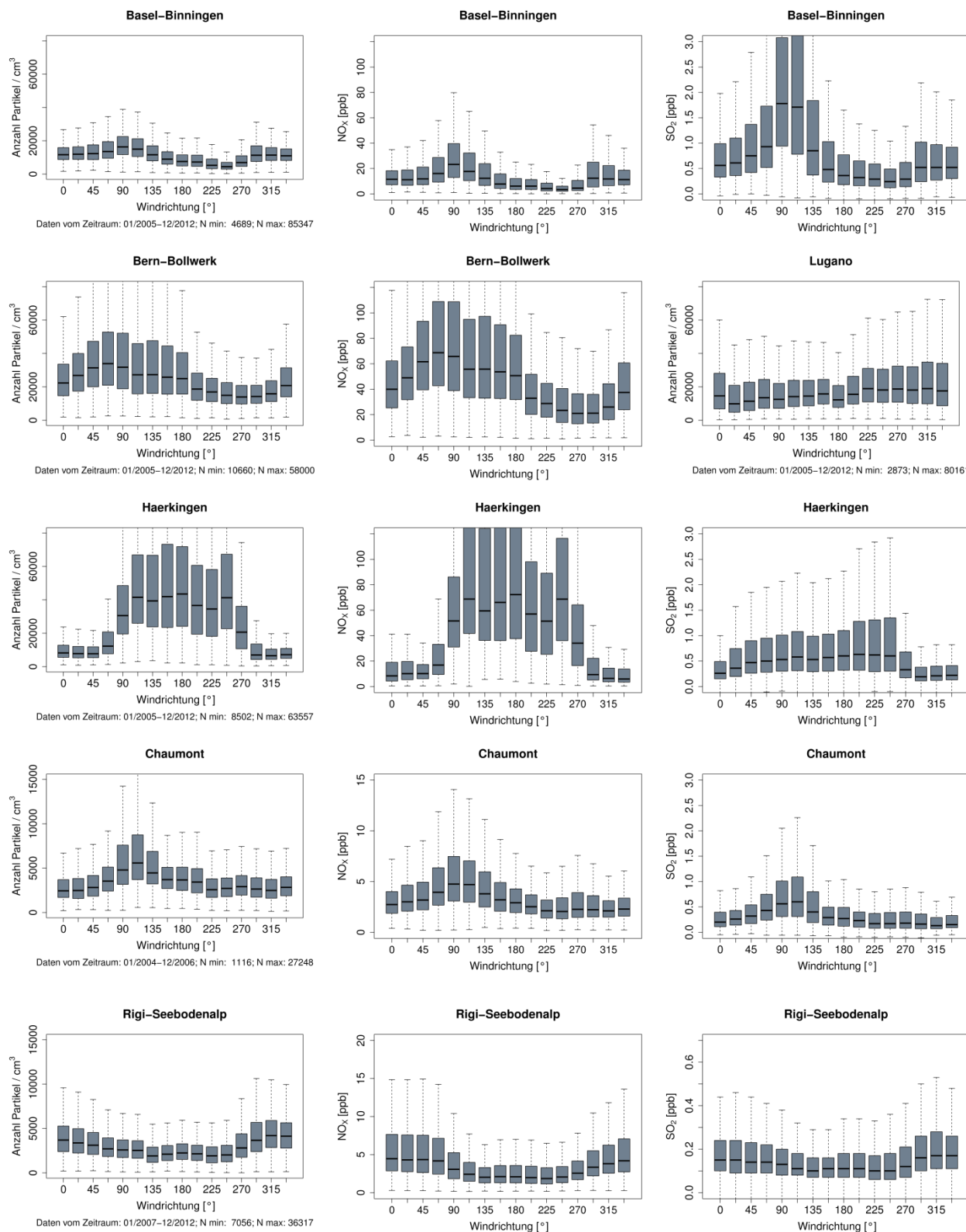


Abbildung 13: Partikelanzahl-, NO_x - und SO_2 -Konzentration an den verschiedenen NABEL-Stationen in Abhängigkeit der Windrichtung. Für die Abbildungen der Stationen Rigi-Seebodenalp und Chaumont wurde ein kleinerer Skalenbereich der y-Achse gewählt.

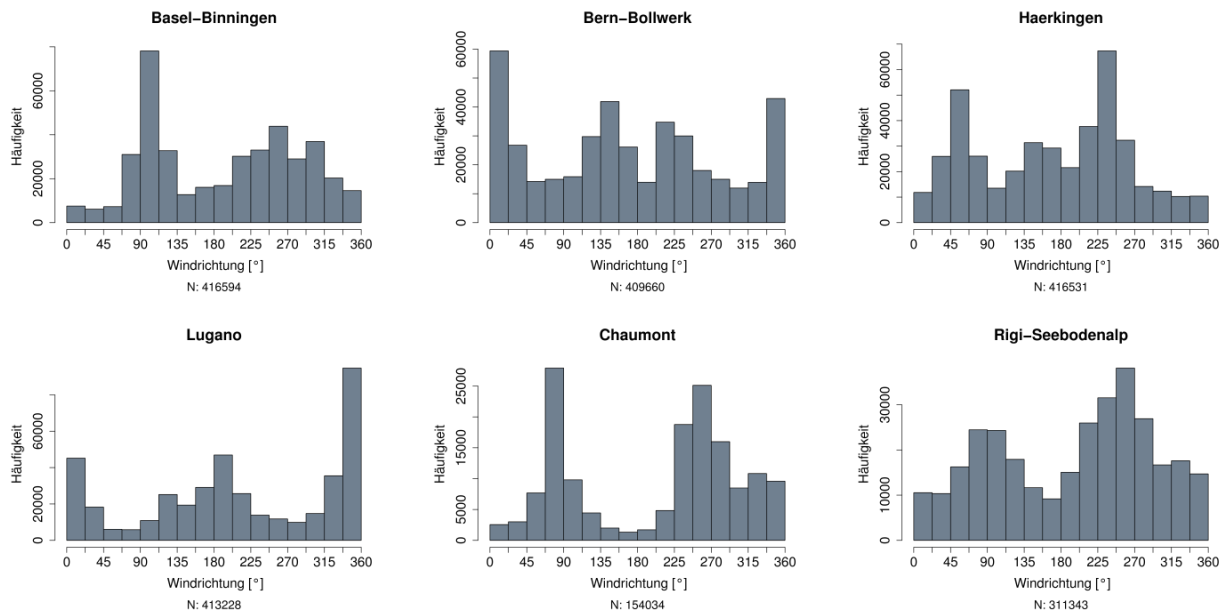


Abbildung 14: Häufigkeitsverteilung der Windrichtungen an den verschiedenen NABEL-Stationen.

4.3 Vergleich der Partikelanzahlkonzentration mit der Konzentration anderer Schadstoffe

In diesem Kapitel wird die zeitlich variierende Partikelanzahlkonzentration an den diskutierten NABEL-Standorten mit der Konzentration anderer Luftschadstoffe verglichen. Zeitreihen der Partikelanzahlkonzentration sowie der Konzentrationen von NO, NO₂, NO_x, O₃, SO₂, CO und PM₁₀ sind in den Abbildungen A1 bis A6 im Anhang dargestellt. Abbildungen A1 bis A6 zeigen die jahreszeitlichen Unterschiede in den Konzentrationen deutlich. Konzentrationen von NO, NO₂, NO_x, SO₂ und CO sind im Winter typischerweise höher als im Sommer. Demgegenüber ist die Ozonbelastung im Sommer deutlich grösser als im Winter. Bei der saisonalen Abhängigkeit der Partikelanzahlkonzentration sind bei den verschiedenen Stationen Unterschiede feststellbar: An den stärker belasteten Stationen (Basel-Binningen, Bern-Bollwerk, Härkingen und Lugano-Universität) werden im Winter typischerweise höhere Partikelkonzentrationen gemessen, an den ländlichen und erhöht gelegenen Stationen Chaumont und Rigi-Seebodenalp sind dagegen die Partikelanzahlkonzentrationen im Sommer höher als im Winter.

Daraus folgt, dass an den Stationen Chaumont und Rigi-Seebodenalp die erhöhten Partikelanzahlkonzentrationen im Allgemeinen nicht gemeinsam mit erhöhten Konzentrationen von NO_x, SO₂ und CO auftreten. Entsprechend sind die Korrelationskoeffizienten zwischen Partikelanzahlkonzentration und der Konzentration anderer Luftschadstoffe an den Stationen Chaumont und Rigi-Seebodenalp tiefer, als an den anderen Stationen (Tabelle 5).

- Hohe Korrelationen zwischen Partikelanzahlkonzentration und Stickoxiden (0.83-0.87) treten an stark verkehrsbelasteten Standorten auf (Bern-Bollwerk, Härkingen). Dies ist zu erwarten, da der Strassenverkehr eine der Hauptquellen von NO_x und Partikeln ist und die Messgeräte den Emissionen des Strassenverkehrs in unmittelbarer Nähe zur Messstation ausgesetzt sind. Die entsprechenden Korrelationen sind

an den weniger stark verkehrsbelasteten Standorten Basel-Binningen und Lugano-Universität tiefer (jeweils 0.66).

- Die Korrelationen zwischen Partikelanzahlkonzentration und Schwefeldioxid bzw. Kohlenmonoxid liegen für die Stationen Basel-Binningen, Bern-Bollwerk, Härkingen und Lugano-Universität im Bereich von 0.35 bis 0.70.
- An den Stationen Chaumont und Rigi-Seebodenalp sind die Korrelationen zwischen Partikelanzahlkonzentration und den Konzentrationen von SO₂, NO, NO₂, NO_x, O₃ und CO und PM10 gering. Am stärksten korreliert die Partikelanzahlkonzentration mit Schwefeldioxid (Rigi-Seebodenalp: 0.28, Chaumont: 0.44).

Werden die Korrelationskoeffizienten zwischen Partikelanzahlkonzentration und der Konzentration anderer Luftschadstoffe an den betrachteten NABEL-Stationen nach Jahreszeiten getrennt berechnet, so ergeben sich an den Stationen Chaumont und Rigi-Seebodenalp im Winter etwas stärkere lineare Abhängigkeiten (Tabelle 6), insbesondere zwischen Partikelanzahlkonzentration und SO₂.

BAS									BER								
	SO ₂	NO _x	NO ₂	NO	O ₃	CO	PM10	PNC		SO ₂	NO _x	NO ₂	NO	O ₃	CO	PM10	PNC
SO ₂	1.00	0.68	0.66	0.57	-0.45	NA	0.52	0.63	SO ₂	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
NO _x	0.68	1.00	0.86	0.92	-0.61	NA	0.60	0.66	NO _x	NA	1.00	0.82	0.98	-0.55	0.79	0.39	0.83
NO ₂	0.66	0.86	1.00	0.60	-0.67	NA	0.64	0.65	NO ₂	NA	0.82	1.00	0.69	-0.44	0.72	0.42	0.71
NO	0.57	0.92	0.60	1.00	-0.45	NA	0.45	0.54	NO	NA	0.98	0.69	1.00	-0.54	0.75	0.35	0.80
O ₃	-0.45	-0.61	-0.67	-0.45	1.00	NA	-0.35	-0.35	O ₃	NA	-0.55	-0.44	-0.54	1.00	-0.49	-0.25	-0.40
CO	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	CO	NA	0.79	0.72	0.75	-0.49	1.00	0.48	0.66
PM10	0.52	0.60	0.64	0.45	-0.35	NA	1.00	0.44	PM10	NA	0.39	0.42	0.35	-0.25	0.48	1.00	0.32
PNC	0.63	0.66	0.65	0.54	-0.35	NA	0.44	1.00	PNC	NA	0.83	0.71	0.80	-0.40	0.66	0.32	1.00

HAE									LUG								
	SO ₂	NO _x	NO ₂	NO	O ₃	CO	PM10	PNC		SO ₂	NO _x	NO ₂	NO	O ₃	CO	PM10	PNC
SO ₂	1.00	0.29	0.24	0.29	-0.17	0.34	0.33	0.35	SO ₂	1.00	0.72	0.67	0.65	-0.54	0.70	0.39	0.70
NO _x	0.29	1.00	0.80	0.99	-0.54	0.67	0.35	0.87	NO _x	0.72	1.00	0.86	0.95	-0.57	0.90	0.47	0.66
NO ₂	0.24	0.80	1.00	0.69	-0.51	0.61	0.36	0.71	NO ₂	0.67	0.86	1.00	0.66	-0.62	0.81	0.56	0.59
NO	0.29	0.99	0.69	1.00	-0.51	0.65	0.33	0.86	NO	0.65	0.95	0.66	1.00	-0.46	0.83	0.34	0.61
O ₃	-0.17	-0.54	-0.51	-0.51	1.00	-0.59	-0.28	-0.42	O ₃	-0.54	-0.57	-0.62	-0.46	1.00	-0.56	-0.25	-0.41
CO	0.34	0.67	0.61	0.65	-0.59	1.00	0.61	0.57	CO	0.70	0.90	0.81	0.83	-0.56	1.00	0.57	0.65
PM10	0.33	0.35	0.36	0.33	-0.28	0.61	1.00	0.29	PM10	0.39	0.47	0.56	0.34	-0.25	0.57	1.00	0.31
PNC	0.35	0.87	0.71	0.86	-0.42	0.57	0.29	1.00	PNC	0.70	0.66	0.59	0.61	-0.41	0.65	0.31	1.00

RIG									CHA								
	SO ₂	NO _x	NO ₂	NO	O ₃	CO	PM10	PNC		SO ₂	NO _x	NO ₂	NO	O ₃	CO	PM10	PNC
SO ₂	1.00	0.45	0.46	0.25	-0.04	0.51	0.48	0.28	SO ₂	1.00	0.53	0.51	0.36	0.02	NA	0.30	0.44
NO _x	0.45	1.00	0.97	0.66	-0.51	0.82	0.44	0.16	NO _x	0.53	1.00	0.97	0.61	-0.27	NA	0.36	0.28
NO ₂	0.46	0.97	1.00	0.45	-0.50	0.82	0.48	0.15	NO ₂	0.51	0.97	1.00	0.42	-0.26	NA	0.39	0.25
NO	0.25	0.66	0.45	1.00	-0.31	0.43	0.13	0.10	NO	0.36	0.61	0.42	1.00	-0.18	NA	0.09	0.25
O ₃	-0.04	-0.51	-0.50	-0.31	1.00	-0.36	0.09	0.17	O ₃	0.02	-0.27	-0.26	-0.18	1.00	NA	0.28	0.27
CO	0.51	0.82	0.82	0.43	-0.36	1.00	0.46	0.11	CO	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
PM10	0.48	0.44	0.48	0.13	0.09	0.46	1.00	0.25	PM10	0.30	0.36	0.39	0.09	0.28	NA	1.00	0.25
PNC	0.28	0.16	0.15	0.10	0.17	0.11	0.25	1.00	PNC	0.44	0.28	0.25	0.25	0.27	NA	0.25	1.00

Tabelle 5: Korrelationskoeffizienten (Pearson-Korrelation) berechnet aus Zeitreihen verschiedener Schadstoffkonzentrationen (10 min Mittelwerte). PNC bezeichnet die Partikelanzahlkonzentration. Der Zeitbereich der verwendeten Daten ist in Tabelle 1 enthalten.

CHA

W

	SO ₂	NO _x	NO ₂	NO	O ₃	CO	PM10	PNC
SO ₂	1.00	0.60	0.57	0.39	-0.28	NA	0.36	0.42
NO _x	0.60	1.00	0.97	0.60	-0.58	NA	0.50	0.36
NO ₂	0.57	0.97	1.00	0.38	-0.60	NA	0.52	0.32
NO	0.39	0.60	0.38	1.00	-0.23	NA	0.19	0.32
O ₃	-0.28	-0.58	-0.60	-0.23	1.00	NA	-0.14	0.06
CO	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
PM10	0.36	0.50	0.52	0.19	-0.14	NA	1.00	0.29
PNC	0.42	0.36	0.32	0.32	0.06	NA	0.29	1.00

F

	SO ₂	NO _x	NO ₂	NO	O ₃	CO	PM10	PNC
SO ₂	1.00	0.59	0.56	0.40	0.15	NA	0.44	0.44
NO _x	0.59	1.00	0.97	0.63	-0.09	NA	0.55	0.37
NO ₂	0.56	0.97	1.00	0.44	-0.06	NA	0.60	0.33
NO	0.40	0.63	0.44	1.00	-0.15	NA	0.12	0.33
O ₃	0.15	-0.09	-0.06	-0.15	1.00	NA	0.25	0.30
CO	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
PM10	0.44	0.55	0.60	0.12	0.25	NA	1.00	0.25
PNC	0.44	0.37	0.33	0.33	0.30	NA	0.25	1.00

S

	SO ₂	NO _x	NO ₂	NO	O ₃	CO	PM10	PNC
SO ₂	1.00	0.51	0.51	0.33	0.26	NA	0.24	0.55
NO _x	0.51	1.00	0.98	0.70	0.28	NA	0.27	0.50
NO ₂	0.51	0.98	1.00	0.53	0.35	NA	0.31	0.48
NO	0.33	0.70	0.53	1.00	-0.09	NA	0.02	0.36
O ₃	0.26	0.28	0.35	-0.09	1.00	NA	0.47	0.25
CO	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
PM10	0.24	0.27	0.31	0.02	0.47	NA	1.00	0.17
PNC	0.55	0.50	0.48	0.36	0.25	NA	0.17	1.00

H

	SO ₂	NO _x	NO ₂	NO	O ₃	CO	PM10	PNC
SO ₂	1.00	0.46	0.43	0.34	0.12	NA	0.28	0.53
NO _x	0.46	1.00	0.97	0.59	-0.33	NA	0.28	0.34
NO ₂	0.43	0.97	1.00	0.39	-0.30	NA	0.32	0.31
NO	0.34	0.59	0.39	1.00	-0.24	NA	0.02	0.27
O ₃	0.12	-0.33	-0.30	-0.24	1.00	NA	0.33	0.21
CO	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
PM10	0.28	0.28	0.32	0.02	0.33	NA	1.00	0.26
PNC	0.53	0.34	0.31	0.27	0.21	NA	0.26	1.00

RIG

W

	SO ₂	NO _x	NO ₂	NO	O ₃	CO	PM10	PNC
SO ₂	1.00	0.50	0.50	0.29	-0.27	0.59	0.63	0.51
NO _x	0.50	1.00	0.97	0.65	-0.78	0.87	0.63	0.44
NO ₂	0.50	0.97	1.00	0.44	-0.79	0.87	0.67	0.44
NO	0.29	0.65	0.44	1.00	-0.38	0.47	0.23	0.24
O ₃	-0.27	-0.78	-0.79	-0.38	1.00	-0.71	-0.40	-0.21
CO	0.59	0.87	0.87	0.47	-0.71	1.00	0.69	0.41
PM10	0.63	0.63	0.67	0.23	-0.40	0.69	1.00	0.50
PNC	0.51	0.44	0.44	0.24	-0.21	0.41	0.50	1.00

F

	SO ₂	NO _x	NO ₂	NO	O ₃	CO	PM10	PNC
SO ₂	1.00	0.49	0.49	0.30	0.08	0.46	0.54	0.38
NO _x	0.49	1.00	0.98	0.66	-0.37	0.78	0.58	0.24
NO ₂	0.49	0.98	1.00	0.49	-0.35	0.79	0.61	0.21
NO	0.30	0.66	0.49	1.00	-0.29	0.42	0.22	0.22
O ₃	0.08	-0.37	-0.35	-0.29	1.00	-0.34	0.05	0.16
CO	0.46	0.78	0.79	0.42	-0.34	1.00	0.55	0.10
PM10	0.54	0.58	0.61	0.22	0.05	0.55	1.00	0.20
PNC	0.38	0.24	0.21	0.22	0.16	0.10	0.20	1.00

S

	SO ₂	NO _x	NO ₂	NO	O ₃	CO	PM10	PNC
SO ₂	1.00	0.34	0.35	0.16	0.33	0.31	0.42	0.42
NO _x	0.34	1.00	0.98	0.65	0.02	0.55	0.39	0.32
NO ₂	0.35	0.98	1.00	0.50	0.08	0.57	0.42	0.31
NO	0.16	0.65	0.50	1.00	-0.24	0.20	0.09	0.23
O ₃	0.33	0.02	0.08	-0.24	1.00	0.35	0.49	0.19
CO	0.31	0.55	0.57	0.20	0.35	1.00	0.48	0.16
PM10	0.42	0.39	0.42	0.09	0.49	0.48	1.00	0.23
PNC	0.42	0.32	0.31	0.23	0.19	0.16	0.23	1.00

H

	SO ₂	NO _x	NO ₂	NO	O ₃	CO	PM10	PNC
SO ₂	1.00	0.27	0.27	0.17	0.02	0.27	0.26	0.21
NO _x	0.27	1.00	0.96	0.67	-0.66	0.84	0.30	0.12
NO ₂	0.27	0.96	1.00	0.42	-0.65	0.84	0.35	0.13
NO	0.17	0.67	0.42	1.00	-0.38	0.48	0.03	0.07
O ₃	0.02	-0.66	-0.65	-0.38	1.00	-0.60	-0.02	0.02
CO	0.27	0.84	0.84	0.48	-0.60	1.00	0.33	0.15
PM10	0.26	0.30	0.35	0.03	-0.02	0.33	1.00	0.13
PNC	0.21	0.12	0.13	0.07	0.02	0.15	0.13	1.00

Tabelle 6: Korrelationskoeffizienten (Pearson-Korrelation) berechnet aus Zeitreihen verschiedener Schadstoffkonzentrationen (10 min Mittelwerten) für die Stationen Chaumont und Rigi-Seebodenalp. W: Winter (Dez.-Feb.), F: Frühling (Mar.-Mai), S: Sommer (Juni-Aug.), H: Herbst (Sept.-Nov.)

5 Analyse erhöhter Partikelanzahlkonzentration

5.1 Definition einer erhöhten Partikelanzahlkonzentration

In diesem Bericht werden Ereignisse untersucht, bei denen die momentan gemessene Partikelanzahlkonzentration deutlich über der durchschnittlichen Partikelanzahlkonzentration an der betrachteten Messstation liegt.

Ein Ereignis erhöhter Partikelanzahlkonzentration an einer Messstation wird in diesem Bericht wie folgt definiert: Sind drei aufeinanderfolgende 10 min Mittelwerte grösser als das 99%-Quantil aller im untersuchten Zeitraum gemessener 10 min Mittelwerte (Tabelle 1), so handelt es sich um ein Ereignis erhöhter Partikelanzahlkonzentration. Aufgrund dieser Definition ist die Anzahl erhöhter Messwerte kleiner als 1 Prozent aller 10 min Mittelwerte. Für die Stationen Chaumont und Rigi-Seebodenalp sind bei einem Ereignis mit erhöhten Partikelanzahlkonzentrationen drei aufeinanderfolgende 10 min Mittelwerte grösser als 16'426 Partikel/cm³ bzw. 12'140 Partikel/cm³ (siehe Tabelle 7).

Station	Anzahl Messungen	Anzahl erhöhte Werte	(%)	99%-Quantil [Partikel/cm ³]	T (Median) [Min]	T (95%) [h]	T (99%) [h]	T (Max) [h]
Basel-Binningen	418484	3436	(0.82)	46932	40	5.0	11.0	18.5
Bern-Bollwerk	413215	1892	(0.46)	110450	30	2.0	3.2	4.0
Chaumont	155417	1338	(0.86)	16426	40	4.0	5.7	6.7
Härkingen	417420	2589	(0.62)	155391	30	2.7	3.9	4.8
Lugano	414924	3238	(0.78)	99976	50	3.8	4.6	6.8
Rigi-Seebodenalp	312620	2623	(0.84)	12140	50	4.2	6.5	7.8

Tabelle 7: Anzahl Messungen, die zu Ereignissen erhöhter Partikelanzahlkonzentration zählen. T gibt Statistiken der Dauer der Ereignisse erhöhter Partikelanzahlkonzentration an.

5.2 Charakterisierung von Ereignissen erhöhter Partikelanzahlkonzentration

Ereignisse erhöhter Partikelanzahlkonzentration an einem Standort gemäss der Definition in Kapitel 4.1 sind zeitlich nicht gleichverteilt. Sie hängen von den vorhandenen Emissionsquellen, chemischen Prozessen und der Meteorologie ab. Um das Auftreten dieser Ereignisse zu charakterisieren, wird deren Verteilung in Abhängigkeit verschiedener Grössen untersucht. Die gewählten Grössen stehen dabei nicht zwingend in einem direkten kausalen Zusammenhang mit den gemessenen Partikelanzahlkonzentrationen.

Erhöhte Partikelanzahlkonzentrationen sind an den Stationen Chaumont und Rigi-Seebodenalp in den Frühlings- und Sommermonaten am häufigsten (Abbildung 15 und Abbildung 16). Sie treten fast ausschliesslich tagsüber auf, mit einem Maximum um die Mittagszeit. Diese jahres- und tageszeitliche Abhängigkeit ist im Einklang mit der beobachteten Temperaturabhängigkeit; erhöhte Partikelanzahlkonzentrationen treten vorwiegend bei wärmeren Lufttemperaturen auf. An verkehrsexponierten Standorten (Bern-Bollwerk, Härkingen) ist die Situation anders; erhöhte Partikelanzahlkonzentrationen treten hauptsächlich in den Wintermonaten und Werktags zwischen 6 und 10 Uhr auf (Situation Bern-Bollwerk ist in Abbildung 17 dargestellt).

Abbildung 18 zeigt exemplarische Tagesgänge der an der Station Rigi-Seebodenalp gemessenen Partikelanzahlkonzentrationen während sechs Monaten (April 2012 bis September 2012). Es ist gut ersichtlich, dass an

manchen Tagen die Konzentrationen am Morgen ansteigen, über mehrere Stunden erhöht (d.h. >99%-Quantil) bleiben und gegen Abend wieder abnehmen.

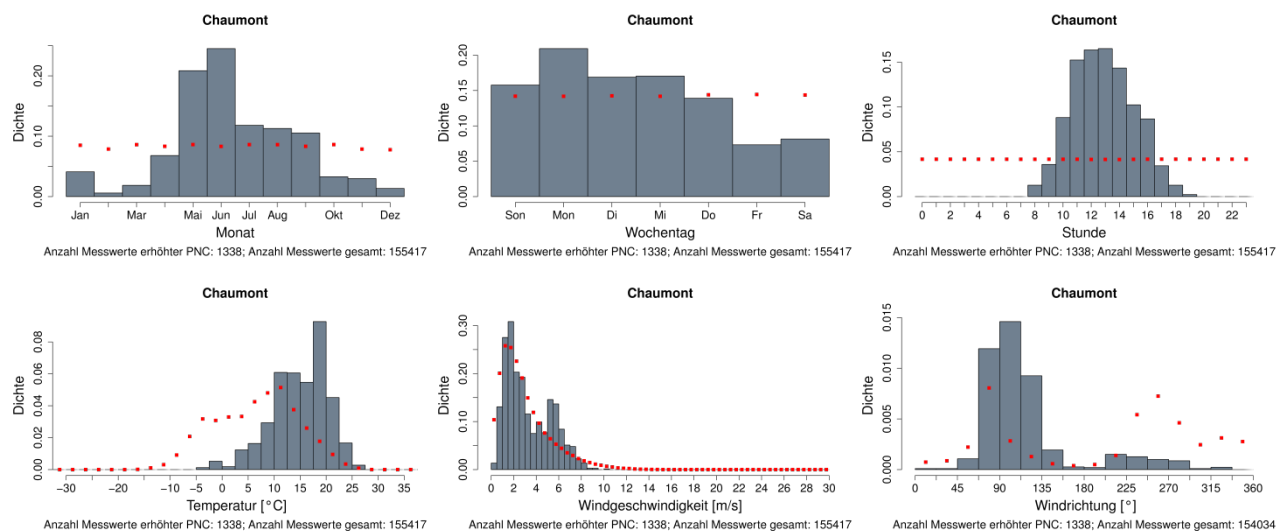


Abbildung 15: Dichteverteilungen erhöhter Partikelanzahlkonzentrationen in Abhängigkeit des Monats, des Wochentags, der Tageszeit, der Lufttemperatur, der Windgeschwindigkeit und der Windrichtung für die Station Chaumont. Die entsprechenden Dichteverteilungen aller 10 min Messwerte sind als rote Punkte dargestellt.

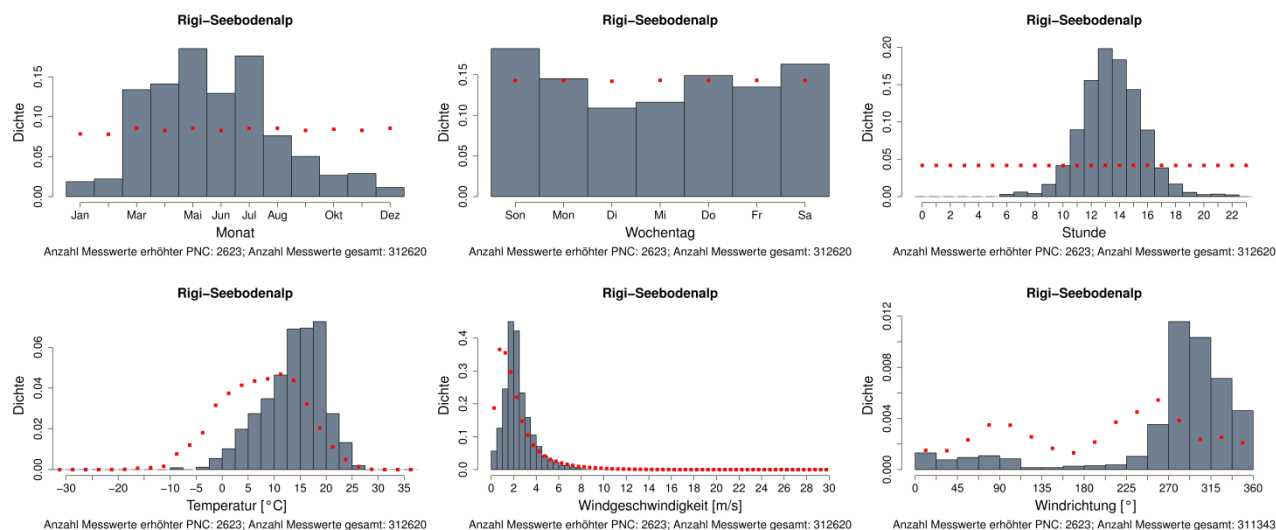


Abbildung 16: Dichteverteilungen erhöhter Partikelanzahlkonzentrationen in Abhängigkeit des Monats, des Wochentags, der Tageszeit, der Lufttemperatur, der Windgeschwindigkeit und der Windrichtung für die Station Rigi-Seebodenalp. Die entsprechenden Dichteverteilungen aller 10 min Messwerte sind als rote Punkte dargestellt.

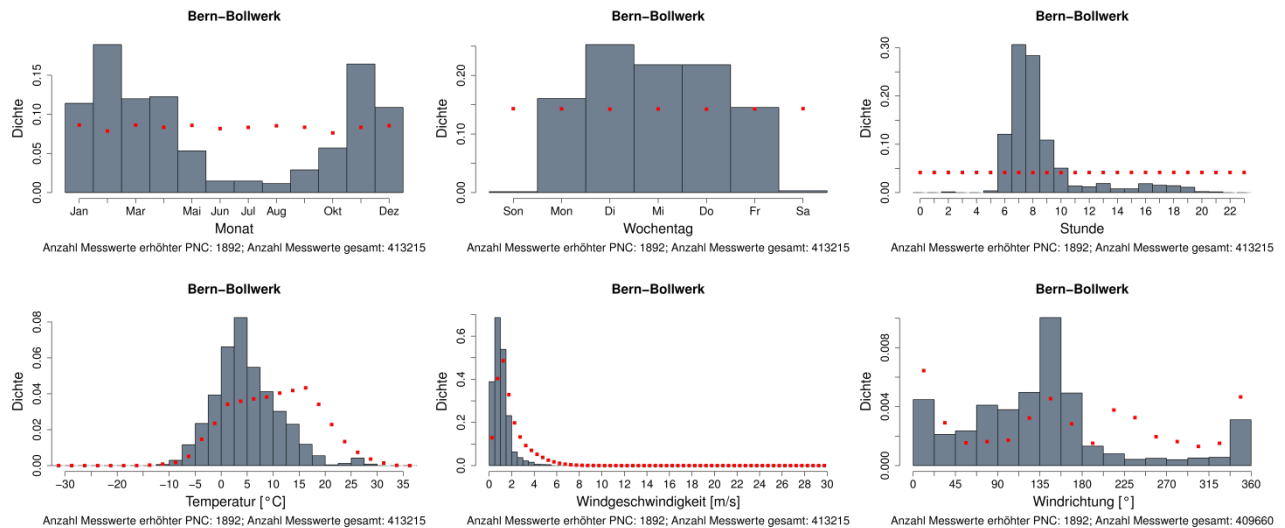


Abbildung 17: Dichteverteilungen erhöhter Partikelanzahlkonzentrationen in Abhängigkeit des Monats, des Wochentags, der Tageszeit, der Lufttemperatur, der Windgeschwindigkeit und der Windrichtung für die Station Bern-Bollwerk. Die entsprechenden Dichteverteilungen aller 10 min Messwerte sind als rote Punkte dargestellt.

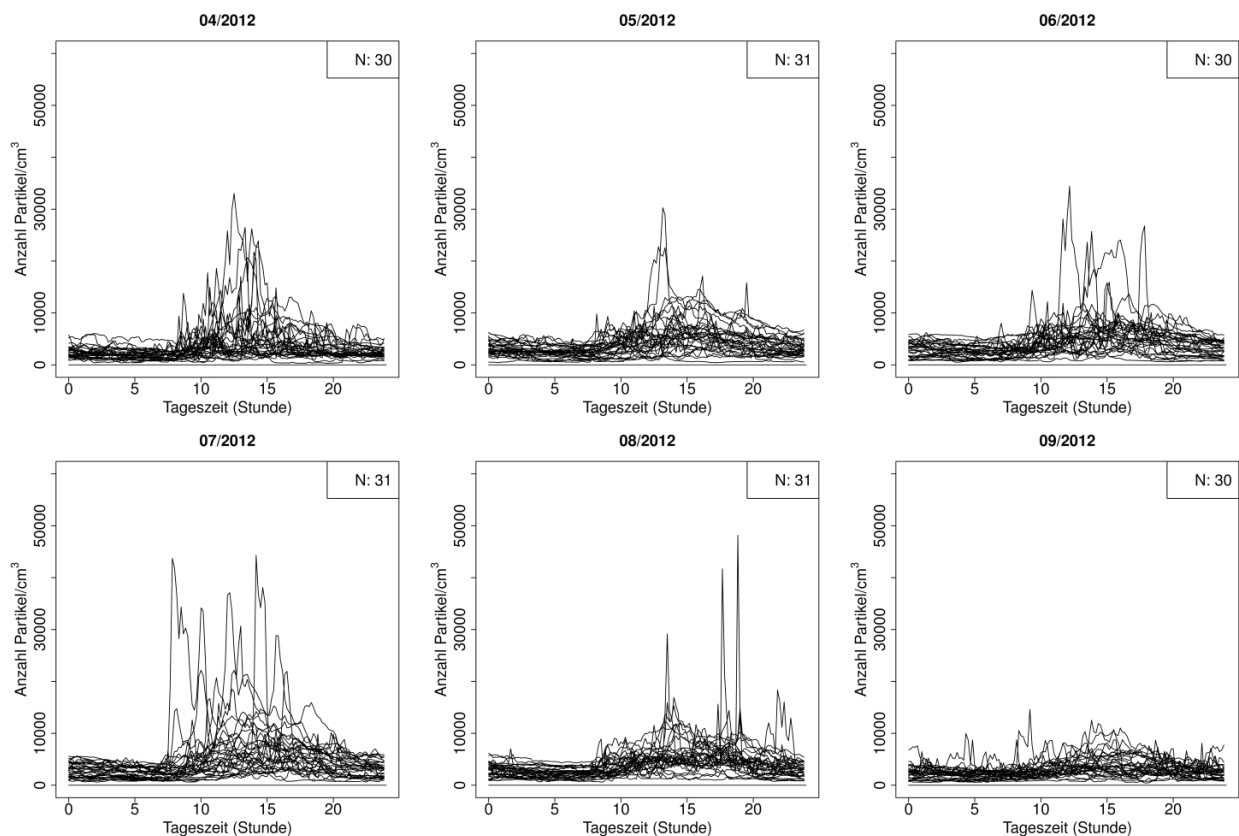


Abbildung 18: Beispiele von Tagesgängen der Partikelanzahlkonzentration an der Messstation Rigi-Seebodenalp vom April 2012 bis September 2012. Die Tagesgänge sind jeweils für einen Monat in den einzelnen Grafiken zusammengefasst (April 2012 oben links bis September 2012 unten rechts).

5.3 Analyse der PNC Extremwerte an der Station Rigi-Seebodenalp

An der Station Rigi-Seebodenalp wurden während des betrachteten Zeitraums insgesamt acht Ereignisse mit Partikelanzahlkonzentrationen über $100'000 \text{ Partikel/cm}^3$ beobachtet (siehe Tabelle A.1 im Anhang). Diese Extremwerte verteilen sich auf vier Tage (20.09.2008, 24.09.2009, 14.09.2010, 13.08.2011). Sie liegen in 50 bis 90 Minuten dauernden Zeitperioden deutlich erhöhter Partikelanzahlkonzentrationen. Während der Zeitperioden der meisten dieser Ereignisse sind auch die CO Konzentrationen erhöht (Abbildung 19). Abbildung 20 zeigt die mittleren Tagesgänge der Partikelanzahlkonzentration während der Monate in denen die beobachteten Extremwerte auftraten. Es ist gut erkennbar, dass sich die Tagesgänge an Tagen mit extremen Partikelanzahlkonzentrationen von Tagen mit erhöhten Partikelanzahlkonzentrationen unterscheiden (vgl. mit Abbildung 18). Die Extremwerte treten nur kurzzeitig auf. Die genaue Ursache für diese Extremwerte ist nicht bekannt, es ist jedoch wahrscheinlich, dass eine Emissionsquelle in unmittelbarer Nähe der Station (z.B. ein in der Nähe fahrendes landwirtschaftliches Nutzfahrzeug) diese extremen Messwerte verursacht haben.

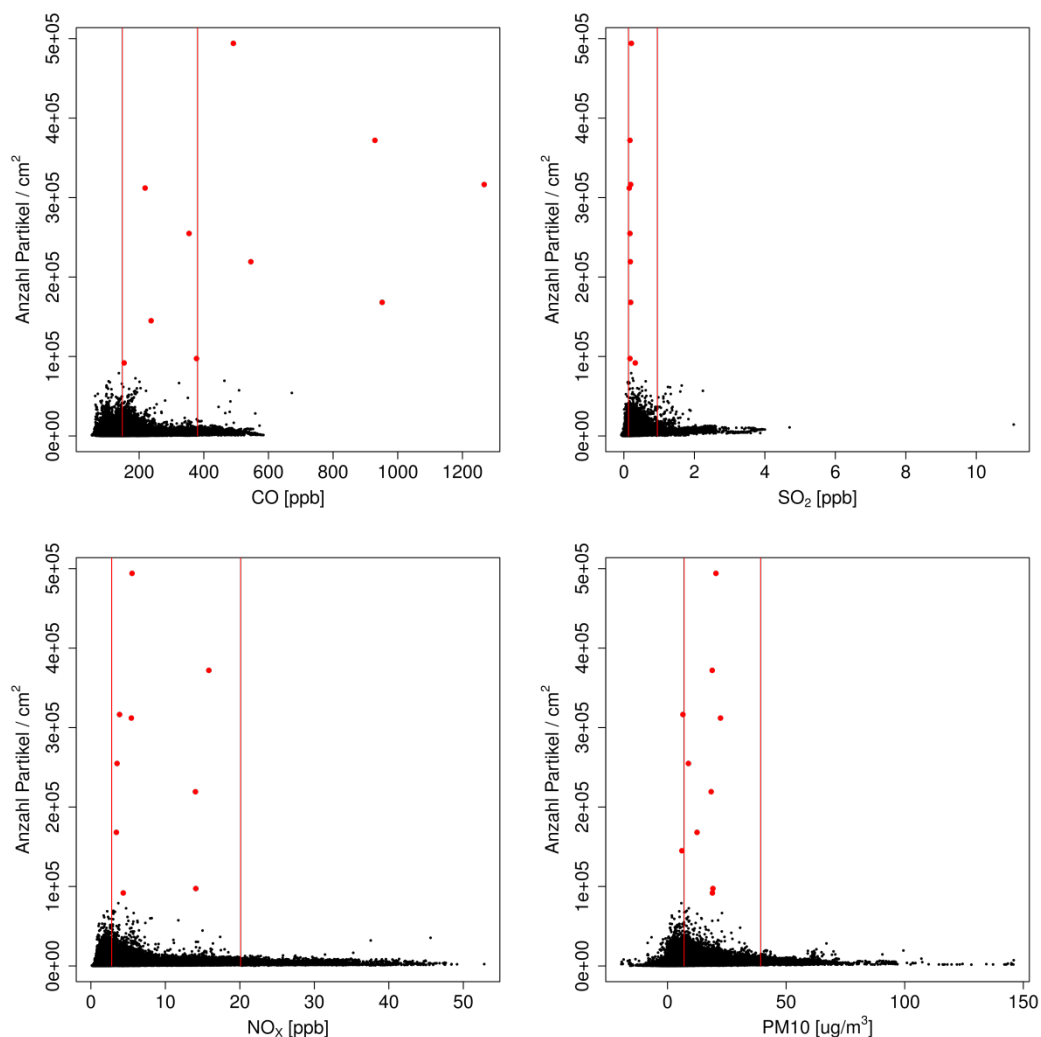


Abbildung 19: Partikelanzahlkonzentration an der Station Rigi-Seebodenalp versus CO-, SO_2 -, NO_x - und PM_{10} -Konzentrationen. PNC grösser als 80000 sind rot dargestellt, die vertikalen roten Linien kennzeichnen die 50%- und 99%-Quantile der auf der x-Achse aufgetragenen Messgrößen.

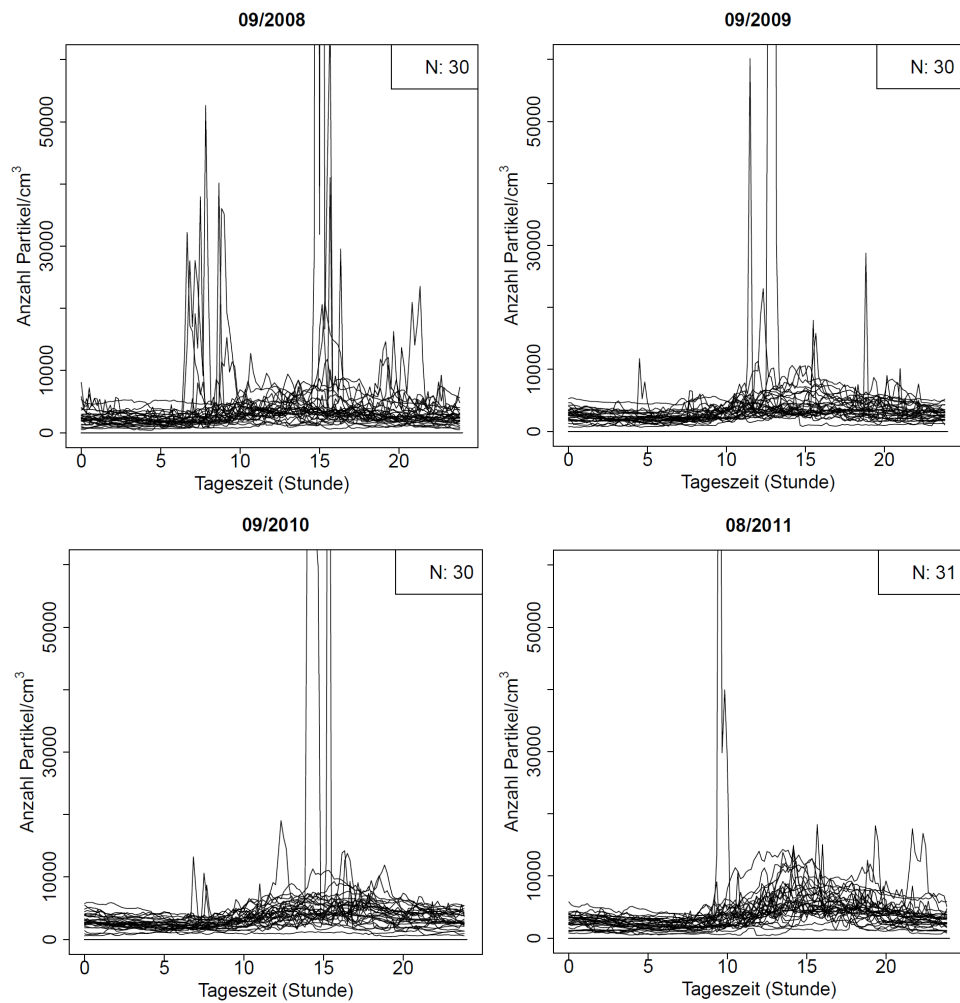


Abbildung 20: Tagesgänge der Partikelanzahlkonzentration an der Messstation Rigi-Seebodenalp für die Monaten an denen extreme Messwerte registriert wurden (vgl. Text). Die Tagesgänge sind jeweils für einen Monat in den einzelnen Grafiken zusammengefasst (September 2008 oben links, September 2009 oben rechts, September 2010 unten links und August 2011 unten rechts).

6 Vergleich zwischen VOC und Partikelanzahlkonzentration

Neubildung von sekundären Partikeln aus gasförmigen Verbindungen kann erheblich zur Partikelanzahl beitragen (Birmili et al., 2003; Reche, et al., 2011). Die Prozesse die zur Neubildung von Partikeln führen sind im Detail noch nicht verstanden. Aus einer Reihe von Studien geht jedoch hervor, dass gasförmiges H_2SO_4 und flüchtige organische Verbindungen (VOCs; insbesondere von Pflanzen freigesetzte Terpene) wichtige Vorläuferverbindungen für die Neubildung von Partikeln sind (Birmili et al., 2003). An der Station Rigi-Seebodenalp werden seit Juli 2001 eine Reihe von VOCs kontinuierlich gemessen (siehe Empa, 2013). Im Folgenden wird untersucht, ob an der Station Rigi-Seebodenalp ein Zusammenhang zwischen der Konzentration von flüchtigen organischen Verbindungen und der Partikelanzahlkonzentration erkennbar ist. Abbildung 21 zeigt die mittleren Jahresgänge von einigen der gemessenen VOCs.

Von den gemessenen VOCs zeigt einzig Isopren mit erhöhten Konzentrationen während der warmen Jahreszeit (Juni bis August) einen ausgeprägten Jahresgang. Dies ist nicht überraschend, da Isopren hauptsächlich von Pflanzen in die Atmosphäre freigesetzt wird. Die jahreszeitliche Abhängigkeit der Partikelanzahlkonzentration ist zu derjenigen von Isopren ähnlich, wenn auch während der Sommermonate weniger stark ausgeprägt (Abbildung 22). Die Konzentration von Isopren hängt wie auch die Partikelanzahlkonzentration stark von der Tageszeit ab (Abbildung 22). Streudiagramme von stündlichen und täglichen Isopren- und Partikelanzahlkonzentration-Messwerten liefern ebenfalls keinen klaren Hinweis auf eine Abhängigkeit, bzw. eine Bedeutung von Isopren für die Bildung einer signifikanten Anzahl von Partikeln (Abbildung 23). Die Beteiligung von Isopren an der Bildung von sekundären Partikeln wurde in verschiedenen Studien untersucht (z.B. Kroll et al., 2005). Neuere Studien deuten darauf hin, dass Isopren wegen der hohen Reaktivität mit OH-Radikalen die Partikelbildung eher hemmt (Kanawade et al., 2011, Kiendler-Scharr et al., 2009).

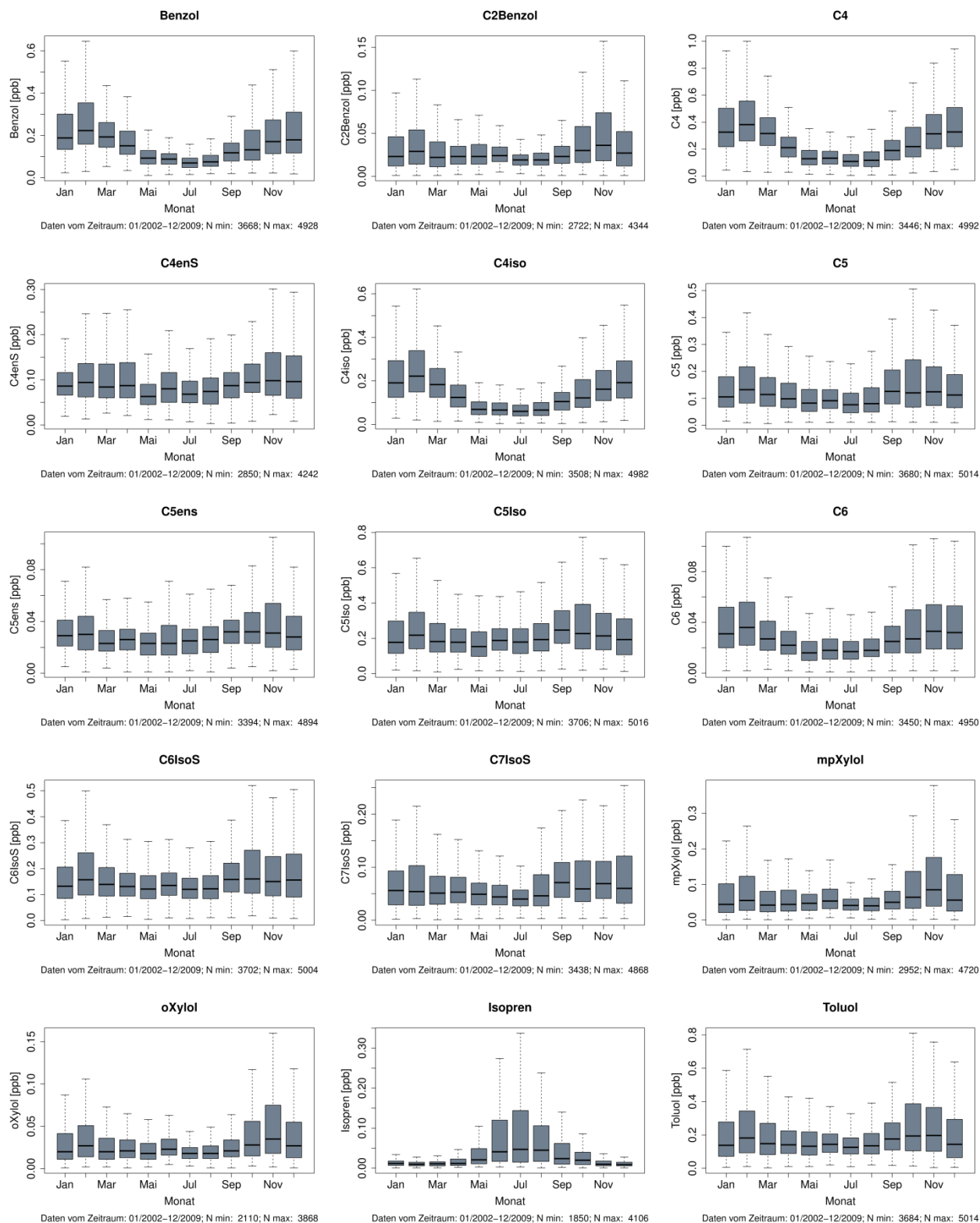


Abbildung 21: Durchschnittliche monatliche Konzentration von flüchtigen organischen Verbindungen (VOCs) an der Messstation Rigi-Seebodenalp.

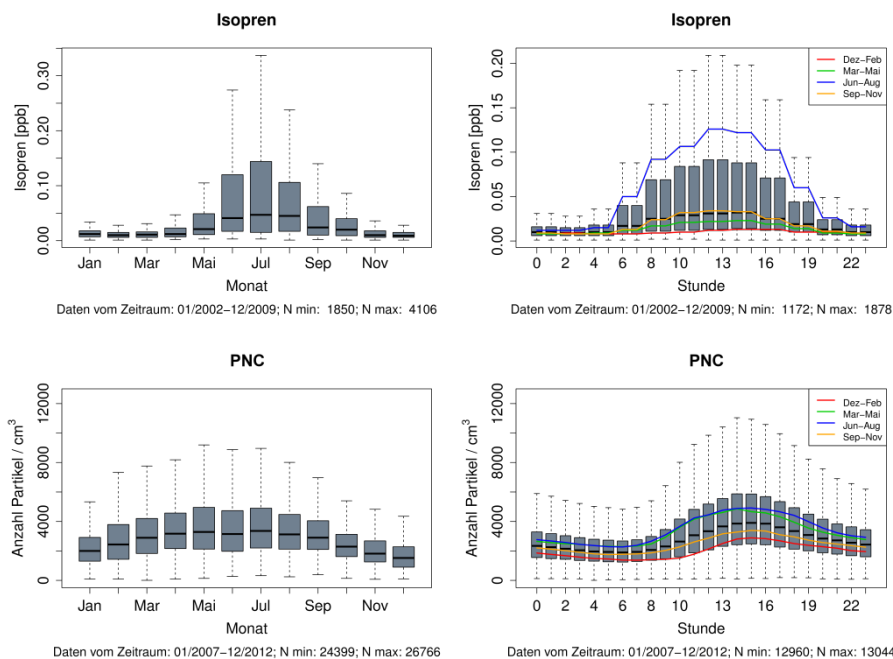


Abbildung 22: Durchschnittliche monatliche und stündliche Isopren- und Partikelanzahlkonzentrationen an der Station Rigi-Seebodenalp. Die farbigen Linien zeigen den Median in den vier Jahreszeiten.

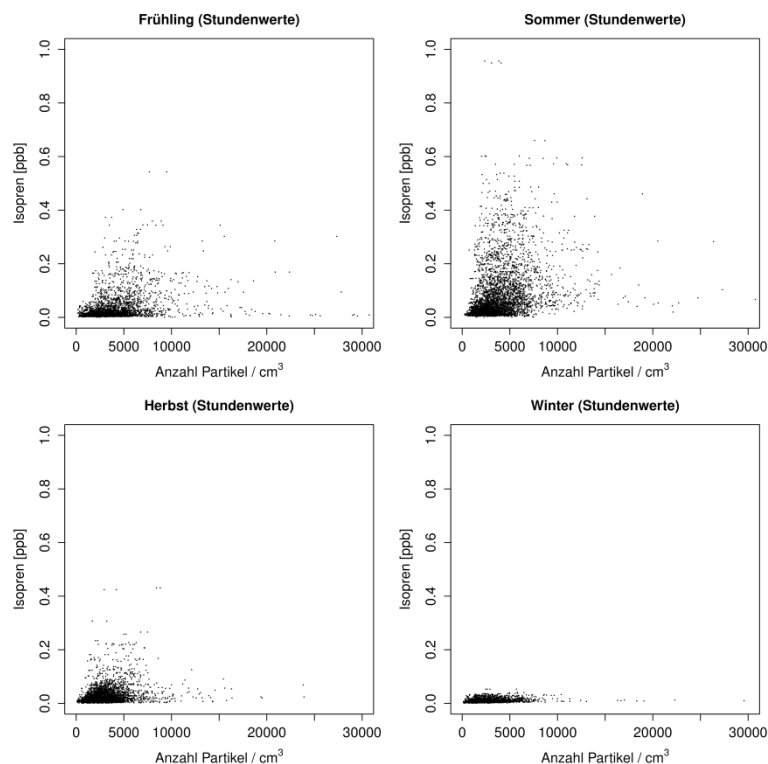


Abbildung 23: Streudiagramme der an der Station Rigi-Seebodenalp gemessenen Konzentration von Isopren gegen die Partikelanzahlkonzentration nach Jahreszeiten getrennt (Stundenwerte). Fröhling: März-Mai, Sommer: Juni-Aug., Herbst: Sept.-Nov., Winter: Dez.-Feb.

7 Literaturverzeichnis

- BAFU (2013). NABEL, Luftbelastung 2012. Messresultate des Nationalen Beobachtungsnetzes für Luftfremdstoffe (NABEL). Bundesamt für Umwelt (BAFU). Verfügbar unter <http://www.bafu.admin.ch/luft/>.
- Birmili, W., Berresheim, H., Plass-Dülmer, C., Elste, T., Gilge, S., Wiedensohler, A., Uhrner, U. (2003). The Hohenpeissenberg aerosol formation experiment (HAFEX): a long-term study including size-resolved aerosol, H₂SO₄, OH, and monoterpenes measurements. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2(3), 361-376.
- Beddows, D. C. S., Dall'Osto, M., Harrison, R. M., Kulmala, M., Asmi, A., Wiedensohler, A., et al. (2013). Variations in tropospheric submicron particle size distributions across the European continent 2008-2009. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, 11(13), 31197-31249.
- Cusack, M., Alastuey, A., Querol, X. (2013). Case studies of new particle formation and evaporation processes in the western Mediterranean regional background. *Atmospheric Environment*, 81, 651 – 659.
- Empa (2013). Technischer Bericht zum Nationalen Beobachtungsnetz für Luftfremdstoffe (NABEL). Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Empa). Verfügbar unter <http://www.empa.ch/nabel>.
- Kanawade, V. P., Jobson, B. T., Guenther, A. B., Erupe, M. E., Pressley, S. N., Tripathi, S. N., et al. (2011). Isoprene suppression of new particle formation in a mixed deciduous forest. *Atmos. Chem. Phys.*, 11, S. 6013-6027.
- Kiendler-Scharr, A., Wildt, J., Dal Maso, M., Hohaus, T., Kleist, E., Mentel, T. F., et al. (2009). New particle formation in forests inhibited by isoprene emissions. *Nature*, 461.
- Kroll, J. H., Ng, N. L., Murphy, S. M., Flagan, R. C., & Seinfeld, J. H. (2005). Secondary organic aerosol formation from isoprene photooxidation under high-NOX conditions. *Geophysical research letters*, 32.
- Reche, C., Querol, X., Alastuey, A., Viana, M., Pey, J., Moreno, T., et al. (2011). New considerations for PM, Black Carbon and particle number concentration for air quality monitoring across different European cities. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 11(13), S. 6207-6227.
- WHO. (2013). Review of evidence on health aspects of air pollution – REVIHAAP. First results. Bericht für die Weltgesundheitsorganisation WHO.

8 Anhang

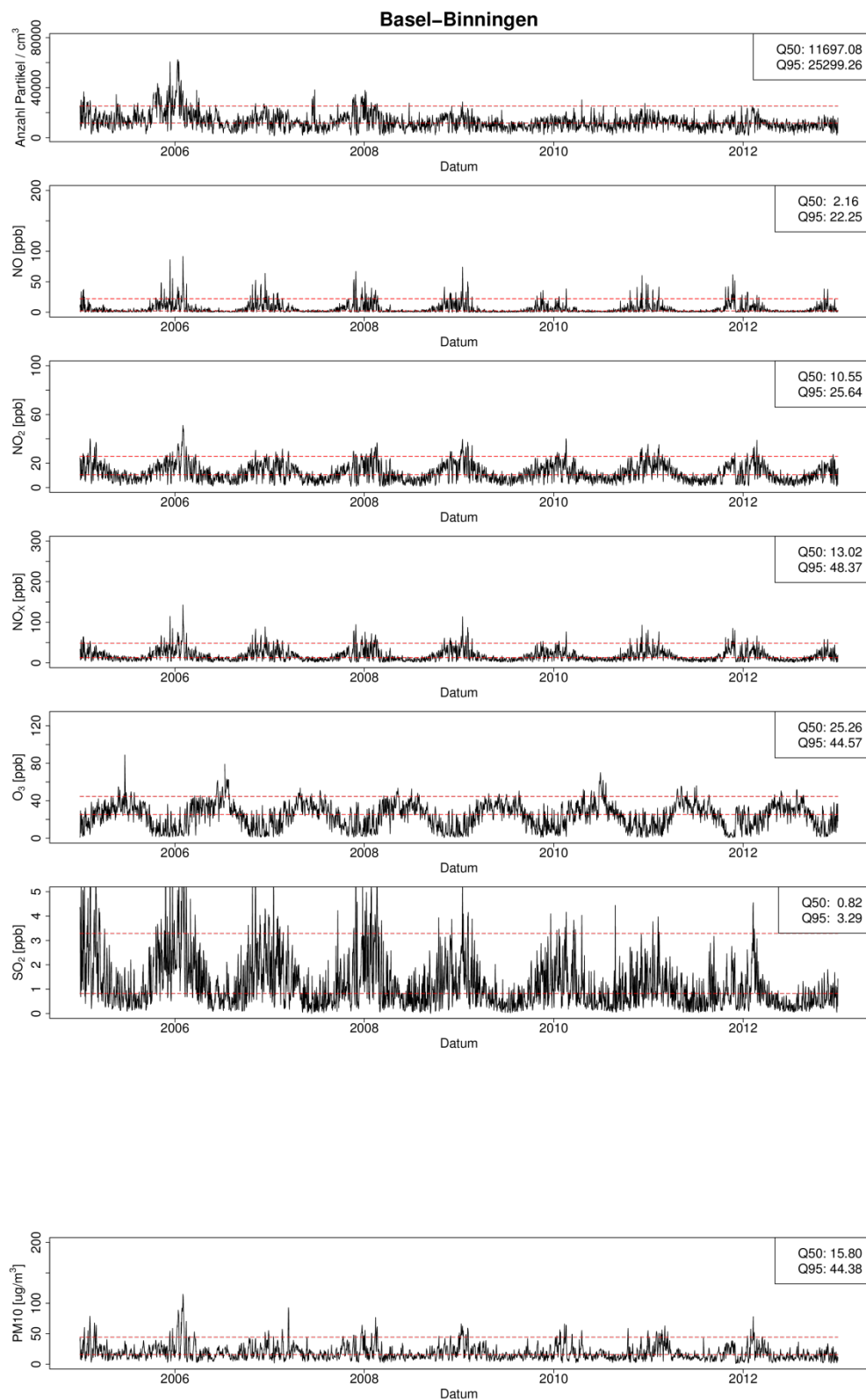


Abbildung A1: Zeitreihen (Tagesmittelwerte) der Konzentrationen von Partikelanzahlkonzentration, NO, NO₂, NO_x, O₃, SO₂ und PM10 an der Station Basel-Binningen. Q50 und Q95 bezeichnen das 50%- bzw. das 95%-Quantil.

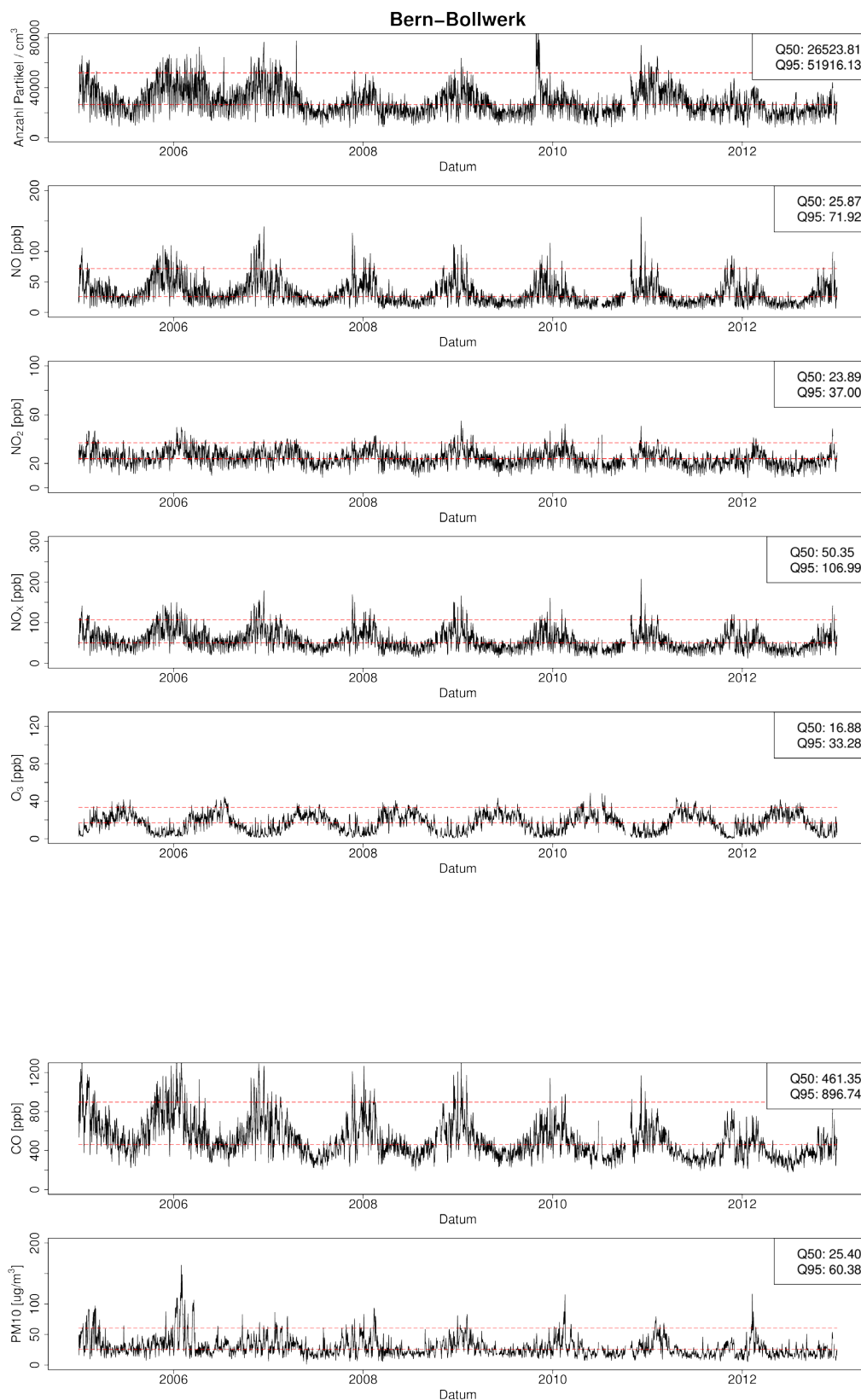


Abbildung A2: Zeitreihen (Tagesmittelwerte) der Konzentrationen von Partikelanzahlkonzentration, NO, NO₂, NO_x, O₃, CO und PM10 an der Station Bern-Bollwerk. Q50 und Q95 bezeichnen das 50%- bzw. das 95%-Quantil.

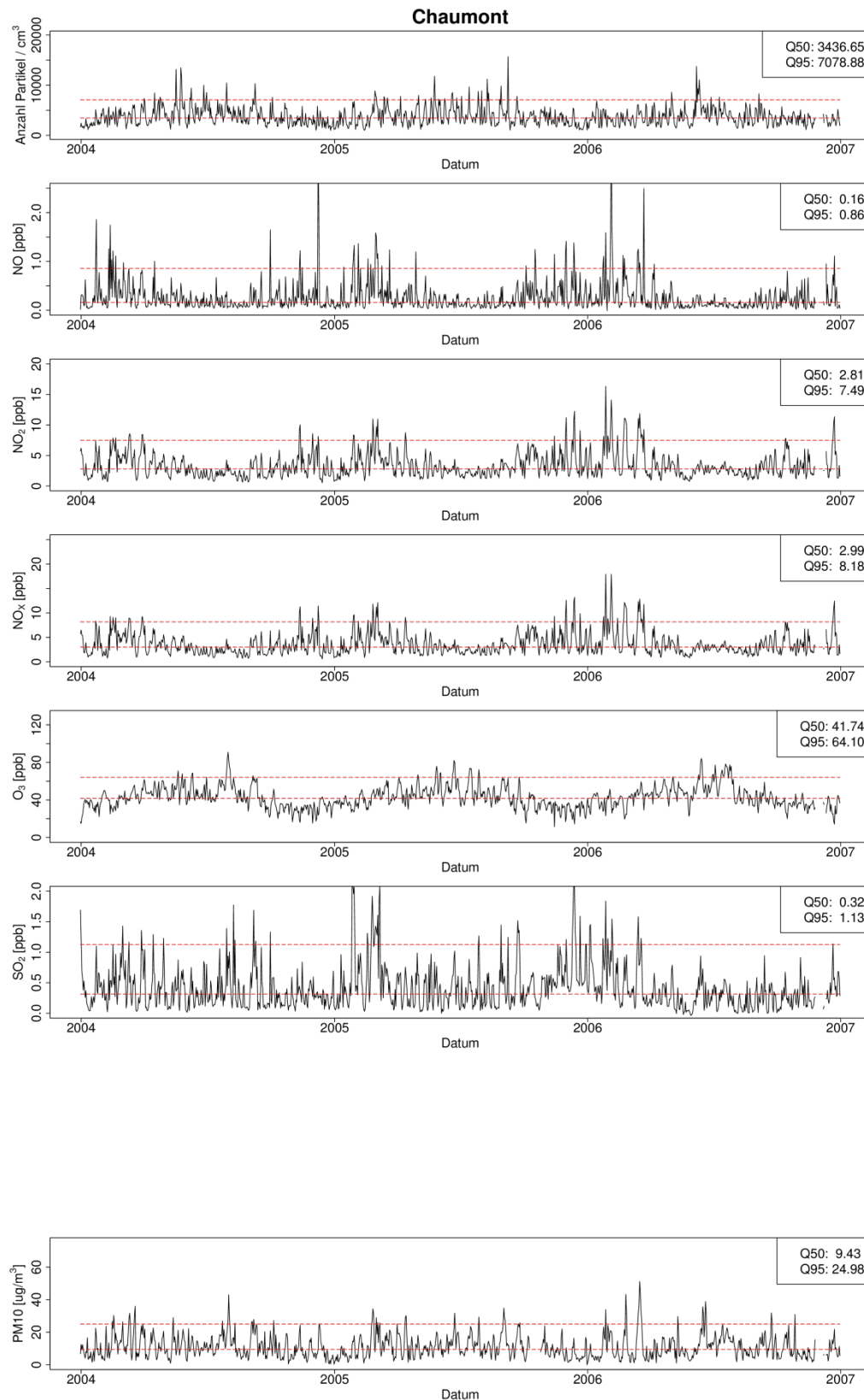


Abbildung A3: Zeitreihen (Tagesmittelwerte) der Konzentrationen von Partikelanzahlkonzentration, NO, NO₂, NO_x, O₃, SO₂ und PM10 an der Station Chaumont. Q50 und Q95 bezeichnen das 50%- bzw. das 95%-Quantil.

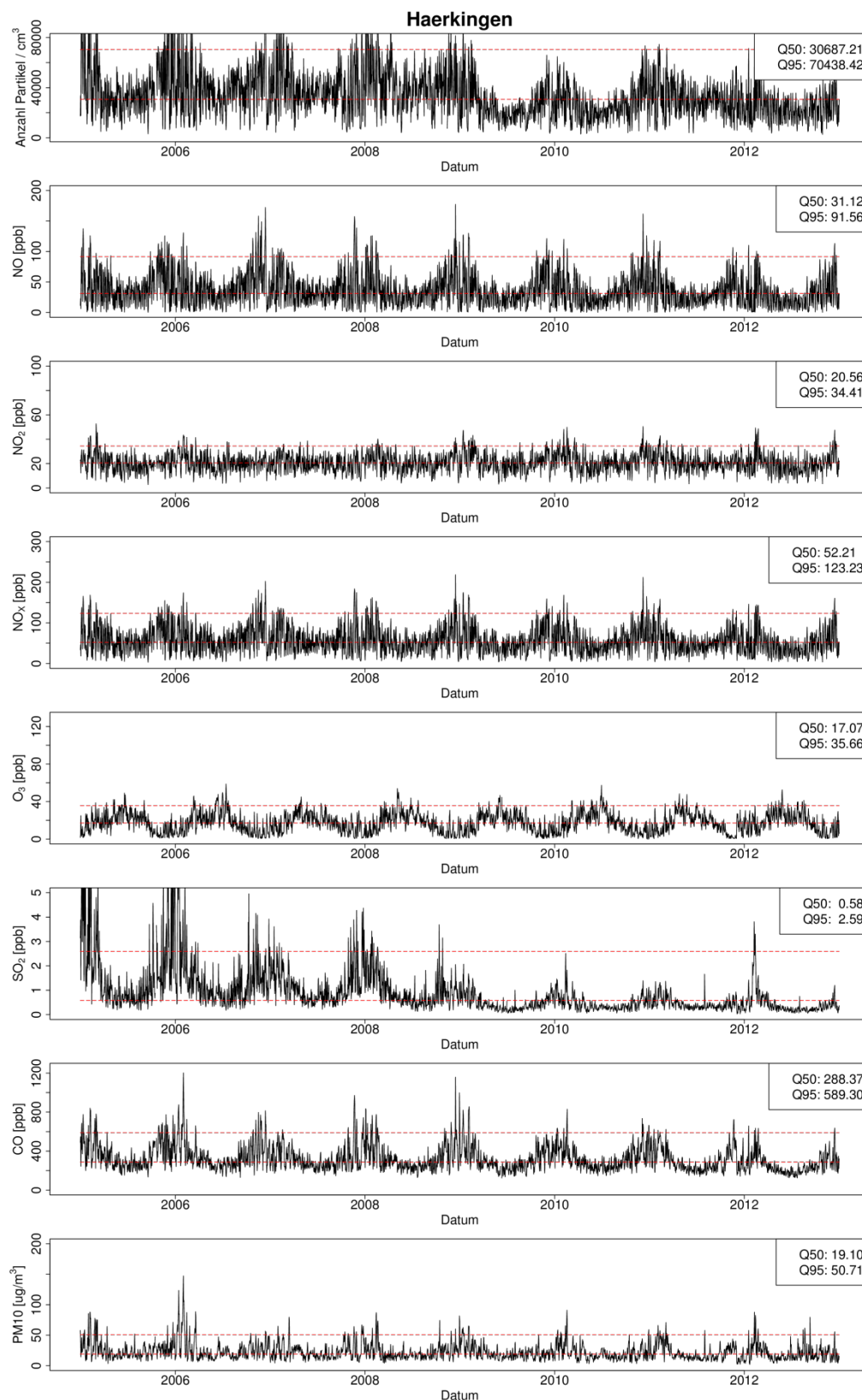


Abbildung A4: Zeitreihen (Tagesmittelwerte) der Konzentrationen von Partikelanzahlkonzentration, NO, NO₂, NO_x, O₃, SO₂, CO und PM10 an der Station Härkingen. Q50 und Q95 bezeichnen das 50%- bzw. das 95%-Quantil.

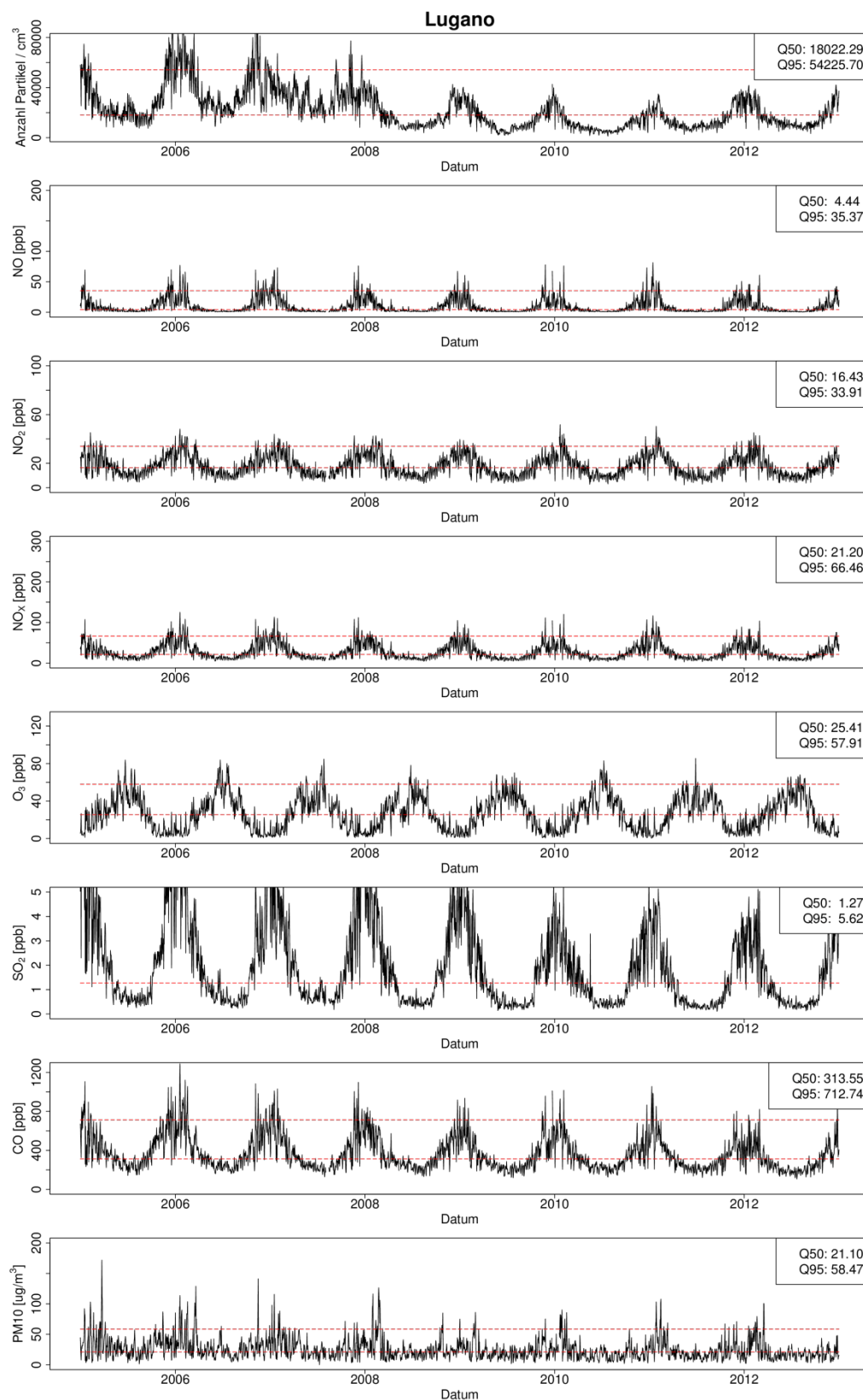


Abbildung A5: Zeitreihen (Tagesmittelwerte) der Konzentrationen von Partikelanzahlkonzentration, NO, NO₂, NO_x, O₃, SO₂, CO und PM10 an der Station Lugano. Q50 und Q95 bezeichnen das 50%- bzw. das 95%-Quantil.

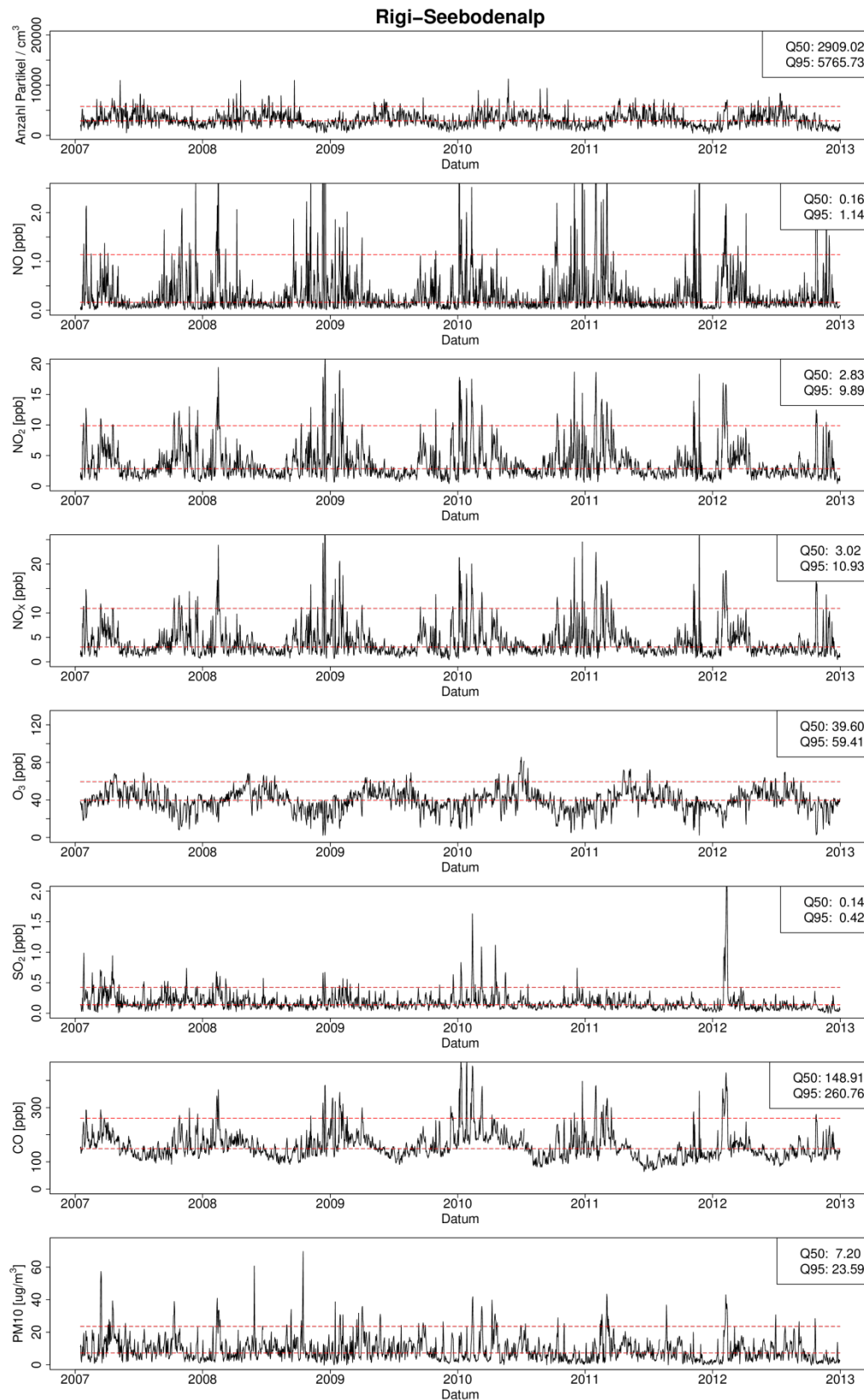


Abbildung A6: Zeitreihen (Tagesmittelwerte) der Konzentrationen von Partikelanzahlkonzentration, NO, NO₂, NO_x, O₃, SO₂, CO und PM10 an der Station Rigi-Seebodenalp. Q50 und Q95 bezeichnen das 50%- bzw. das 95%-Quantil.

Tabelle A.1: Zehn Minuten Mittelwerte von Luftschadstoffen und meteorologischen Grössen an der Station Rigi-Seebodenalp während drei der identifizierten Ereignisse mit extremen Partikelanzahlkonzentrationen (siehe Abschnitt 4.3).

Jahr	Monat	Tag	Stunde	Minute	WR [°]	WG [m/s]	T [°C]	SO ₂ [ppb]	NO _x [ppb]	NO ₂ [ppb]	NO [ppb]	O ₃ [ppb]	CO [ppb]	PNC [1/cm ³]
2008	9	20	13	20	358	1.8	9.0	0.29	6.10	5.58	0.53	35.0	151.0	4895
2008	9	20	13	30	334	2.0	8.4	0.25	6.09	5.58	0.52	34.7	151.8	5134
2008	9	20	13	40	354	2.2	9.0	0.25	6.01	5.57	0.44	35.4	152.4	5169
2008	9	20	13	50	347	1.9	8.4	0.26	6.03	5.62	0.41	35.5	151.8	5111
2008	9	20	14	0	2	2.3	8.6	0.25	6.00	5.60	0.40	35.2	150.7	4782
2008	9	20	14	10	0	2.4	9.1	0.23	5.96	5.53	0.43	35.7	150.1	4679
2008	9	20	14	20	1	1.2	9.1	0.23	6.02	5.55	0.47	34.1	152.8	4518
2008	9	20	14	30	24	1.1	9.0	0.24	5.88	5.39	0.50	34.5	152.5	4395
2008	9	20	14	40	50	1.2	9.8	0.22	5.64	5.09	0.55	35.5	187.2	28458
2008	9	20	14	50	57	1.3	9.4	0.21	5.53	5.10	0.42	35.9	491.4	494029
2008	9	20	15	0	8	1.2	9.9	0.17	5.38	5.04	0.35	36.8	158.8	31887
2008	9	20	15	10	70	1.5	9.7	0.15	5.42	5.07	0.35	36.8	218.4	311944
2008	9	20	15	20	66	2.5	10.0	0.15	5.37	4.98	0.39	37.7	276.0	16676
2008	9	20	15	30	74	3.3	9.9	0.16	5.58	5.13	0.45	37.9	482.5	43508
2008	9	20	15	40	74	2.7	9.4	0.16	5.75	5.27	0.48	37.4	323.2	66559
2008	9	20	15	50	66	2.4	9.9	0.15	5.25	4.90	0.35	38.1	144.7	4525
2008	9	20	16	0	67	3.1	9.8	0.20	5.07	4.76	0.31	39.8	140.8	4527
2008	9	20	16	10	77	2.5	9.8	0.21	5.07	4.83	0.25	39.0	138.9	4783
2009	9	24	11	40	342	1.0	13.8	0.13	6.85	6.01	0.85	31.5	224.3	2246
2009	9	24	11	50	343	1.4	13.3	0.11	7.22	6.34	0.88	31.2	230.4	2182
2009	9	24	12	0	38	1.1	14.6	0.12	8.38	7.11	1.27	33.4	233.1	2322
2009	9	24	12	10	72	2.0	14.5	0.17	12.42	9.45	2.98	28.2	255.2	2535
2009	9	24	12	20	67	1.8	14.7	0.19	13.30	9.76	3.54	27.7	255.7	2614
2009	9	24	12	30	55	2.1	15.6	0.17	13.72	10.19	3.54	25.5	257.8	2631
2009	9	24	12	40	57	1.4	15.5	0.17	14.08	10.81	3.28	25.0	377.4	97322
2009	9	24	12	50	45	1.4	15.6	0.18	14.03	10.88	3.15	28.1	545.6	219303
2009	9	24	13	0	340	1.6	14.6	0.17	15.84	12.47	3.38	24.5	929.2	371843
2009	9	24	13	10	351	1.4	14.6	0.15	14.38	11.90	2.47	25.1	268.9	30453
2009	9	24	13	20	4	1.5	13.8	0.16	14.41	12.35	2.06	25.6	290.8	9760
2009	9	24	13	30	68	1.4	15.1	0.14	13.30	10.69	2.61	28.7	258.7	2605
2009	9	24	13	40	58	1.4	15.0	0.19	12.69	10.01	2.68	29.9	258.3	2589
2009	9	24	13	50	328	1.2	14.7	0.14	12.11	10.03	2.09	28.0	257.2	2755
2009	9	24	14	0	326	1.2	13.5	0.14	12.12	10.67	1.45	29.8	256.5	2651
2009	9	24	14	10	300	0.7	13.3	0.13	12.45	10.69	1.76	30.9	255.7	2692
2009	9	24	14	20	329	1.3	14.0	0.14	12.58	11.04	1.55	29.8	259.7	2800
2009	9	24	14	30	39	0.6	13.7	0.14	12.64	10.87	1.77	31.0	258.4	2807
2010	9	14	12	40	266	0.7	11.9	0.21	2.63	2.23	0.40	38.0	98.1	2390
2010	9	14	12	50	308	1.3	12.8	0.17	2.40	2.07	0.33	36.0	101.3	2357
2010	9	14	13	0	301	1.3	11.7	0.15	2.28	1.98	0.30	36.1	96.1	2335
2010	9	14	13	10	247	0.9	12.0	0.14	1.86	1.63	0.23	39.1	91.7	2035
2010	9	14	13	20	275	1.1	13.0	0.15	1.32	1.21	0.11	41.6	92.3	1770
2010	9	14	13	30	307	1.5	13.0	0.17	1.90	1.64	0.25	38.8	97.9	2417
2010	9	14	13	40	295	0.5	13.1	0.17	2.38	1.97	0.42	36.0	100.9	2815
2010	9	14	13	50	316	1.3	13.7	0.15	3.48	2.83	0.65	33.4	104.6	3481
2010	9	14	14	0	280	0.3	12.5	0.21	3.69	2.97	0.72	32.8	137.5	79072
2010	9	14	14	10	341	0.4	12.8	0.19	3.85	3.13	0.72	31.7	1267.3	316381
2010	9	14	14	20	294	0.9	12.9	0.17	3.52	2.78	0.73	34.0	354.5	254868
2010	9	14	14	30	295	0.7	13.5	0.13	3.03	2.37	0.66	35.1	146.8	65823
2010	9	14	14	40	326	2.0	14.6	0.17	2.42	1.97	0.45	38.2	104.0	59561
2010	9	14	14	50	13	1.0	15.1	0.17	2.21	1.87	0.34	40.2	103.5	2940
2010	9	14	15	0	301	1.1	13.9	0.18	2.66	2.19	0.47	38.5	105.7	3519
2010	9	14	15	10	314	1.6	14.0	0.18	3.22	2.63	0.59	37.9	110.3	12088
2010	9	14	15	20	301	0.8	13.6	0.19	3.42	2.77	0.65	38.4	951.7	167991
2010	9	14	15	30	291	1.1	13.9	0.18	3.07	2.53	0.54	38.3	110.3	4107
2010	9	14	15	40	301	1.7	14.4	0.16	2.52	2.13	0.39	40.6	103.4	3265