

Chemische Zusammensetzung von PM_{2.5}

Untersuchungen an ausgewählten NABEL-Standorten

Messbericht

Im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU)

Christoph Hüglin, Empa, Abteilung für Luftfremdstoffe und Umwelttechnik

Dübendorf, 05.12.2014

Messbericht: **Chemische Zusammensetzung von PM2.5**

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

Autoren: Christoph Hüglin

Mitarbeit durch: Andrea Fischer, Claudia Zellweger, Elisabeth Wettstein

Begleitung BAFU: Richard Ballaman, Rudolf Weber

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

Kontakt: christoph.hueglin@empa.ch

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung und Zusammenfassung	4
2	Messungen und Datenauswertung.....	5
2.1	Messstationen.....	5
2.2	PM2.5-Proben.....	6
2.3	Analytische Methoden	7
2.3.1	Ionenchromatographie für wasserlösliche Ionen	7
2.3.2	Thermisch-optische Bestimmung von elementarem und organischem Kohlenstoff.....	7
3	Ergebnisse	8
3.1	Jahresmittelwerte	8
4	Literatur	13
5	Anhang	14

1 Einleitung und Zusammenfassung

Die Belastung der Luft mit Feinstäuben ist eines der gegenwärtig drängenden lufthygienischen Probleme. In den Untersuchungen und Diskussionen über die gesundheitliche Gefährdung durch Feinstaub ist in den letzten Jahren die Feinstaubfraktion PM_{2.5} immer stärker ins Blickfeld gerückt (EKL 2013, REVIHAAP 2013). Im Zusammenhang mit den aktuellen Diskussionen über PM_{2.5} ist es notwendig, ausreichende Informationen sowohl über die Belastung, als auch über die chemische Zusammensetzung von PM_{2.5} in der Schweiz zu haben. Während Messungen der PM_{2.5}-Konzentration generelle Informationen über die Feinstaubbelastung in der Schweiz liefern, können Kenntnisse der chemischen Zusammensetzung die Planung von Massnahmen zur Reduktion von Feinstaub unterstützen und eine Abschätzung des Erfolges von eingeleiteten Reduktionsmassnahmen ermöglichen. Im Rahmen des NABEL werden seit 1998 Messungen von PM_{2.5} an ausgewählten Standorten durchgeführt (Fischer und Hüglin 2014). Die letzte systematische Untersuchung der chemischen Zusammensetzung von PM_{2.5} wurde jedoch an Proben von April 1998 bis März 1999 durchgeführt (Hueglin, Gehrig et al. 2005), und beschreibt damit einen Zustand, der ca. 15 Jahre zurückliegt.

Im Rahmen der hier vorliegenden Arbeit wurden die Hauptbestandteile von PM_{2.5} bestimmt, welches in der Zeit von Dezember 2013 bis November 2013 an fünf Standorten in der Schweiz an jedem vierten Tag gesammelt wurde (91 analysierte PM_{2.5}-Proben pro Standort). Die gewählten Standorte repräsentieren dabei typische Belastungssituationen in Städten und auf dem Land. Dieser Messbericht gibt deshalb eine aktualisierte Übersicht über die chemische Zusammensetzung von PM_{2.5} in der Schweiz.

Die aktuellen Messungen zeigen, dass PM_{2.5} in der Schweiz zu einem überwiegenden Anteil aus Bestandteilen besteht, welche in der Atmosphäre durch chemische Umwandlung aus gasförmigen Verbindungen gebildet werden (sekundäres PM_{2.5}, siehe Abbildung 1). Dieses sekundäre PM_{2.5}, das durch die Inhaltstoffe Ammonium (NH₄⁺), Nitrat (NO₃⁻), Sulfat (SO₄²⁻) und der Summe aller organischen Verbindungen (organic matter, OM) repräsentiert wird, trägt im jährlichen Mittel am städtischen und verkehrsbelasteten Standort (Bern-Bollwerk) 66%, an den anderen Standorten 75% - 78% zur gesamten Massenkonzentration von PM_{2.5} bei. Die relativ langsame Bildung der sekundären Bestandteile aus den gasförmigen Vorläufern führt auf regionaler Skala zu einer vergleichsweise homogenen räumlichen Verteilung von PM_{2.5}. Die Unterschiede der PM_{2.5}-Belastung zwischen Städten und ländlichem Raum sind entsprechend klein.

Am städtischen und verkehrsbelasteten Standort (Bern-Bollwerk) wurden im jährlichen Mittel (17.8 µg/m³) um 3.2 – 5.5 µg/m³ höhere Konzentrationen von PM_{2.5} als an den anderen Messstationen gemessen. Dieser Unterschied in der Konzentration von PM_{2.5} ist auf höhere Beiträge durch direkt vom Strassenverkehr emittiertes PM_{2.5} zu erklären. Entsprechend weist der städtische und verkehrsbelastete Standort erhöhte Anteile von elementarem Kohlenstoff (EC) und OM auf.

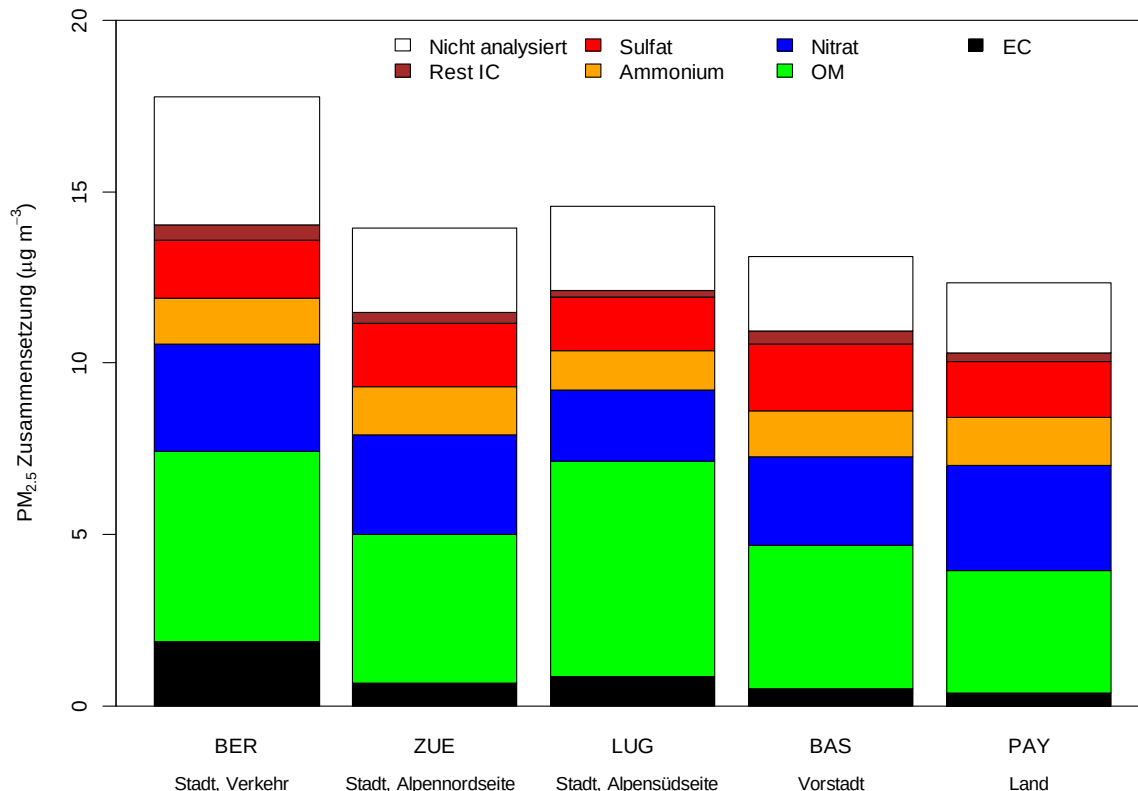


Abbildung 1: Mittlere chemische Zusammensetzung von PM_{2.5} (Mittelwerte vom 03.12.2012 – 28.11.2013) an fünf NABEL-Messstationen, welche verschiedene Belastungssituationen in der Schweiz repräsentieren. Im Rahmen dieses Projektes wurden die Konzentrationen von elementarem Kohlenstoff (EC), organischen Verbindungen (OM), Nitrat, Ammonium, Sulfat sowie den wasserlöslichen Ionen Cl^- , Na^+ , K^+ , Ca^{2+} und Mg^{2+} (zusammengefasst als „Rest IC“) bestimmt. Ein Anteil von ungefähr 20% der Masse von PM_{2.5} konnte mit den angewendeten Analysemethoden nicht bestimmt werden (als „Nicht analysiert“ gekennzeichnet). Eine entsprechende Abbildung für die relativen Anteile der analysierten Inhaltstoffe findet sich im Anhang (Abbildung A.1).

2 Messungen und Datenauswertung

2.1 Messstationen

Die Feinstaubproben (PM_{2.5}) wurden an jedem vierten Tag während eines Jahres (vom 03. Dezember 2012 bis 28. November 2013) an fünf Messstationen des Nationalen Beobachtungsnetzes für Luftfremdstoffe (NABEL) während 24 Stunden gesammelt und anschliessend bezüglich Masse und chemischer Zusammensetzung untersucht. Die gewählten Messstationen decken unterschiedliche Belastungssituationen ab: Die Messstation Bern-Bollwerk (BER) ist ein städtischer und stark verkehrsbelasteter Standort (Bollwerk, ca. 20'000 – 25'000 Fahrzeuge pro Tag), die Messstationen Zürich-Kaserne (ZUE) und Lugano-Università sind städtische, nicht direkt verkehrsexponierte Standorte, die Messstation Basel-Binningen (BAS) repräsentiert einen vorstädtischen Standorttyp, mit der Messstation Payerne (PAY) wurde schliesslich ein ländlicher Standort im schweizerischen Mittelland berücksichtigt (Abbildung 2).

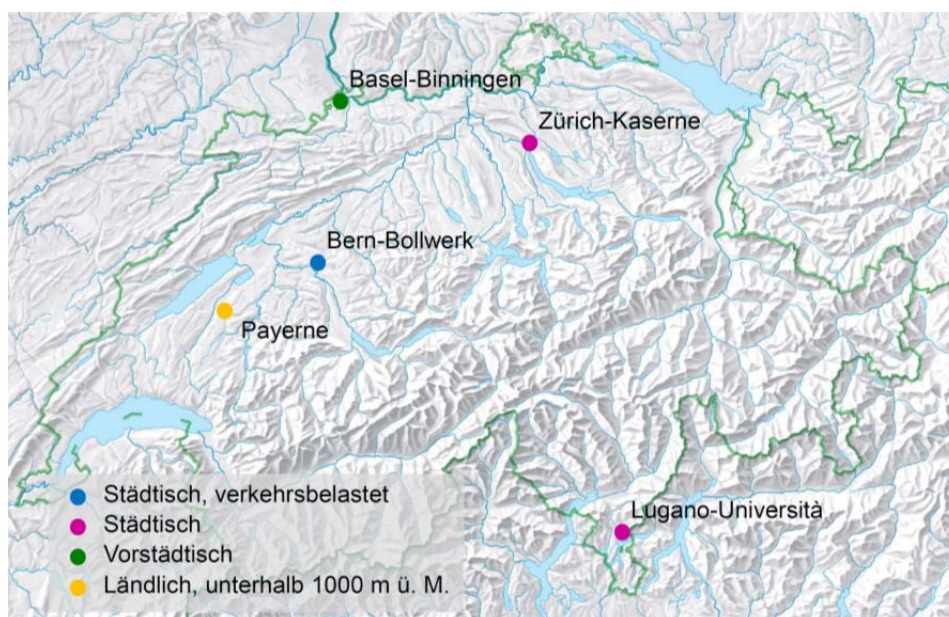


Abbildung 2: Karte der Schweiz mit der Lage und dem Standorttyp der in dieser Studie berücksichtigten Messstationen (Reliefkarte: © swisstopo).

2.2 PM2.5-Proben

Die Feinstaubproben (PM2.5) wurden während 24 Stunden mit einem High-Volume Sammler (Digitel DA-80H) bei einem Probevolumen von 720 m³ pro Tag gesammelt. Dabei wurden Quarzfaserfilter vom Typ Pallflex Tissuquartz QAT-2500-UP verwendet. Die Filter verblieben während 14 Tagen im High-Volume Sammler auf der Messstation.

Die Masse der auf den Quarzfaserfilter abgeschiedenen Feinstaubpartikel wurde mit einem zur Referenzmethode (EN12341 2014) äquivalenten Verfahren bestimmt und die mittlere Massenkonzentration von PM2.5 berechnet. Nach der Wägung der PM2.5-Proben wurden diese in einem Gefrierschrank bei -18°C gelagert.

Messstation	Stationstyp	Messperiode	Anzahl PM2.5 - Proben
Basel-Binningen	Vorstädtisch	3 Dez. 12 - 28 Nov. 13	91
Bern-Bollwerk	Stadt, verkehrsbelastet	3 Dez. 12 - 28 Nov. 13	90 ^a
Lugano-Universität	Ländlich, südlich der Alpen	3 Dez. 12 - 28 Nov. 13	91
Payerne	Ländlich, unterhalb 1000 m ü. M.	3 Dez. 12 - 28 Nov. 13	91
Zürich-Kaserne	Städtisch	3 Dez. 12 - 28 Nov. 13	91

^a PM2.5-Filter vom 20.11.2013 wurde als Ausreisser verworfen.

Tabelle 1: Übersicht über die Messstationen, zugehörige Stationstypen, Messperiode und die Anzahl der in diesem Projekt durchgeführten Analysen von PM2.5-Proben.

2.3 Analytische Methoden

2.3.1 Ionenchromatographie für wasserlösliche Ionen

Die Konzentration von wasserlöslichen Anionen (Cl^- , NO_3^- und SO_4^{2-}) und Kationen (Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} und NH_4^+) wurde mit einem Ionenchromatographen (Dionex ICS 3000) gemessen. Es wurden runde Teilstücke mit 2.5 cm Durchmesser (3.2% der gesamten belegten Filterfläche) ausgestanzt und in 40 ml Reinstwasser während ca. 15 Stunden eluiert. Zur Kalibration des Ionenchromatographen wurden Standardlösungen verwendet, welche auch im Rahmen des Nationalen Beobachtungsnetz für Luftfremdstoffe (NABEL) für die Bestimmung von Anionen und Kationen in Regenproben eingesetzt werden. Details zu den Standardlösungen und der angewendeten Analyseverfahren finden sich im Technischen Bericht des NABEL (Empa 2013).

2.3.2 Thermisch-optische Bestimmung von elementarem und organischem Kohlenstoff

Elementarer und organischer Kohlenstoff (elemental and organic carbon, EC und OC) sind chemisch nicht eindeutig definierte Messgrößen (Andreae and Gelencser 2006). Die Konzentrationswerte hängen dadurch vom verwendeten Messverfahren ab.

In diesem Projekt wurde die thermisch-optische Methode zur Bestimmung von EC und OC eingesetzt (CEN/TR16243 2011). Dazu wurde ein Teilstück eines PM2.5-Filters (1.5 cm² Fläche) stufenweise aufgeheizt und dabei kontinuierlich mit Licht der Wellenlänge $\lambda = 680$ nm durchleuchtet. Das Aufheizen des Filters erfolgt zunächst unter einer Heliumatmosphäre, es werden dabei die organischen Feinstaubkomponenten in die Gasphase gebracht, durch einen MnO_2 -Ofen geleitet und in CO_2 umgewandelt. Anschliessend wird das CO_2 mit H_2 gemischt und durch einen Nickel-Katalysator geleitet, wobei das CO_2 zu CH_4 reduziert wird. Das CH_4 wird mit einem Flammenionisationsdetektor (FID) quantitativ gemessen und so die Kohlenstoffmenge bestimmt. In einem anschliessenden zweiten Analyseschritt wird das Filterstück unter einer oxidierenden Atmosphäre (He/O_2) erneut aufgeheizt, die restlichen Kohlenstoffverbindungen werden dabei verbrannt und schliesslich als CH_4 gemessen.

In einer ersten Approximation kann die Kohlenstoffmenge, welche beim ersten Analyseschritt freigesetzt wird, als OC interpretiert werden, die beim zweiten Analyseschritt gemessene Kohlenstoffmenge kann als EC aufgefasst werden. Während des ersten Analyseschrittes unter der inerten Heliumatmosphäre können jedoch organische Kohlenstoffkomponenten in EC umgewandelt werden (Pyrolyse). Aufgrund der Messung der Transmission des Lichtes durch das Filter während der Analyse kann die Menge des pyrolysierten Kohlenstoffes bestimmt und dem OC zugerechnet werden. Ohne diese sogenannte Pyrolysekorrektur wird OC unterschätzt und EC entsprechend überschätzt.

Die Wahl der während der Analyse eingestellten Temperaturniveaus hat einen deutlichen Einfluss auf die Messwerte. Als Temperaturprotokoll wurde das sogenannte EUSAAR-2-Protokoll verwendet (Cavalli, Viana et al. 2010), welches in Europa weit verbreitet angewendet wird. Bei der Interpretation der gemessenen OC-Konzentrationen sollte berücksichtigt werden, dass die angewendete PM2.5-Sammelverfahren nicht für die quantitative Bestimmung von OC ausgelegt ist. Während dem Sammeln von PM2.5 sowie bei der Konditionierung der Filter kann es sowohl zur Verflüchtigung, wie auch zur Adsorption von organischen Verbindungen kommen (negative und positive Artefakte). Die Grösse des resultierenden Fehlers ist nicht bekannt.

Die Massenkonzentration der organischen Verbindungen (organic matter, OM) wurde durch Multiplikation des gemessenen OC mit einem Faktor 1.6 abgeschätzt ($OM = 1.6 \cdot OC$). Mit dieser Skalierung wird die nicht erfasste Masse der Heteroatome, insbesondere Sauerstoff und Stickstoff, berücksichtigt. Der verwendete Faktor von 1.6 wurde von (Turpin und Lim 2001) für städtische Standorte vorgeschlagen und wird häufig verwendet. Allerdings können die OM/OC-Verhältnisse für verschiedene Standorte, Jahres- und Tageszeiten variieren (im Winter tiefere Faktoren als im Sommer). In der Literatur wurden z.B. für Winter Werte zwischen 1.29 und 1.85 abgeschätzt, im Sommer lagen die Werte zwischen 1.8 und 1.95 (Simon, Bhawe et al. 2011). Für stark oxidierte organische Aerosole kann das OM/OC Verhältnis auch deutlich höher sein (Aiken, Decarlo et al. 2008).

3 Ergebnisse

3.1 Jahresmittelwerte

In Tabelle 2 sind die Jahresmittelwerte von PM_{2.5} und den analysierten Hauptbestandteilen von PM_{2.5} aufgelistet. Diese Jahresmittelwerte wurden als arithmetisches Mittel der Konzentrationen in den insgesamt 454 untersuchten Filterproben aus der Zeit vom 03.12.2012 – 28.11.2013 bestimmt (Tabelle 1). Abbildung 2 zeigt die mittlere jährliche Zusammensetzung von PM_{2.5} an den fünf berücksichtigten Messstationen in Form von Kuchendiagrammen. Ungefähr 20% der Masse von PM_{2.5} wurde mit den in diesem Projekt eingesetzten Analysemethoden nicht erfasst. Dieser als „Nicht analysiert“ bezeichnete Anteil ist zu einem Grossteil auf Wasser zurückzuführen, welches in den Feinstaubpartikeln gebunden ist. Darüber hinaus tragen mineralischen Verbindungen und andere Spurenelemente zur nicht analysierten Masse von PM_{2.5} bei (Hueglin, Gehrig et al. 2005). An der städtischen und verkehrsbelasteten Messstation Bern-Bollwerk ist der nicht analysierte Anteil am grössten ($3.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ bzw. 21.0%). Dies deutet darauf hin, dass an diesem Standort auch Beiträge von Abriebspartikel des lokalen Strassenverkehrs zur PM_{2.5}-Belastung beitragen.

Stationstyp	Stadt, Verkehr		Stadt		Stadt		Vorstadt		Land	
Messstation	Bern-Bollwerk		Zürich-Kaserne		Lugano-Università		Basel-Binningen		Payerne	
	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	%	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	%	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	%	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	%	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	%
PM _{2.5}	17.8	100%	13.9	100%	14.6	100%	13.1	100%	12.3	100%
EC	1.9	10.7%	0.7	4.8%	0.9	6.0%	0.5	4.1%	0.4	3.2%
OM	5.5	31.1%	4.4	31.3%	6.3	43.1%	4.2	31.8%	3.6	28.9%
NO ₃ ⁻	3.1	17.7%	2.9	20.7%	2.1	14.2%	2.6	19.6%	3.0	24.7%
NH ₄ ⁺	1.3	7.5%	1.4	10.2%	1.2	8.0%	1.3	10.2%	1.4	11.5%
SO ₄ ²⁻	1.7	9.4%	1.8	13.2%	1.5	10.6%	1.9	14.8%	1.6	13.1%
Cl ⁻ , Na ⁺ , K ⁺ , Ca ²⁺ , Mg ²⁺	0.5	2.6%	0.3	2.4%	0.2	1.3%	0.4	2.7%	0.3	2.1%
Nicht analysiert	3.7	21.0%	2.4	17.5%	2.5	16.9%	2.2	16.7%	2.1	16.6%

Tabelle 2: Mittlere jährliche Konzentration von PM_{2.5} und den gemessenen Inhaltsstoffen in PM_{2.5} an den verschiedenen Messstationen.

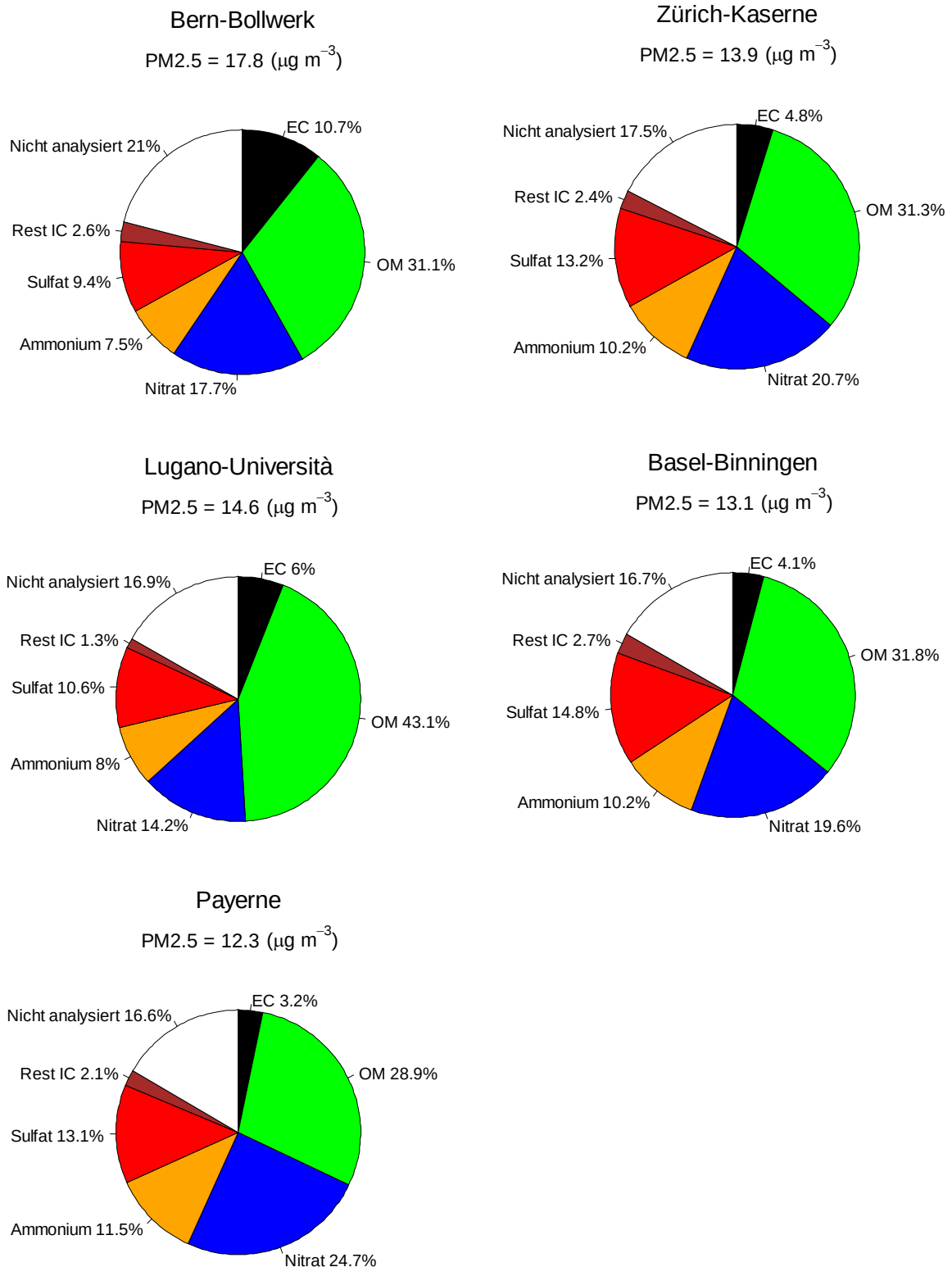


Abbildung 3: Kuchendiagramme der mittleren jährlichen Zusammensetzung von PM2.5 an fünf NABEL-Messstationen (siehe Tabelle 1 für Informationen zum Typ der Messstationen). Der mit „Rest IC“ bezeichnete Anteil im PM2.5 kennzeichnet die Summe der Konzentrationen der restlichen wasserlöslichen Ionen Cl^- , Na^+ , K^+ , Ca^{2+} und Mg^{2+} .

Es ist in Tabelle 2 sowie in Abbildung 3 gut erkennbar, dass die Jahresmittelwerte von PM_{2.5} an allen Messstationen über dem von der EKL vorgeschlagenen Jahresgrenzwert von 10 µg/m³ liegen (EKL 2013). Die Unterschiede zwischen ländlichem (Payerne), vorstädtischem (Basel-Binningen) und städtischem Standort (Zürich-Kaserne) auf der Alpennordseite sind jedoch relativ klein (siehe auch die mehrjährigen Verläufe in Fischer und Hüglin, 2014). Dies lässt sich dadurch erklären, dass ein sehr grosser Anteil von PM_{2.5} erst in der Atmosphäre durch chemische Umwandlung von gasförmigen Vorläuferverbindungen gebildet wird (sekundäres PM_{2.5}). Die Bildung von sekundärem PM_{2.5} benötigt einige Zeit und findet nicht direkt am Ort der Emissionen der Vorläuferverbindungen statt. Dies führt auf regionaler Skala zu einer recht gleichmässigen räumlichen Verteilung von PM_{2.5} und entsprechend hohen Korrelationen zwischen den PM_{2.5}-Tagesmittelwerten von den verschiedenen Messstationen (Abbildung A.2 im Anhang). Die leicht höhere mittlere Massenkonzentration von PM_{2.5} im städtischen gegenüber dem ländlichen Raum kann durch etwas höhere Konzentrationen von elementarem Kohlenstoff EC und organischen Feinstaubbestandteilen (OM), sowie sehr wahrscheinlich von mineralischen Verbindungen und Spurenelementen, erklärt werden. EC ist ein Bestandteil von primärem PM_{2.5} und wird durch unvollständige Verbrennungsprozesse direkt in die Atmosphäre freigesetzt. OM wird dagegen sowohl direkt emittiert, als auch durch sekundäre Prozesse erst in der Atmosphäre gebildet. Die in diesem Projekt nicht gemessenen mineralischen und andere Elemente werden ebenfalls dem primären PM_{2.5} zugeordnet und können zur erhöhten PM_{2.5}-Belastung im städtischen Raum beitragen.

Die Summe der sekundären anorganischen Bestandteile NH₄⁺, NO₃⁻ und SO₄²⁻ machen einen grossen Anteil von PM_{2.5} in der Schweiz aus. Im jährlichen Mittel tragen diese drei Verbindungen zwischen 33% (Lugano-Università) und 49% (Payerne) zur Masse von PM_{2.5} bei. An den Messstationen auf der Alpennordseite (Basel-Binningen, Bern-Bollwerk, Payerne, Zürich-Kaserne) beträgt die mittlere Konzentration der Summe von NH₄⁺, NO₃⁻ und SO₄²⁻ zwischen 5.9 und 6.1 µg/m³ und ist somit an diesen Stationen praktisch gleich. Wie oben erwähnt lässt sich die homogene räumliche Verteilung von sekundären Feinstaubbestandteilen auf regionaler Skala durch die Zeitdauer der Bildungsprozesse in der Atmosphäre erklären. Auf der Alpensüdseite ist die Konzentration von NH₄⁺, NO₃⁻ und SO₄²⁻ deutlich tiefer (Jahresmittelwert von 4.8 µg/m³ an der Station Lugano-Università). Ein vergleichbarer Unterschied in der chemischen Zusammensetzung von Feinstaub zwischen der Alpennord- und Alpensüdseite wurde bereits in einer Studie für PM₁₀ festgestellt, bei der Filterproben aus den Jahren 2008 und 2009 umfassend chemisch charakterisiert wurden (Hüglin, Gianini et al. 2013). In dieser früheren Studie über PM₁₀ wurden Feinstaubproben von den gleichen Messstationen der Alpennordseite untersucht, die Alpensüdseite wurde jedoch nicht durch Lugano-Università sondern durch die ländliche Messstation Magadino-Cadenazzo repräsentiert.

Ein weiterer Unterschied in der chemischen Zusammensetzung an der Station Lugano-Università gegenüber den Messstationen auf der Alpennordseite betrifft den Anteil von organischen Feinstaubbestandteilen. An der Station Lugano-Università ist OM sowohl absolut als auch relativ deutlich höher als an den anderen Messstationen nördlich der Alpen. Auch dieses Ergebnis deckt sich mit den Untersuchungen der PM₁₀-Proben aus den Jahren 2008 und 2009 (Hüglin, Gianini et al. 2013).

Der Anteil von elementarem Kohlenstoff zeigt eine Abhängigkeit vom Stationstyp: Die EC-Konzentration ist am städtischen und verkehrsbelasteten Standort am höchsten (Bern-

Bollwerk EC=1.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) und nimmt vom städtischen zum vorstädtischen und ländlichen Standort graduell ab (Payerne EC=0.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$).

In Tabelle 3 ist die mittlere chemische Zusammensetzung von PM_{2.5} für die verschiedenen Jahreszeiten aufgelistet. Es ist gut erkennbar, dass im Sommer der Nitratanteil aufgrund der geringen thermischen Stabilität von NH_4NO_3 vernachlässigbar ist. Ebenfalls gut erkennbar ist, dass der im Jahresmittel hohe Anteil von organischen Feinstaubbestandteilen an der Messstation Lugano-Università hauptsächlich auf erhöhte Konzentrationen während der kalten Jahreszeit zurückzuführen ist. Im Frühling und Sommer sind die Konzentrationen von OM an der Station Lugano-Università mit den Konzentrationen an den Standorten der Alpennordseite vergleichbar.

Im Anhang finden sich weitere Abbildungen sowie Zeitreihen der gemessenen Tagesmittelwerte von PM_{2.5} und der Inhaltstoffe von PM_{2.5} an den in dieser Studie berücksichtigten Messstationen während der Zeit vom 03.12.2012 – 28.11.2013.

DJF										
Stationstyp	Stadt, Verkehr		Stadt		Stadt		Vorstadt		Land	
Messstation	Bern-Bollwerk		Zürich-Kaserne		Lugano-Universität		Basel		Payerne	
	µg/m ³	%	µg/m ³	%	µg/m ³	%	µg/m ³	%	µg/m ³	%
PM2.5	23.0	100%	16.4	100%	21.2	100%	16.5	100%	14.6	100%
EC	2.0	8.9%	0.7	4.3%	1.3	5.9%	0.6	3.9%	0.5	3.1%
OM	6.9	30.0%	4.6	28.2%	10.1	47.6%	5.2	31.5%	4.0	27.0%
NO ₃ ⁻	5.0	21.9%	4.3	26.1%	3.8	17.9%	3.8	22.7%	4.2	28.7%
NH ₄ ⁺	2.0	8.6%	1.9	11.6%	1.6	7.6%	1.7	10.5%	1.8	12.2%
SO ₄ ²⁻	2.2	9.5%	2.3	14.0%	1.5	7.1%	2.3	13.9%	1.8	12.4%
Cl ⁻ , Na ⁺ , K ⁺ , Ca ²⁺ , Mg ²⁺	0.6	2.7%	0.5	2.9%	0.3	1.4%	0.5	2.8%	0.3	2.3%
Nicht analysiert	4.2	18.3%	2.1	13.0%	2.7	12.6%	2.4	14.7%	2.1	14.3%

MAM										
Stationstyp	Stadt, Verkehr		Stadt		Stadt		Vorstadt		Land	
Messstation	Bern-Bollwerk		Zürich-Kaserne		Lugano-Universität		Basel		Payerne	
	µg/m ³	%	µg/m ³	%	µg/m ³	%	µg/m ³	%	µg/m ³	%
PM2.5	21.6	100%	17.9	100%	13.6	100%	17.5	100%	18.1	100%
EC	1.9	8.7%	0.6	3.5%	0.8	5.8%	0.5	3.0%	0.4	2.2%
OM	5.7	26.5%	4.8	26.7%	5.3	38.8%	4.6	26.4%	4.1	22.4%
NO ₃ ⁻	5.4	25.0%	5.1	28.2%	2.5	18.4%	4.9	28.2%	6.3	34.7%
NH ₄ ⁺	2.1	9.7%	2.2	12.2%	1.2	8.6%	2.2	12.4%	2.5	13.8%
SO ₄ ²⁻	2.0	9.5%	2.1	12.0%	1.3	9.9%	2.3	13.4%	2.2	12.1%
Cl ⁻ , Na ⁺ , K ⁺ , Ca ²⁺ , Mg ²⁺	0.5	2.3%	0.3	1.9%	0.2	1.2%	0.3	1.9%	0.3	1.6%
Nicht analysiert	4.0	18.3%	2.8	15.5%	2.3	17.2%	2.6	14.8%	2.4	13.1%

JJA										
Stationstyp	Stadt, Verkehr		Stadt		Stadt		Vorstadt		Land	
Messstation	Bern-Bollwerk		Zürich-Kaserne		Lugano-Universität		Basel		Payerne	
	µg/m ³	%	µg/m ³	%	µg/m ³	%	µg/m ³	%	µg/m ³	%
PM2.5	13.8	100%	10.6	100%	10.6	100%	9.6	100%	9.0	100%
EC	1.9	13.9%	0.6	5.2%	0.5	4.3%	0.4	3.8%	0.3	3.4%
OM	5.3	38.6%	4.4	41.5%	4.2	39.6%	3.8	39.2%	3.6	40.4%
NO ₃ ⁻	0.2	1.2%	0.1	1.0%	0.1	0.5%	0.1	1.4%	0.1	0.8%
NH ₄ ⁺	0.5	3.4%	0.6	5.8%	0.9	8.0%	0.7	6.9%	0.6	6.6%
SO ₄ ²⁻	1.3	9.5%	1.6	15.4%	2.0	19.3%	1.8	18.6%	1.5	16.2%
Cl ⁻ , Na ⁺ , K ⁺ , Ca ²⁺ , Mg ²⁺	0.4	2.8%	0.3	2.7%	0.1	1.1%	0.3	3.3%	0.2	2.0%
Nicht analysiert	4.2	30.6%	3.0	28.4%	2.9	27.3%	2.6	26.8%	2.8	30.7%

SON										
Stationstyp	Stadt, Verkehr		Stadt		Stadt		Vorstadt		Land	
Messstation	Bern-Bollwerk		Zürich-Kaserne		Lugano-Universität		Basel		Payerne	
	µg/m ³	%	µg/m ³	%	µg/m ³	%	µg/m ³	%	µg/m ³	%
PM2.5	13.1	100%	10.5	100%	12.8	100%	9.0	100%	8.4	100%
EC	1.8	13.6%	0.8	7.2%	1.0	7.7%	0.6	6.9%	0.4	5.1%
OM	4.3	32.8%	3.6	34.2%	5.5	43.2%	3.2	35.1%	2.7	32.3%
NO ₃ ⁻	2.1	16.2%	1.9	18.3%	1.9	14.9%	1.5	16.7%	2.0	23.8%
NH ₄ ⁺	0.9	6.6%	0.9	8.7%	1.0	7.9%	0.8	9.1%	0.9	10.9%
SO ₄ ²⁻	1.1	8.8%	1.3	11.9%	1.3	10.2%	1.4	15.3%	1.1	12.8%
Cl ⁻ , Na ⁺ , K ⁺ , Ca ²⁺ , Mg ²⁺	0.4	2.9%	0.3	2.4%	0.2	1.3%	0.3	3.7%	0.2	2.7%
Nicht analysiert	2.5	19.2%	1.8	17.4%	1.9	14.8%	1.2	13.3%	1.0	12.3%

Tabelle 3: Mittlere chemische Zusammensetzung von PM2.5 getrennt nach Jahreszeiten (DJF = Dezember 2012 – Februar 2013; MAM = März 2013 – Mai 2013; JJA= Juni 2013 – August 2013; SON = September 2013 – November 2013).

4 Literatur

Aiken, A. C., P. F. Decarlo, J. H. Kroll, D. R. Worsnop, J. A. Huffman, K. S. Docherty, I. M. Ulbrich, C. Mohr, J. R. Kimmel, D. Sueper, Y. Sun, Q. Zhang, A. Trimborn, M. Northway, P. J. Ziemann, M. R. Canagaratna, T. B. Onasch, M. R. Alfarra, A. S. H. Prevot, J. Dommen, J. Duplissy, A. Metzger, U. Baltensperger and J. L. Jimenez (2008). "O/C and OM/OC ratios of primary, secondary, and ambient organic aerosols with high-resolution time-of-flight aerosol mass spectrometry." Environmental Science & Technology **42**(12): 4478-4485.

Andreae, M. O. and A. Gelencser (2006). "Black carbon or brown carbon? The nature of light-absorbing carbonaceous aerosols." Atmospheric Chemistry and Physics **6**: 3131-3148.

Cavalli, F., M. Viana, K. E. Yttri, J. Genberg and J.-P. Putaud (2010). "Toward a standardised thermal-optical protocol for measuring atmospheric organic and elemental carbon: the EUSAAR protocol." Atmospheric Measurement Techniques **3**(1): 79-89.

CEN/TR16243 (2011). Ambient air quality — Guide for the measurement of elemental carbon (EC) and organic carbon (OC) deposited on filters. Technical Report. Brussels (Belgium), European Committee for Standardization.

EKL (2013). Feinstaub in der Schweiz - Statusbericht der Eidgenössischen Kommission für Lufthygiene (EKL). Bern: 63 S.

Empa (2013). Technischer Bericht zum Nationalen Beobachtungsnetz für Luftfremdstoffe (NABEL). Dübendorf, Empa.

EN12341 (2014). Ambient air - Standard gravimetric measurement method for the determination of the PM₁₀ or PM_{2,5} mass concentration of suspended particulate matter. Brussels (Belgium), European Committee for Standardization.

Fischer, A. and C. Hüglin (2014). Zusätzliche Partikelmessungen im NABEL. Bericht über die Messungen 2013. Dübendorf, Eidg. Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Empa).

Hueglin, C., R. Gehrig, U. Baltensperger, M. Gysel, C. Monn and H. Vonmont (2005). "Chemical characterisation of PM_{2.5}, PM₁₀ and coarse particles at urban, near-city and rural sites in Switzerland." Atmospheric Environment **39**(4): 637-651.

Hüglin, C., M. Gianini and R. Gehrig (2013). Chemische Zusammensetzung und Quellen von Feinstaub. Untersuchungen an ausgewählten NABEL-Standorten. Schlussbericht.

REVIHAAP (2013). Review of evidence on health aspects of air pollution – REVIHAAP. First results. Copenhagen (Denmark), World Health Organization (WHO).

Simon, H., P. V. Bhave, J. L. Swall, N. H. Frank and W. C. Malm (2011). "Determining the spatial and seasonal variability in OM/OC ratios across the US using multiple regression." Atmospheric Chemistry and Physics **11**(6): 2933-2949.

Turpin, B. J. and H.-J. Lim (2001). "Species Contributions to PM_{2.5} Mass Concentrations: Revisiting Common Assumptions for Estimating Organic Mass." Aerosol Science and Technology **35**(1): 602 - 610.

5 Anhang

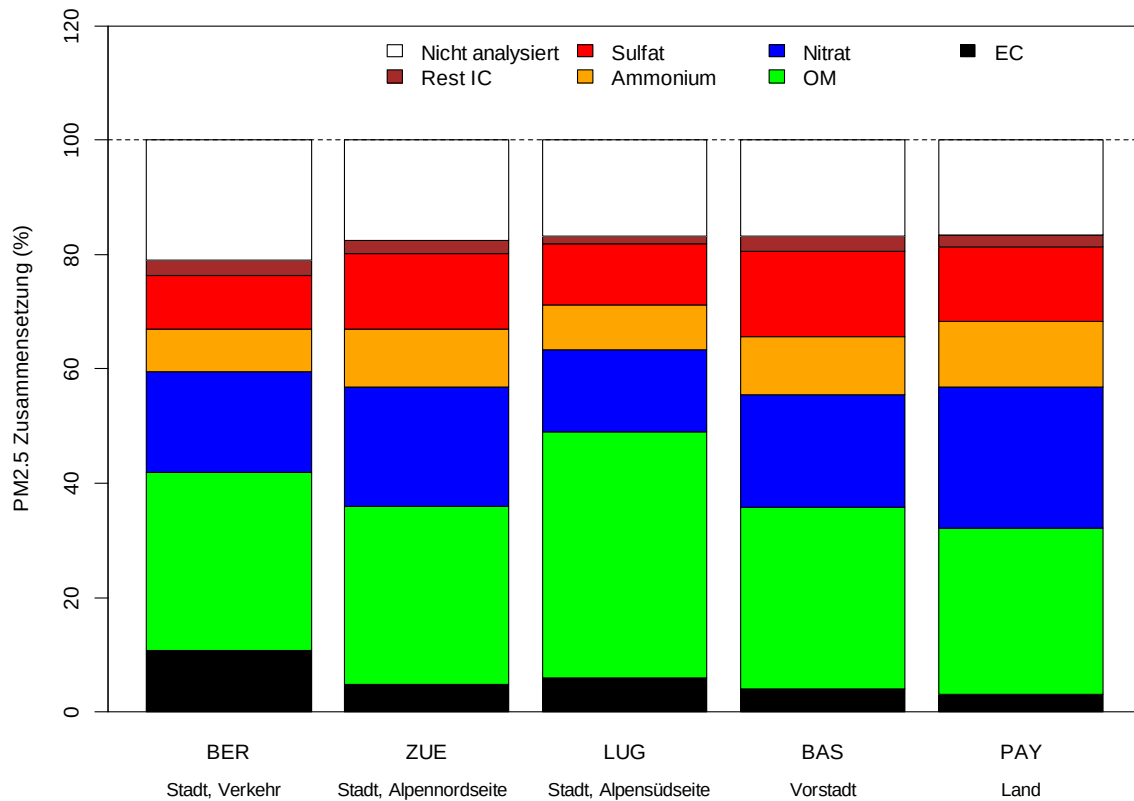


Abb. A.1: Mittlere prozentuale Zusammensetzung von PM_{2.5} (Mittelwerte vom 03.12.2012 – 28.11.2013) an fünf NABEL-Messstationen, welche verschiedene Belastungssituationen in der Schweiz repräsentieren. Es wurden die Konzentrationen von elementarem Kohlenstoff (EC), organischen Verbindungen (OM), Nitrat, Ammonium, Sulfat sowie den wasserlöslichen Ionen Cl^- , Na^+ , K^+ , Ca^{2+} und Mg^{2+} (zusammengefasst als „Rest IC“) bestimmt. Ein Anteil von ungefähr 20% der Masse von PM_{2.5} konnte mit den angewendeten Analysemethoden nicht bestimmt werden (als „Nicht analysiert“ gekennzeichnet).

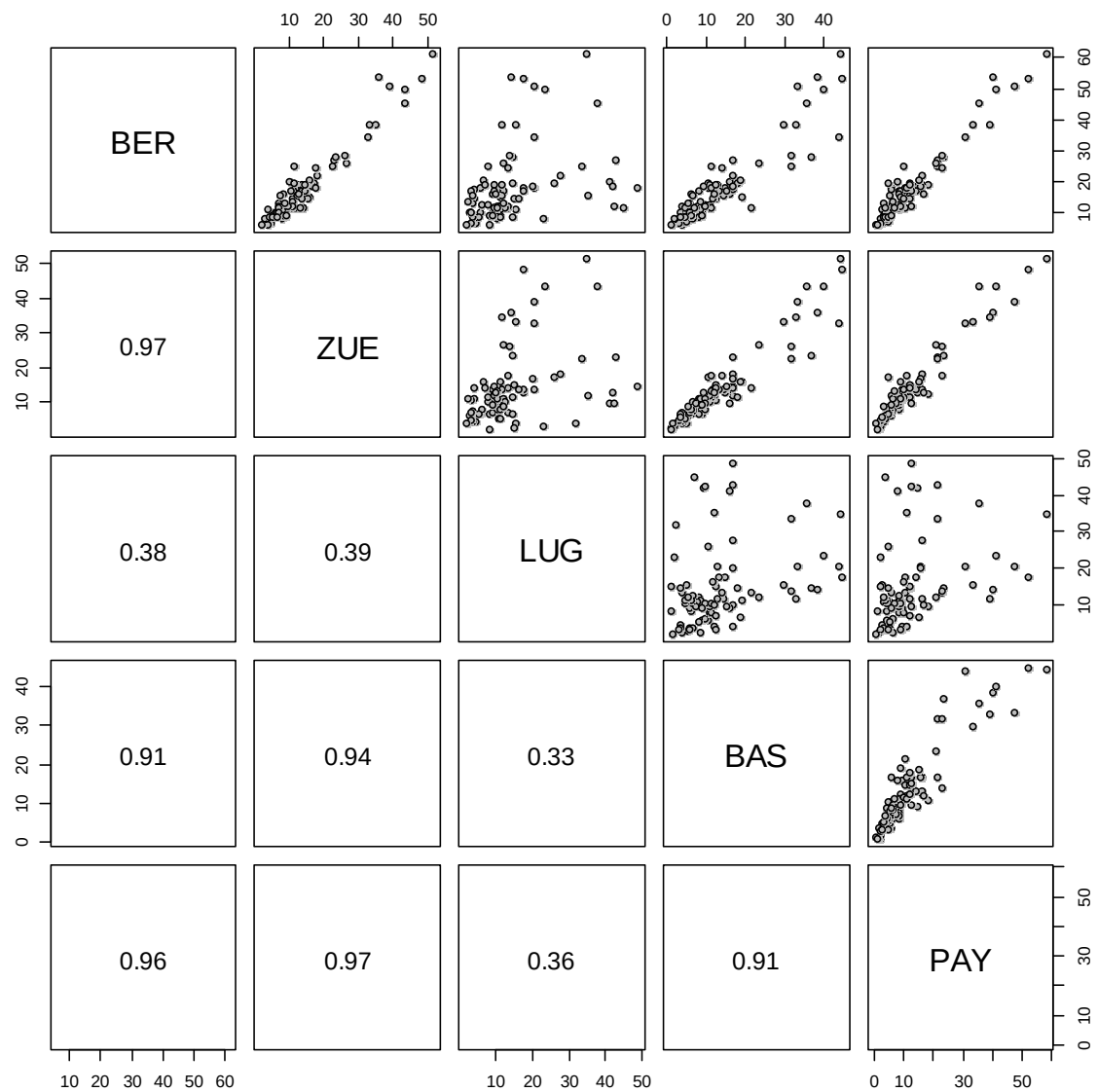


Abb. A.2: Paarweise Streudiagramme der Tagesmittelwerte von PM_{2.5} während der Zeit vom 03.12.2012 – 28.11.2013 (BER = Bern-Bollwerk, ZUE = Zürich-Kaserne, LUG = Lugano-Universität, BAS = Basel-Binningen, PAY = Payerne; Einheit der x- und y-Achse ist $\mu\text{g}/\text{m}^3$). Die Zahlen in den Zellen unterhalb der Diagonalen geben den Pearson-Korrelationskoeffizienten des jeweiligen Stations-Paares an.

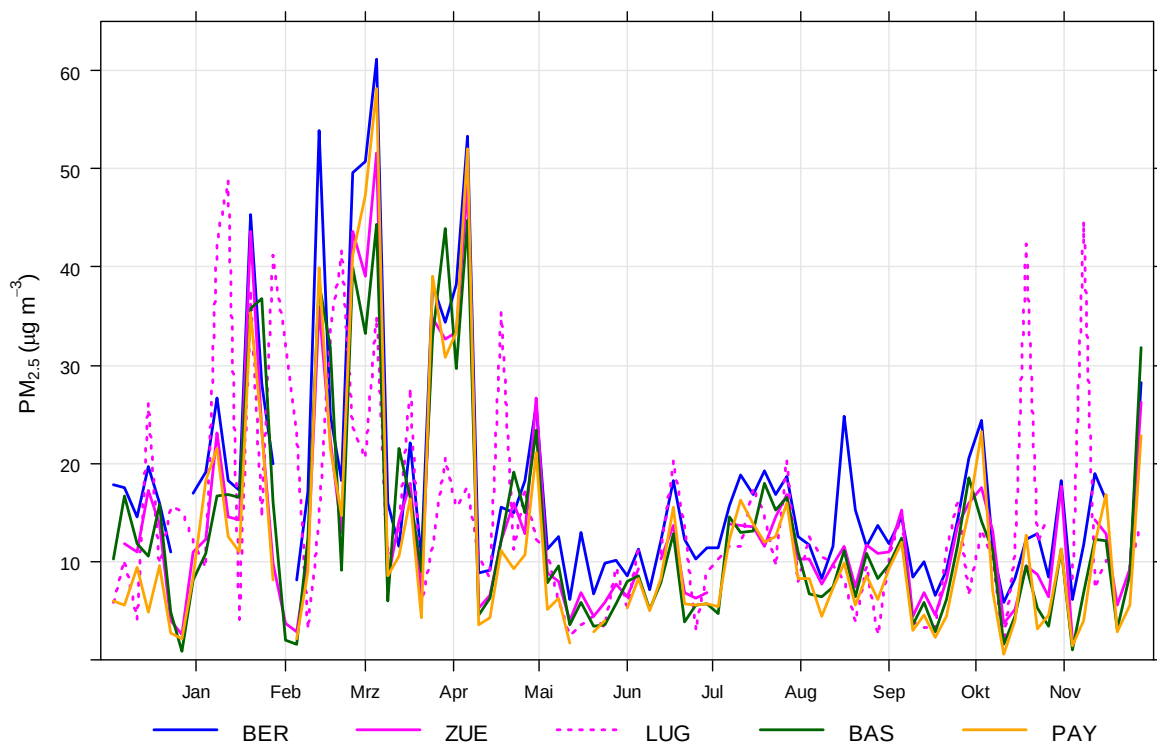


Abb. A.3: Verlauf der Massenkonzentration von PM_{2.5} (Tagesmittelwert) der in dieser Studie untersuchten Filterproben. Es ist gut erkennbar, dass die PM_{2.5}-Belastungen an den Stationen Basel-Binningen (BAS), Payerne (PAY) und Zürich-Kaserne (ZUE) parallel auf einem sehr ähnlichen Niveau verlaufen. Am städtischen, verkehrsbelasteten Standort Bern-Bollwerk (BER) sind die PM_{2.5}-Tagesmittelwerte höher als an den Stationen BAS, PAY und ZUE. Am städtischen Standort auf der Alpensüdseite (Lugano-Universität, LUG) kann ein anderer zeitlicher Verlauf von PM_{2.5} als auf der Alpen-nordseite beobachtet werden, da die Alpen ein Hindernis für die Strömung der Luftmassen darstellen.

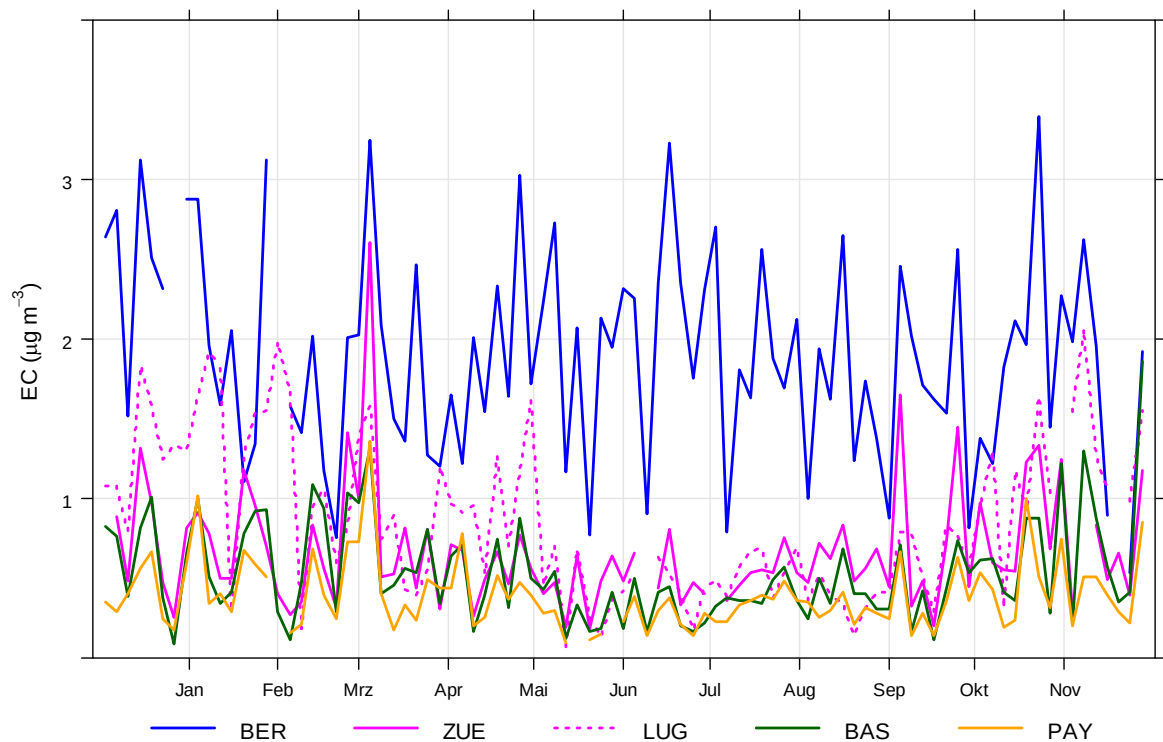


Abb. A.4: Verlauf der Tagesmittelwerte von elementarem Kohlenstoff (EC) im PM2.5 vom Dezember 2012 bis Ende November 2013 an den in dieser Studie berücksichtigten Messstationen (siehe Tab. 1).

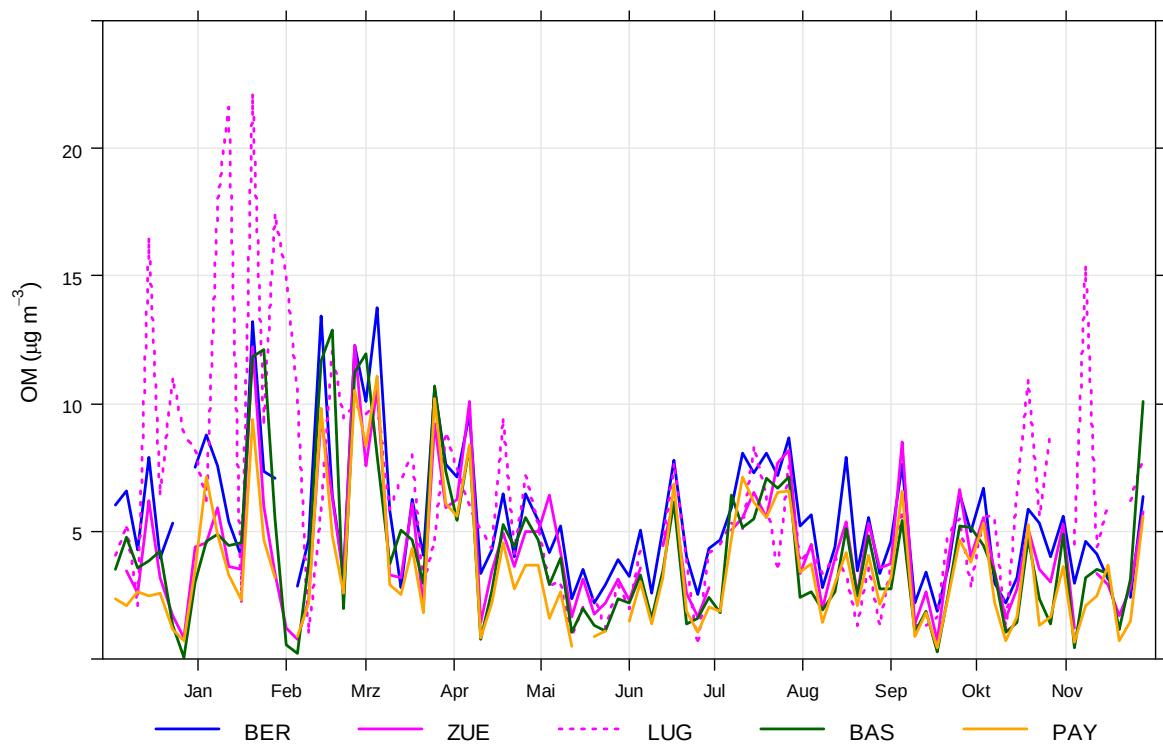


Abb. A.5: Verlauf der Tagesmittelwerte von organischen Bestandteilen (OM) im PM2.5 vom Dezember 2012 bis Ende November 2013 an den in dieser Studie berücksichtigten Messstationen (siehe Tab. 1).

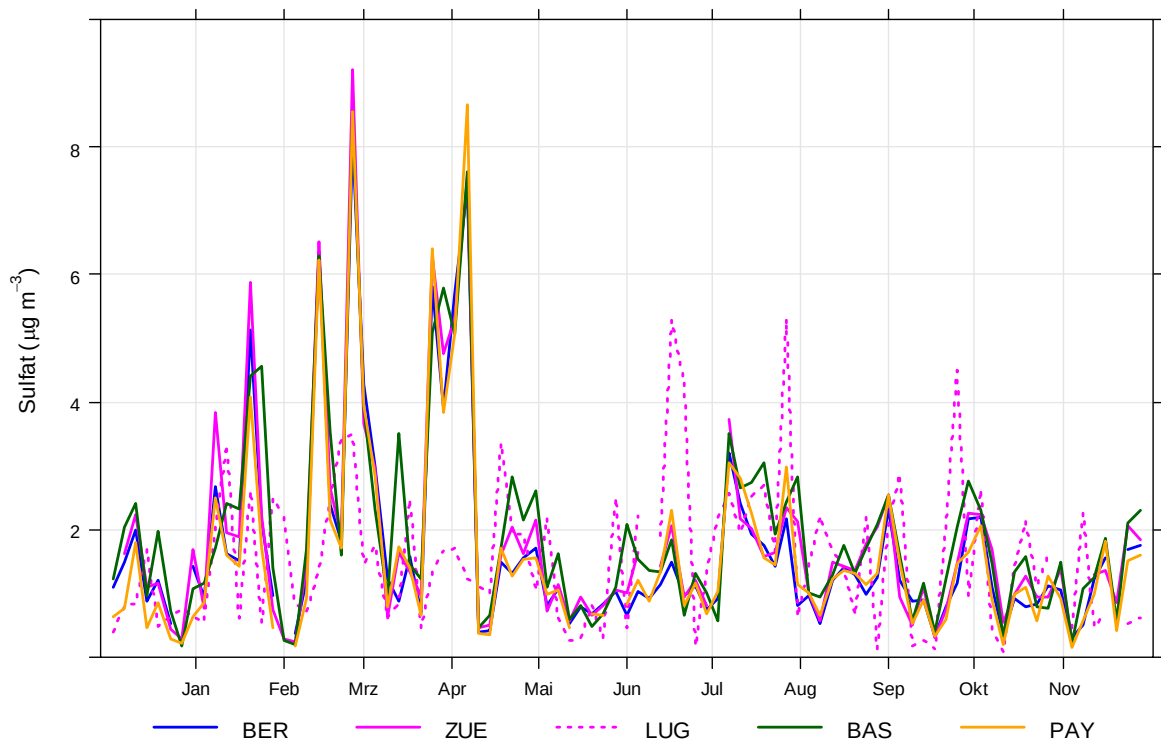


Abb. A.6: Verlauf der Tagesmittelwerte von Sulfat im PM_{2.5} vom Dezember 2012 bis Ende November 2013 an den in dieser Studie berücksichtigten Messstationen (siehe Tab. 1).

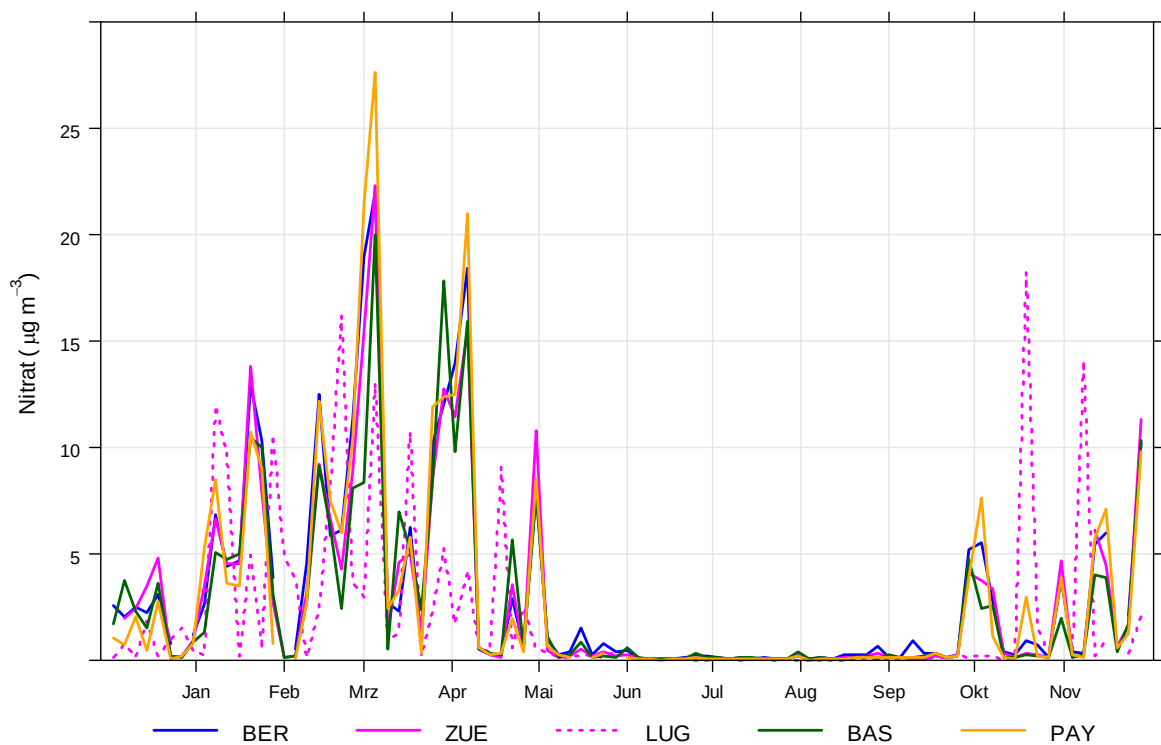


Abb. A.7: Verlauf der Tagesmittelwerte von Sulfat im PM_{2.5} vom Dezember 2012 bis Ende November 2013 an den in dieser Studie berücksichtigten Messstationen (siehe Tab. 1).

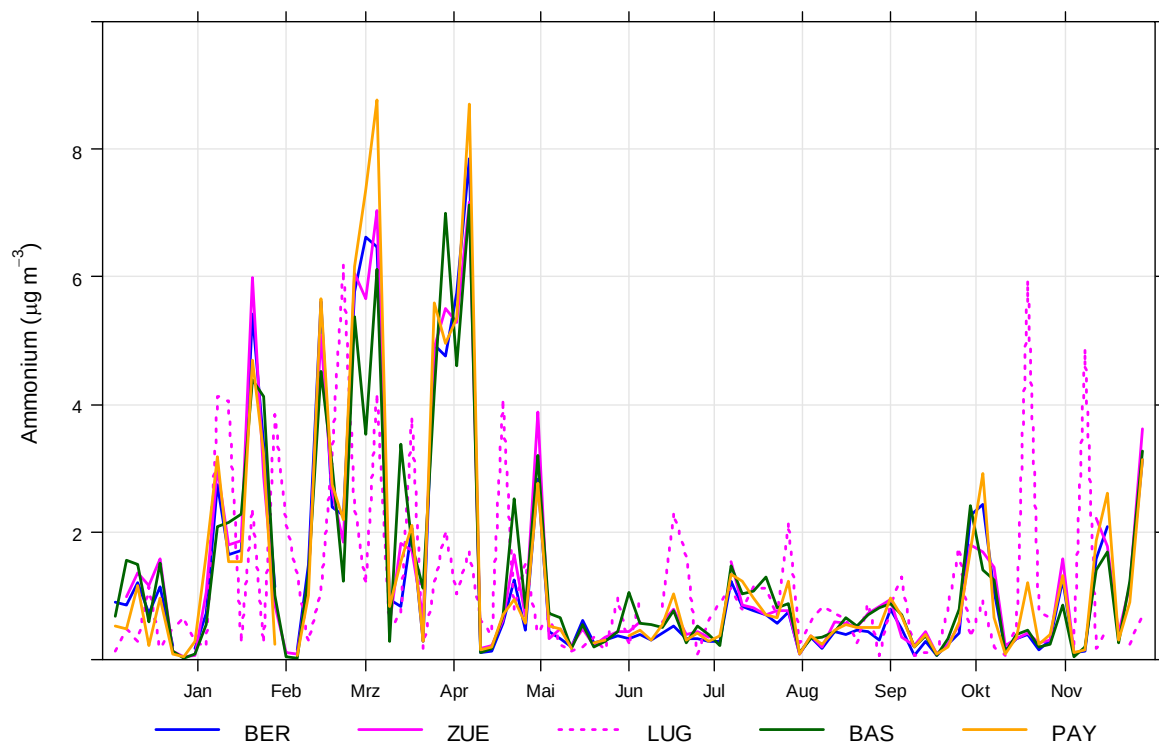


Abb. A.8: Verlauf der Tagesmittelwerte von Ammonium im PM2.5 vom Dezember 2012 bis Ende November 2013 an den in dieser Studie berücksichtigten Messstationen (siehe Tab. 1).

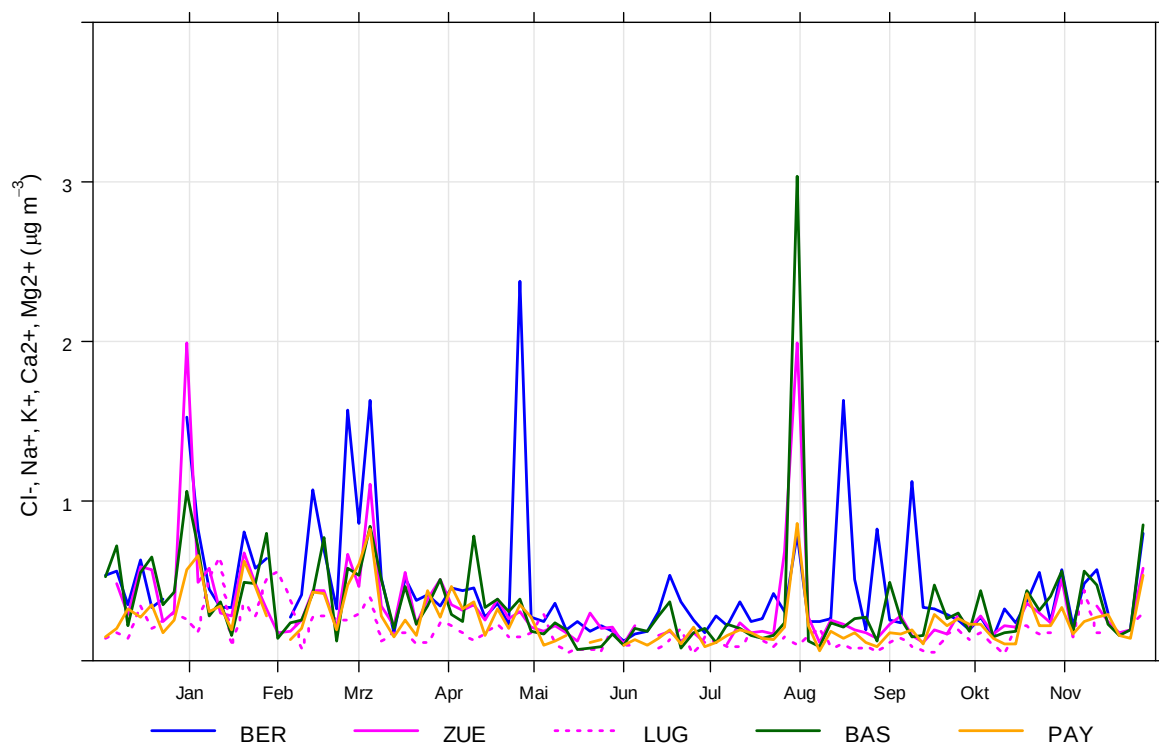


Abb. A.9: Verlauf der Tagesmittelwerte von Ammonium im PM2.5 vom Dezember 2012 bis Ende November 2013 an den in dieser Studie berücksichtigten Messstationen (siehe Tab. 1).