

Kontinuierliche Kurzzeitmessungen von Russ in Feinstaub

Einsatz von MAAP-Geräten im OSTLUFT-Gebiet



Schlussbericht 2017

Abkürzungsverzeichnis

BC	Schwarzer Kohlenstoff (Black Carbon)
EC	Russ, Elementarer Kohlenstoff
eBC	Equivalent Black Carbon (BC Daten korrigiert anhand von EC nach Referenzverfahren)
EKL	Eidgenössische Kommission für Lufthygiene
MAAP	Multiangle Absorption Photometer
$\mu\text{g}/\text{m}^3$	Mikrogramm (Schadstoff) pro Kubikmeter (Luft)
NO_2	Stickstoffdioxid
OC	Organischer Kohlenstoff (Organic Carbon)
PM _{2.5}	Feinstaub (Partikelgrössenfraktion <2.5 μm)
PM ₁₀	Feinstaub (Partikelgrössenfraktion <10 μm)

Impressum

Herausgeber:	OSTLUFT – Die Luftqualitätsüberwachung der Ostschweizer Kantone und des Fürstentums Liechtenstein
Projektteam:	Hanna Herich, Susanne Schlatter
Auswertungen:	Hanna Herich
Kontakt:	OSTLUFT, sekretariat@ostluft.ch
Copyright:	© OSTLUFT, Abdruck mit Quellenangabe erwünscht

Bezug und weitere Informationen: Download pdf: www.ostluft.ch (eine gedruckte Fassung liegt nicht vor)

Inhaltsverzeichnis

1	Zusammenfassung	4
2	Ziele	5
3	Methoden	5
3.1	Messmethoden für Russ	5
3.1.1	Reflektometrie	6
3.2	Standorte mit eBC Messungen durch MAAP Geräte	7
4	Ergebnisse	8
4.1	Jahresmittelwerte und Langzeittrends in der Russbelastung	8
4.2	Russbelastung auf Stunden-/Tagesbasis, Ergebnisse der kontinuierlichen Messungen mittels MAAP	12
4.2.1	Russbelastung im Tagesgang	12
4.2.2	Russbelastung und Windrichtung	13
	Exemplarisches Beispiel Appenzell	14
	Exemplarisches Beispiel Opfikon	15
4.2.3	Russ und Feinstaub	17
4.2.4	Russ und Stickoxide	18
5	Fazit	22
6	Empfehlung für zukünftige Messungen der Russimmissionen im OSTLUFT-Gebiet	23
7	Anhang	24

1 Zusammenfassung

Der Luftschadstoff Russ bezeichnet kohlenstoffhaltige Partikel in der Außenluft. In der Schweiz resultieren Russpartikel vor allem aus den primären Emissionen anthropogener Verbrennungsprozesse (motorische Verbrennung und Holzfeuerungsanlagen). Die WHO-Kommission IARC stufte Dieseleruss im Jahr 2012 als karzinogen ein. Weder in der Schweiz noch in der EU gibt es einen direkten Immissionsgrenzwert für Russ. Indirekt wird Russ jedoch als Bestandteil von Feinstaub in den Grenzwerten für den gesamten Feinstaub (Grössenfraktionen PM₁₀ und PM_{2.5}) mitefassen. Laut Eidgenössischer Kommission für Lufthygiene (EKL) ist ein Zielwert von 0.1 µg/m³ anzustreben, um den Schutz der Bevölkerung zu gewährleisten. Dieser Bericht diskutiert die Russmessungen der letzten 15 Jahre im OSTLUFT-Gebiet und zeigt die Vorteile von kontinuierlichen Messreihen an verschiedenen Beispielen.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Russbelastung in den letzten Jahren zurückgegangen ist. An allen Standorten im OSTLUFT-Gebiet liegen die Konzentrationen aber noch weit über dem Richtwert der EKL, entsprechend ist das Russmonitoring nach wie vor als Erfolgskontrolle wichtig. In den letzten 14 Jahren nahm die Russbelastung um 50% ab, stärker, als die Feinstaubbelastung in PM₁₀ mit 40%. Gründe dafür sind unter anderem die Einführung der Dieselerusspartikelfilter. Dies zeigt, dass Russ ein wichtiger Indikator ist, um die Entwicklung der Verkehrsimmissionen zu beobachten.

Die Fortführung der zeitlich hochaufgelösten Russmessungen wird empfohlen, um weitere Informationen über die Russsituation zu erhalten. Für zukünftige Messungen sollten die Beobachtung der Quelledynamik und die Zuordnung von Russquellen sowie die Korrelation von Russ mit anderen Luftschadstoffen im Vordergrund stehen. Aufgrund der nötigen Anbindung an das Referenzverfahren müssen die kontinuierlichen Messungen stets in Verbindung mit qualitätssichernden EC-Messungen durchgeführt werden.

Bisher wurden im OSTLUFT-Gebiet Russimmissionen überwiegend an verkehrsdominierten Standorten bestimmt. Für zukünftige Messungen besteht ein Nachholbedarf an Standorten, an denen Holzfeuerungen deutlich zur Russbelastung beitragen. Um eine Quellenzuordnung (Verkehr oder Holzfeuerungen) durchführen zu können, sind ergänzende Messmethoden sinnvoll (Aethalometer, Levoglukosan, usw.). In den letzten Jahren wurden Messstandorte meist nicht mit dem Fokus auf Russ ausgewählt. Langfristig empfiehlt sich ein optimiertes Einsatzkonzept auch für Russmessungen. Dabei sollten sowohl wiederkehrende Standorte als auch ein durchgehender Messort vorhanden sein.

2 Ziele

Im OSTLUFT-Gebiet werden seit Anfang der 2000er Jahre Russmessungen von Feinstaub durchgeführt. Russemissionen stammen aus verschiedenen Quellen und sie variieren auf kurzen Zeitskalen (Stosszeiten Verkehr, Heizen am Abend usw.). Derzeit wird Russ im OSTLUFT-Gebiet vor allem stichprobenmässig als Tagesmittelwert (Quarzfaserfilter) und mit zwei Beta-Staubmetern kontinuierlich in mehrstündiger Auflösung erhoben. Die im Messkonzept 2012B verankerten Russmessungen bieten keine Möglichkeit, die Variation der Russimmissionen auf kurzen Zeitskalen zu beurteilen.

Seit einigen Jahren werden im OSTLUFT-Gebiet auch MAAP-Geräte (Multiangle Absorption Photometer) zur kontinuierlichen Bestimmung von Russ projektweise eingesetzt. Kontinuierliche Messungen erlauben es, eine Korrelation zwischen Russ und anderen kontinuierlich gemessenen Leitschadstoffen (NO_x , PM_{10} usw.) zu erstellen. Detaillierte Russanalysen helfen zudem, den Zusammenhang zwischen Quellen und Belastungsmuster zu erkennen (z. B. Flottenveränderung). Weiterhin liefern sie Informationen über die Konzentrationen während aussergewöhnlicher Belastungsphasen wie Inversionswetterlagen. In diesem Bericht werden Russmessungen mit verschiedenen Gerätetypen und unterschiedlicher Zeitauflösung dargestellt. Die Vorteile der hochaufgelösten kontinuierlichen Messreihen (MAAP-Daten) für Datenanalysen werden an verschiedenen Beispielen gezeigt. Das Ergebnis der Analyse soll eine Empfehlung für die zukünftigen Russmessungen unter Berücksichtigung der vier vorhandenen MAAP-Geräte hervorbringen.

3 Methoden

3.1 Messmethoden für Russ

Russ ist ein zu überwiegend aus Kohlenstoff bestehender Feststoff, der durch unvollständige Verbrennung entsteht. Russ ist chemisch nicht eindeutig definiert und es gibt verschiedene Messverfahren zur Bestimmung. Im Allgemeinen wird die Russbelastung durch die Konzentration von elementarem (hitzebeständigem und graphitähnlichem) Kohlenstoff (EC) angegeben. Optische Messverfahren (Beta-Staubmeter und MAAP), die z. B. auf Lichtreflexion beruhen und schwarzen Kohlenstoff (BC, black carbon) bestimmen, werden basierend auf parallelen EC-Vergleichsmessungen in eBC-Werte (equivalent black carbon) umgerechnet. Dieses Verfahren hat sich schweizweit und international etabliert.

An den OSTLUFT-Stationen mit PM_{10} -Messung werden High Volume Sammler zur Qualitätssicherung eingesetzt. Diese sind stichprobenmässig mit Quarzfaserfiltern zur Russanalyse bestückt. Die EC-Konzentration der Quarzfaserfilter werden mit einem OC/EC-Analysator (Sunset Labs) thermisch-optisch (Messverfahren nach EUSAAR2-Protokoll, prEN 16909) bestimmt. Die EC-Messungen werden einerseits als qualitätssichernde Massnahme für das kontinuierliche Messverfahren (Beta-Staubmeter und MAAP) verwendet,

Die Quarzfaserfilter der High Volume Sammler werden stichprobenmässig mittels Reflektometrie im Labor analysiert. Dazu wird mit einer Lichtquelle die Lichtreflexion am Filter gemessen. Je geringer die Reflexion ausfällt, desto stärker ist die Russbeladung auf dem Filter. Für je acht Filter pro Station und Jahr wird ein Vergleich zwischen der Reflektometrie und der thermisch-optischen Referenzmethode durchgeführt. Anhand des Vergleichs wird eine Umrechnungsfunktion von der Reflektion zu EC bestimmt. Abb. 1 zeigt den Vergleich für alle Standorte für das Jahr 2015, die Messwerte können gut mit einer Potenzfunktion ($Y = 0.18 * x^{-0.66} * (x - 100)$) abgebildet werden.

Die Anbindung zwischen den beiden Messverfahren wird jährlich durchgeführt und variiert leicht von Jahr zu Jahr. Gründe dafür sind zum einen die variierenden Standorte und die daraus resultierende jährlich unterschiedliche Mischung aus Standorttypen. Zum anderen kann das Material der Quarzfaserfilter je nach Herstellungsserie geringfügig variieren (pro Kalenderjahr wird jedoch die gleiche Filterserie verwendet) und der Russgehalt im Feinstaub nimmt tendenziell ab.

3.2 Standorte mit eBC Messungen durch MAAP Geräte

In der OSTLUFT Standortklassierung entsprechen die hier betrachteten Messstationen den Kategorien in Tab.1.

Ort	Standort	m ü. M.	Messjahre	Standorttyp
Appenzell	Feuerschau	775	2012/13, 2016	
Knonau	Oberdorfstrasse	432	2012	
Mels	Wältigasse	490	2010	
Opfikon	Balsberg	430	2014 – heute	
Rapperswil-Jona	Tüchelweier	412	2015	
Schellenberg	Zollamt	600	2007	
Schlieren	Güterstrasse	392	2016	
St. Gallen	Bild	655	2007/08	
Wettswil	Filderen	528	2007-2013	
Wettswil	Weieracher	550	2008-2011	
Wetzikon	Turnhallenstrasse	544	2015	
Wil	Rudenzburg	573	2014	

Tab. 1: Charakterisierung der ausgewerteten OSTLUFT Messstationen mit eBC-Messungen durch MAAP-Messgeräten

4 Ergebnisse

4.1 Jahresmittelwerte und Langzeittrends in der Russbelastung

Abb. 2 zeigt die EC-Jahresmittelwerte (Stichprobenkonzept) an verschiedenen Standorten im OSTLUFT-Gebiet in Abhängigkeit vom Standorttyp. Eine vollständige Übersicht der Jahresmittelwerte aller Standorte befindet sich in Tabelle 1 im Anhang. Seit Beginn der Messungen sind die Russkonzentrationen an allen Standorten zurückgegangen. 2007 wurden an strassennahen und zentralen Standorten noch Konzentrationen von über $1.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ im Jahresmittel gemessen, heute liegen die Konzentrationen meist unter $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Auch an dörflichen und ländlichen Standorten ist ein abnehmender Trend zu beobachten. Vor zehn Jahren lagen die Konzentrationen häufig zwischen 0.5 und $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$, heute liegen sie meist um $0.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ und darunter.

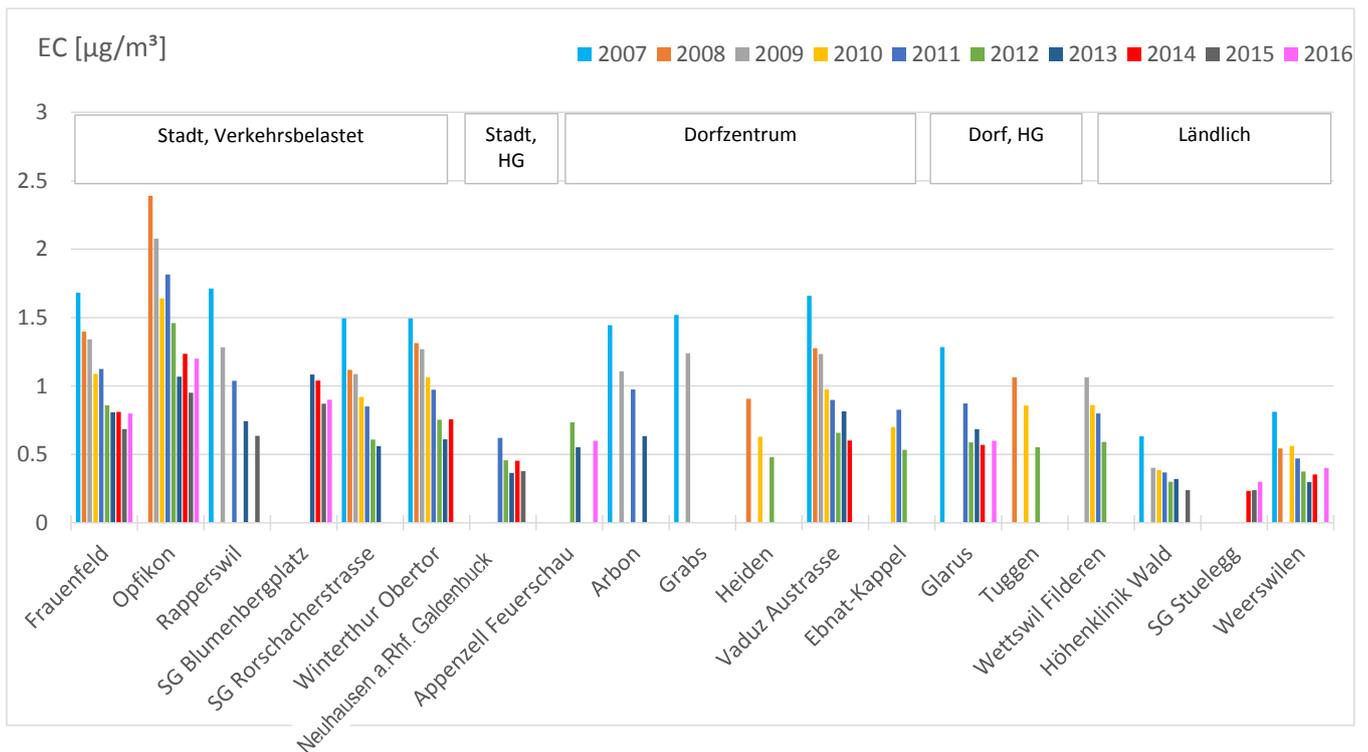


Abb. 2: EC im PM10 (gemäss TOT/EUSAAR-2 Methode und Reflektion) Jahresmittelwerte 2007-2015 an ausgewählten OSTLUFT-Standorten (Stichprobenkonzept) mit mehrjährigen Datenreihen.

Langjährige kontinuierliche Messreihen, die mit optischen Messverfahren an unterschiedlichen Messorten durchgeführt wurden, sind in Abb. 3 (Betastaubmeter) und Abb. 4 (MAAP) als Monatsmittelwerte dargestellt. Die längsten kontinuierlichen Messreihen (Betastaubmeter) reichen an einzelnen Stationen mittlerweile fast 15 Jahre zurück und sind damit schweizweit herausstehend. MAAP-Geräte werden seit 2007 eingesetzt,

mittlerweile liegen für praktisch alle im OSTLUFT-Gebiet vorhandenen Standorttypen Russmessungen vor (ein- bis mehrjährig).

Bei Russ ist der Jahresgang stark ausgeprägt. Im Winter sind die Belastungen wesentlich höher als im Sommer. Zu Beginn der Messreihen Anfang und Mitte der 2000er Jahre lagen die Monatsmittelwerte der Russbelastung im Winter an verkehrsbelasteten Standorten (Zürich Stampfenbachstrasse und Schimmelstrasse sowie Vaduz Austrasse) noch um $3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ und vereinzelt um $4.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Auch im Sommer wurden Konzentrationen bis um $3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ erreicht. In den darauffolgenden zehn Jahren nahmen die Russkonzentrationen stark ab, die Spitzenwerte und die Hintergrundbelastung halbierten sich sowohl im Winter als auch im Sommer. In den letzten fünf Jahren fand nur noch eine leichte Abnahme statt. An vielen Messstandorten zeigen die Russkonzentrationen mittlerweile einen stabilen Jahresgang. Im Sommer liegen die Belastungen an vielen Standorten heute häufig unter $0.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Im Winter werden an verkehrsbelasteten Standorten noch immer Konzentrationen von mehr als $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ gemessen.

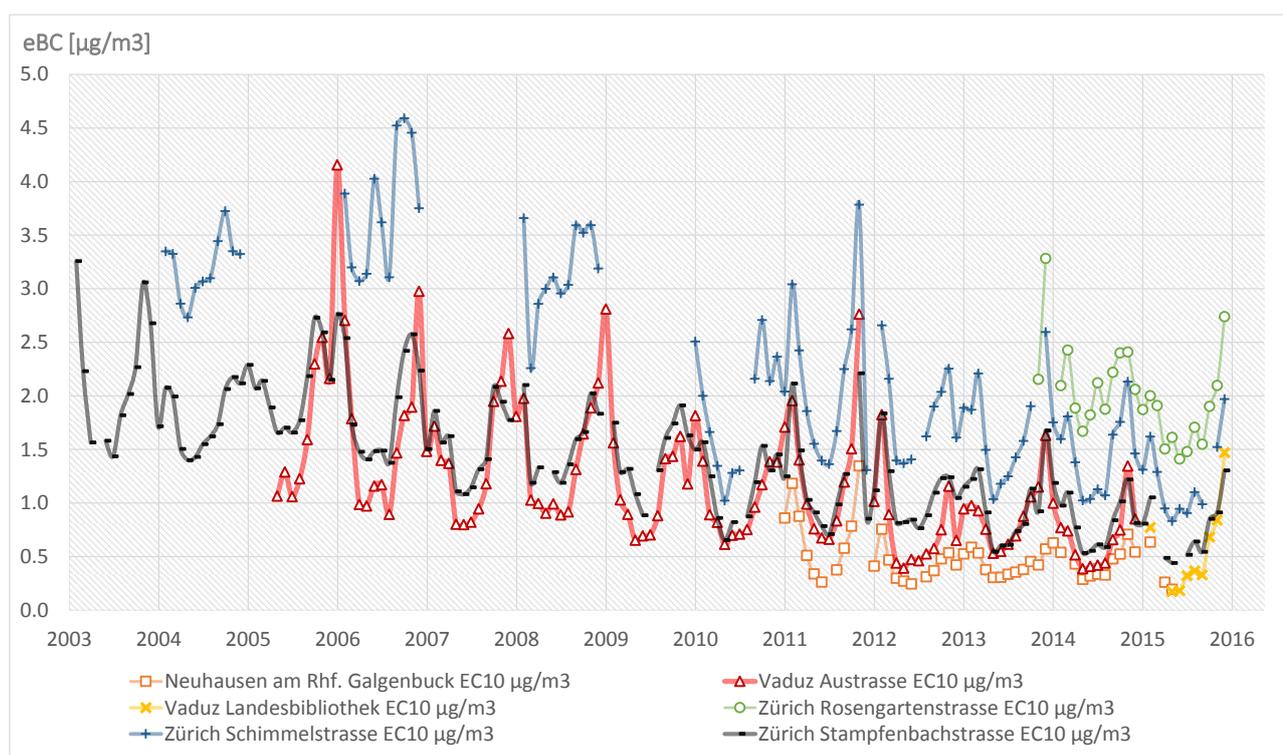


Abb. 3: eBC (Betastaubmeter) Monatsmittelwerte an verschiedenen OSTLUFT-Standorten

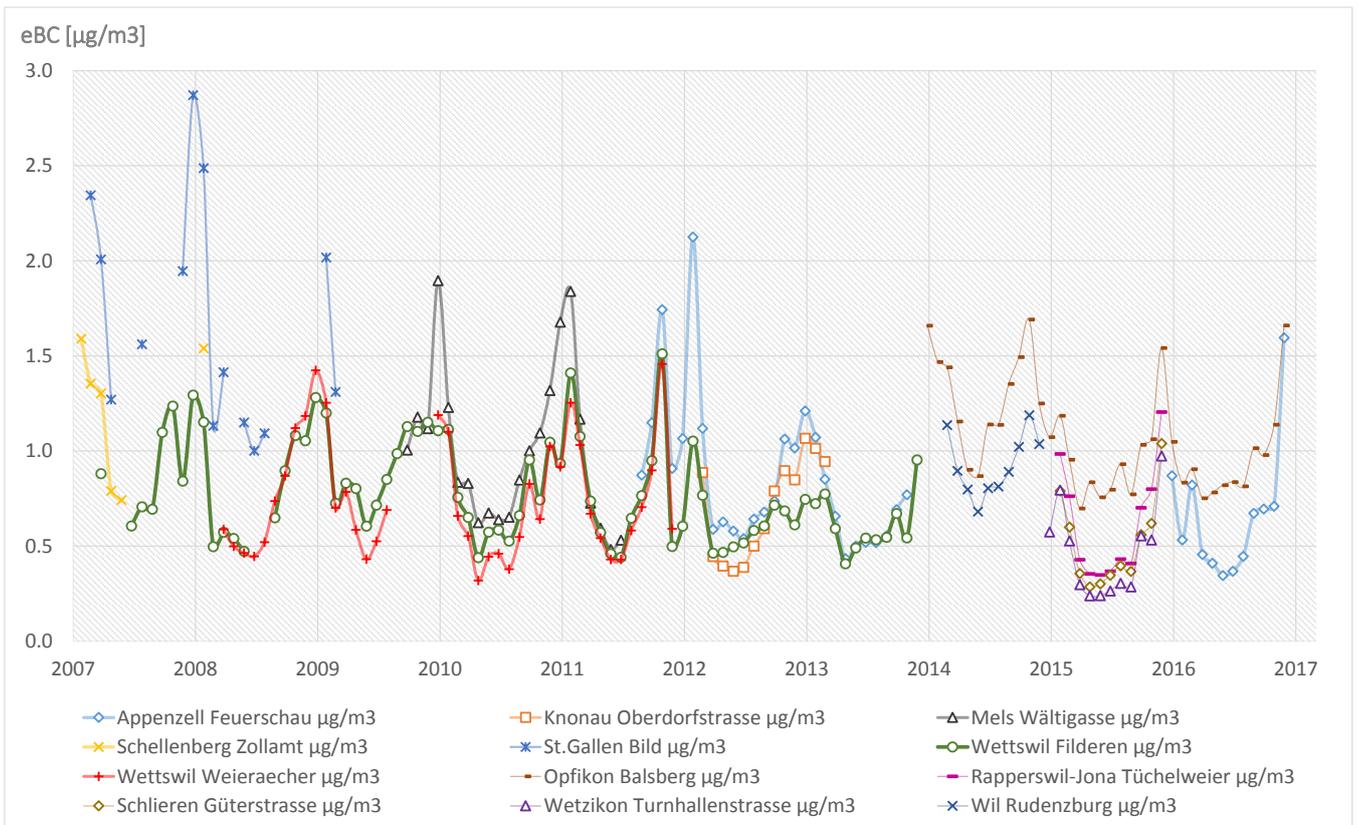


Abb. 4: eBC (MAAP) Monatsmittelwerte an verschiedenen OSTLUFT-Standorten, Zahlenwerte siehe Anhang.

In den letzten 14 Jahren nahm die Feinstaubbelastung (PM₁₀) im OSTLUFT-Gebiet um etwa 40% ab, während im gleichen Zeitraum die Russbelastungen um über 50% sanken. Einen Einfluss auf die abnehmenden Belastungen hatte die Flottenveränderung im Strassenverkehr, insbesondere die Einführung der Dieselmotorenpartikelfilter. Die Russmessungen zeigen diese Effekte wesentlich deutlicher als die PM₁₀-Immissionen. Auch in der Zukunft ist Russ daher ein wichtiger Messparameter, um die weitere Entwicklung der Verkehrsimmersionen zu beobachten. Zusätzliche Messparameter wie die Anzahl ultrafeiner Partikel können in der Zukunft vergleichbare Informationen liefern, die Messmethode ist aber derzeit noch nicht für langfristiges Monitoring etabliert.

Bisher wurden im OSTLUFT-Gebiet Russimmersionen überwiegend an verkehrsdominierten Standorten bestimmt. Es besteht Nachholbedarf für Messungen an Standorten, an denen Holzfeuerungen stark zur Russbelastung beitragen. Um eine Quellenzuordnung (Verkehr oder Holzfeuerungen) durchführen zu können, sind ergänzende Messmethoden sinnvoll (Aethalometer, Levoglukosan, usw.). Bisher wurden die OSTLUFT-Messstandorte nicht mit dem Fokus auf Russ ausgewählt. Langfristig empfiehlt sich ein Einsatzkonzept mit gezielterer Fokussierung auch auf Russ. Dabei sollten sowohl wiederkehrende Standorte als auch ein durchgehender Messort (Witterungskorrektur) berücksichtigt werden.

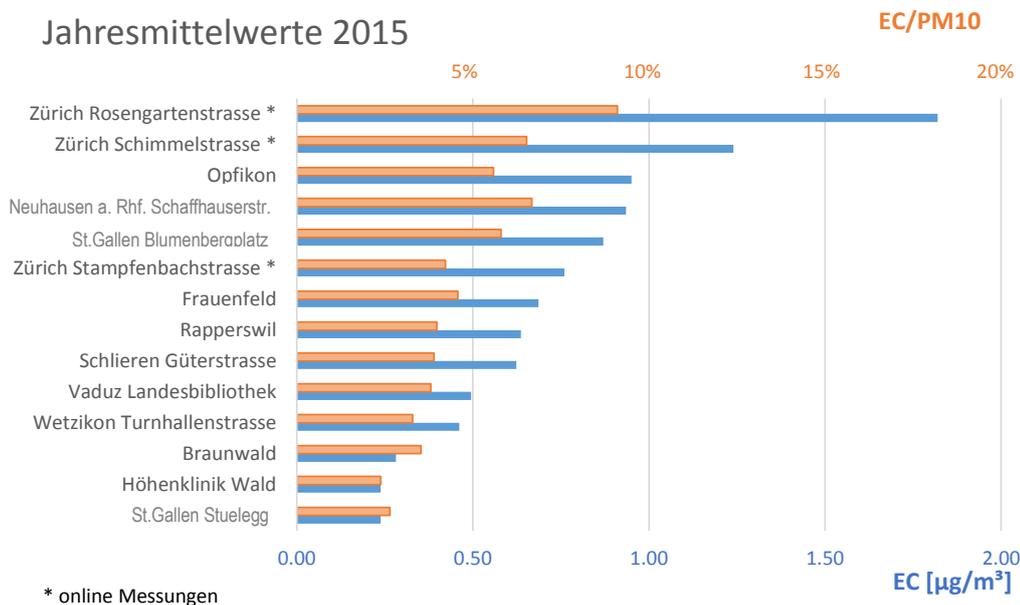


Abb. 5: EC (TOT Methode und Reflektion, Stichprobenkonzept) und eBC Jahresmittelwerte 2015 an verschiedenen OSTLUFT Standorten und prozentualer Anteil von EC in PM10.

Abb. 5 zeigt die Jahresmittelwerte 2015 für EC (Stichprobenkonzept) und eBC (Betastaubmeter). Gut ersichtlich ist die nach wie vor ausgeprägte Spannweite der Belastungsniveaus zwischen ländlichen und städtischen Standorten. An besonders verkehrsbelasteten innerstädtischen Standorten wurden Russkonzentrationen von über $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ gemessen, an den meisten städtischen Standorten lagen die Konzentrationen zwischen 0.5 und $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ und an ländlichen Standorten unter $0.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Der Anteil von Russ an PM10 liegt zwischen 5-9% an stark verkehrsbelasteten Standorten und unter 4% an ländlichen und Hintergrundstandorten.

4.2 Russbelastung auf Stunden-/Tagesbasis, Ergebnisse der kontinuierlichen Messungen mittels MAAP

4.2.1 Russbelastung im Tagesgang

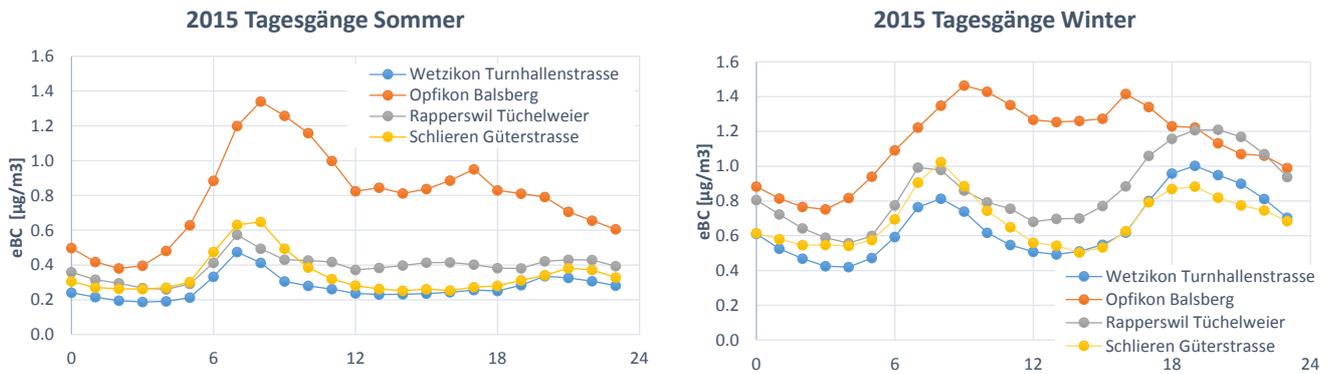


Abb. 6: Mittlere eBC-Tagesgänge an verschiedenen Standorten für das Jahr 2015, Sommer und Winter.

Abb. 6 zeigt mittlere eBC-Tagesgänge (Stundenmittelwerte) für das Jahr 2015 an den vier Messstandorten Wetzikon Turnhallenstrasse, Opfikon Balsberg, Rapperswil Tüchelweier und Schlieren Güterstrasse. Die Abbildung zeigt Tagesgänge für die Sommer- (Jun., Jul., Aug.) und Wintermonate (Jan., Feb., Dez.). Die höchsten Russkonzentrationen werden an allen Standorten während der Hauptverkehrszeiten erreicht. Im Tagesverlauf führt die ansteigende Grenzschichthöhe zu einer besseren atmosphärischen Durchmischung und die eBC-Belastung sinkt. An den Standorten in Rapperswil und Wetzikon ist der Abendpeak im Winter höher als der Morgenpeak. Dies könnte durch meteorologischen Ausbreitungsbedingungen bedingt sein, aber auch auf zusätzliche Immissionen durch Holzfeuerungen hindeuten. Am autobahnnahe Standort Opfikon Balsberg sind die Konzentrationen wesentlich höher als an den anderen Standorten und die maximalen Konzentrationen im Winter und Sommer unterscheiden sich nur gering. An den anderen Standorten ist ein deutlicher Unterschied zwischen den Jahreszeiten vorhanden, im Winter ist die eBC-Belastung etwa doppelt so hoch wie im Sommer.

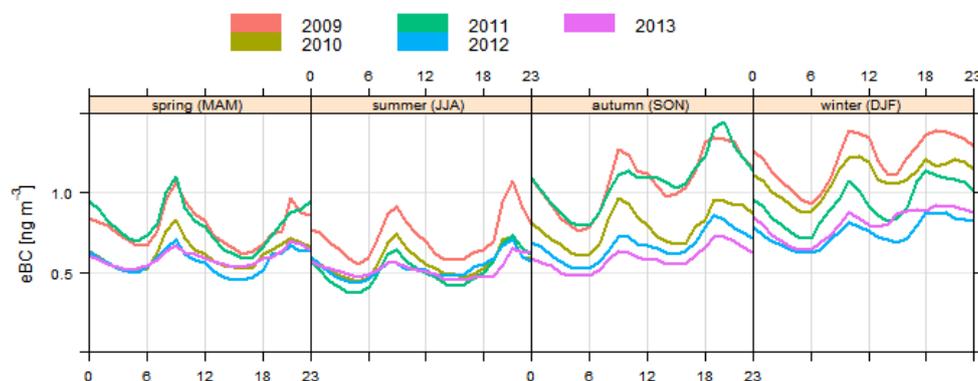


Abb. 7: Mittlere eBC-Tagesgänge in Wettswil Filderden (ZH) für die Jahre 2009-2013, verschiedene Jahreszeiten.

Abb. 7 zeigt mittlere eBC Tagesgänge (Stundenmittelwerte) für die Jahre 2009-2013 an der Messstation Wettswil Filderen¹. Für diese Station liegt derzeit die längste kontinuierlich gemessene Russzeitreihe vor. Auch auf Basis der Tagesgänge lässt sich der generell sinkende Trend der Russkonzentrationen im Sommer und Winter beobachten. Die eBC-Konzentrationen sind während der Belastungsspitzen und auf den Tagesminima zwischen 2009 und 2012 tendenziell zurückgegangen. Abb. 8 zeigt den mittleren Wochengang für eBC in Wettswil Filderen im Jahr 2012, hier zeigt sich nochmals der Unterschied zwischen den Jahreszeiten. Das Belastungsniveau liegt an Werktagen deutlich höher als am Wochenende, im Winter ist der Unterschied viel stärker ausgeprägt als im Sommer.

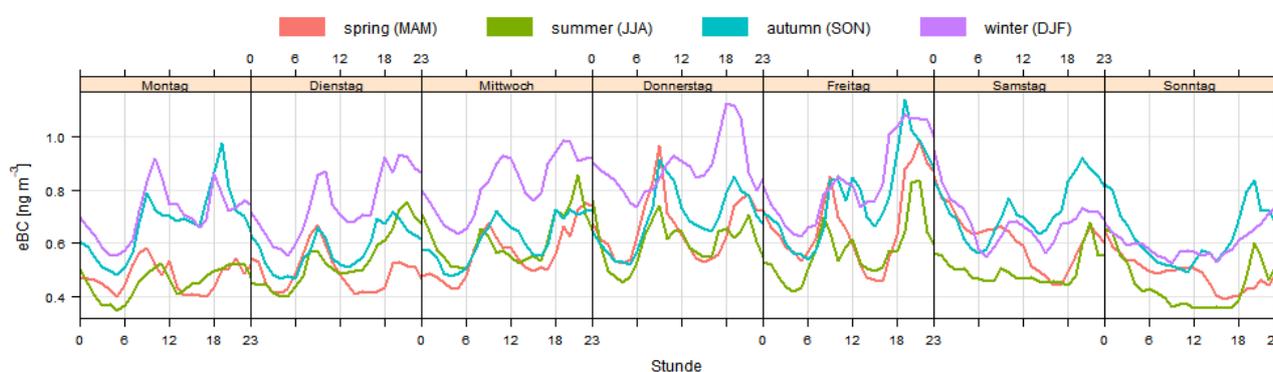


Abb.8: Mittlerer eBC-Wochengang in Wettswil Filderen (ZH) für das Jahr 2012 nach Jahreszeit.

4.2.2 Russbelastung und Windrichtung

An vielen der hier betrachteten Standorte ist die Spannweite der möglichen Windrichtungen durch die Topographie begrenzt. Häufig gibt es daher stabile und immer wiederkehrende Windsituationen, auch im Tagesverlauf, die standortspezifisch sind (z. B. Hangabwinde, Kaltluftabflüsse). Abb. 9 zeigt die Windsituation im Tagesverlauf für Opfikon, Appenzell und Mels. Alle Standorte zeigen deutliche Tag/Nacht-Unterschiede.

Da eBC zu grossen Teilen aus lokalen Quellen stammt, gibt es an allen Standorten grosse Unterschiede in der Russbelastung, je nach Lage der Quellen und entsprechend der vorherrschenden Windrichtungen und Windgeschwindigkeiten.

¹ Für Wettswil Filderen liegen auch eBC Messungen für die Jahre 2007/08 vor. Diese werden hier nicht gezeigt, da damals die nahegelegene Autobahnverzweigung (Uetlibergtunnel) noch nicht eröffnet war. Entsprechend war die Verkehrslage am Standort grundlegend anders und die Russbelastung wäre nicht vergleichbar.

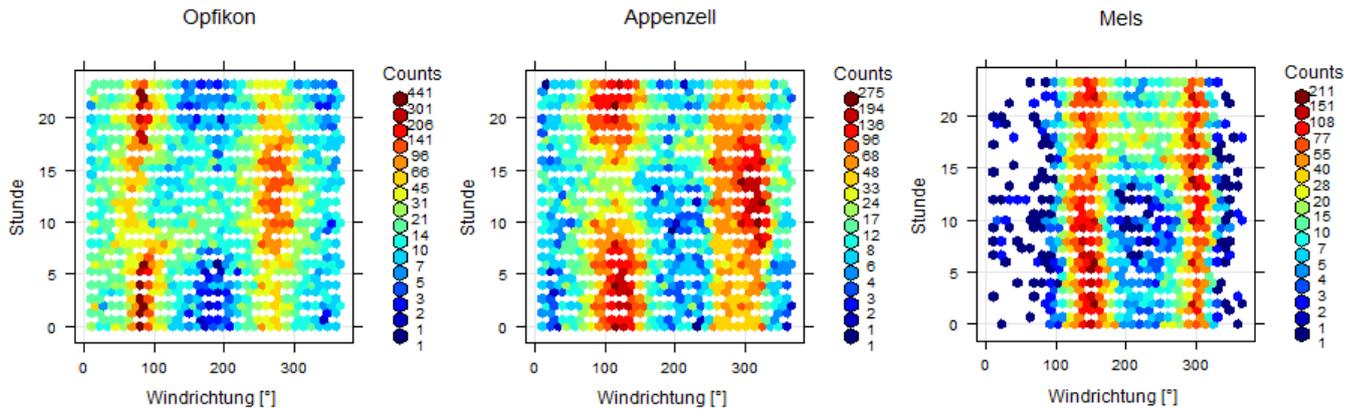


Abb. 9: Häufigkeit der Windrichtung nach Tageszeit für die Standorte Opfikon, Mels und Appenzell.

Exemplarisches Beispiel Appenzell

Abb. 10 zeigt die eBC-, PM10- und NOx-Konzentrationen als Funktion von Tageszeit und Monat für jeweils acht Windsektoren exemplarisch für Appenzell Feuerschau (weitere Informationen zum Messstandort und den Luftqualitätsmessungen 2012/2013 finden sich im Fachbericht [Immissionsmessungen in Appenzell, 2013](#)). Höchste eBC-Konzentrationen von über $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ werden morgens und abends während der Wintermonate erreicht, insbesondere bei den Windrichtungen Ost und Südost und auch teilweise bei den Windrichtungen Nord, Nordost, Süd und Südwest. Für die Windsektoren West und Nordwest sind die eBC-Konzentrationen ganzjährig tief. Diese Windsektoren sind geprägt durch eine Randlage mit geringer Siedlungs- und Verkehrsdichte sowie verschiedenen lokalen Hang- oder Talwindssystemen (z. B. Durchlüftung vom Sittertal).

Das Belastungsmuster für NOx ähnelt ganzjährig dem von eBC. Die höchsten Konzentrationen werden im Winter während der Hauptverkehrszeiten bei Wind aus Ost und Südost erreicht (Wind aus Ortszentrum). Für PM10 ist ein deutlicher Belastungsunterschied zwischen Sommer und Winter zu erkennen, im Tagesverlauf ist die Belastung viel ausgeglichener als für eBC und NOx.

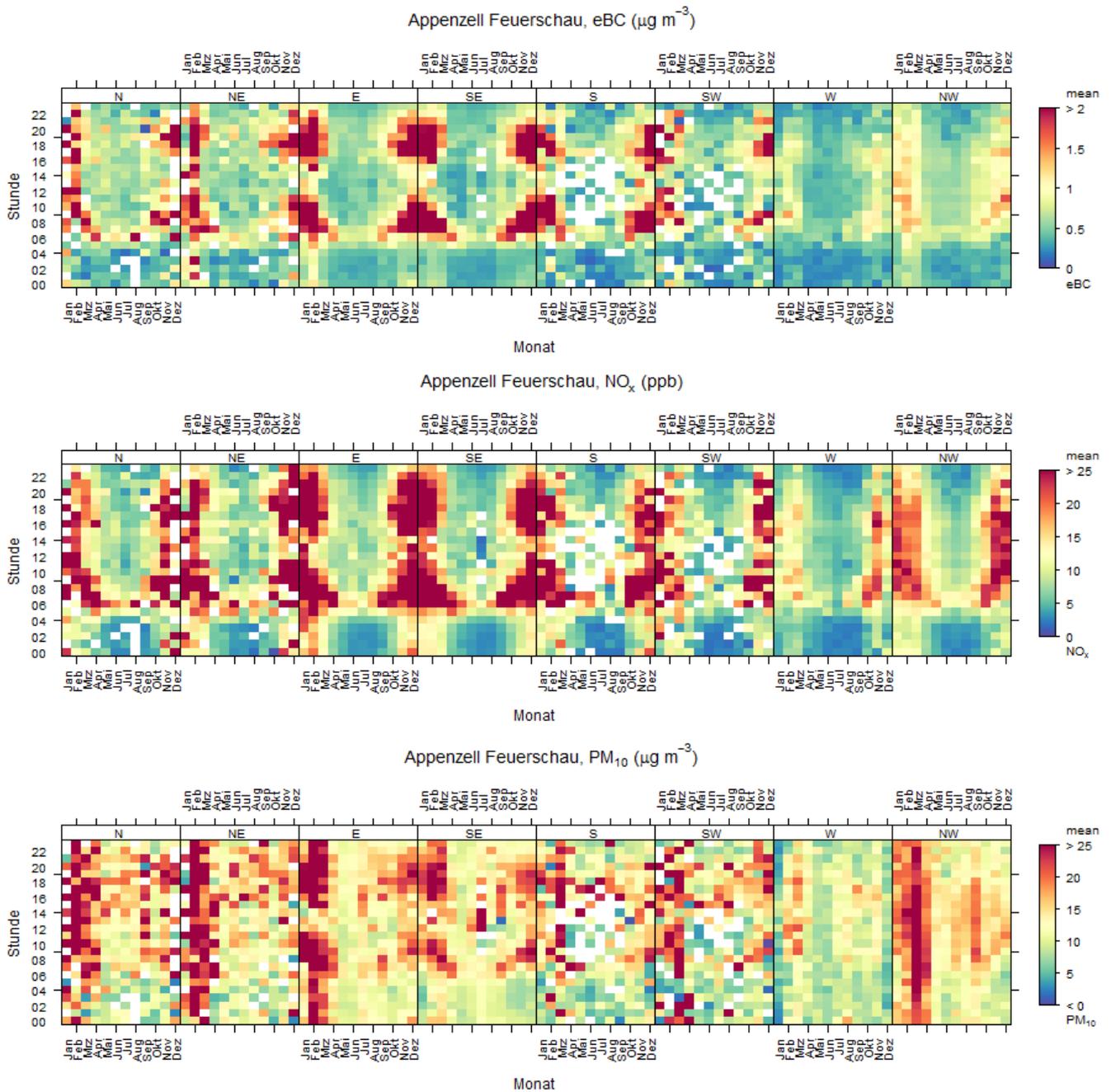


Abb. 10: Konzentrationen von eBC, NO_x und PM₁₀ (farbkodiert) als mittlerer Tagesgang auf Monatsbasis für die acht Windrichtungssektoren (weisse Flächen: keine Daten vorhanden).

Exemplarisches Beispiel Opfikon

Nicht nur die absoluten Russkonzentrationen, auch das Verhältnis von Russ zu anderen Komponenten wie z. B. zu den Stickoxiden, ist nicht immer gleich. Abb. 11 zeigt das Verhältnis von eBC und NO_x zueinander (für Sommer und Winter) exemplarisch für den strassennahen Standort Opfikon Balsberg (weitere Informa-

tionen zum Messstandort unter www.ostluft.ch). Jeder Datenpunkt in der Abb. 11 entspricht einem Stundenmittelwert, die Auswertung ist für 2014- 2016 dargestellt.

Das Verhältnis der beiden Komponenten zueinander ist nicht stabil, es variiert je nach Quellen- beziehungsweise nach Zeitkomponente. Im vorliegenden Fall Opfikon eignet sich die Windrichtung, um Quellen zu unterscheiden: Bei Wind aus Nordwest, West, Südwest und Süd (180° - 305°) stammen die Immissionen direkt von der benachbarten Autobahn (in der Abbildung überwiegend gelb-rot farbkodiert). Bei Wind aus den anderen Windsektoren (überwiegend blaue Farbkodierung) ist der Abstand zur Strasse grösser. Alle Abbildungen in Abb. 11 zeigen, dass bei Immissionen aus dem Windsektor mit Autobahn ganzjährig mehr NO_x pro eBC vorhanden ist, denn die gelb-roten Messwerte liegen immer eher oberhalb der linearen Regressionsgeraden. Für den Hintergrundsektor liegen die Messwerte eher unterhalb der Regressionsgeraden. Ein gutes Mass für das Verhältnis von eBC und NO_x zueinander ist somit die Steigung der linearen Regressionsgeraden (vgl. Abb. 11). Eine Regressionsgerade für die Messwerte aus dem Autobahnsektor (nur gelbe-rote Datenpunkte) hätte eine grössere Steigung als eine Regressionsgerade nur für die Messpunkte aus dem Hintergrundsektor (blaue Messpunkte).

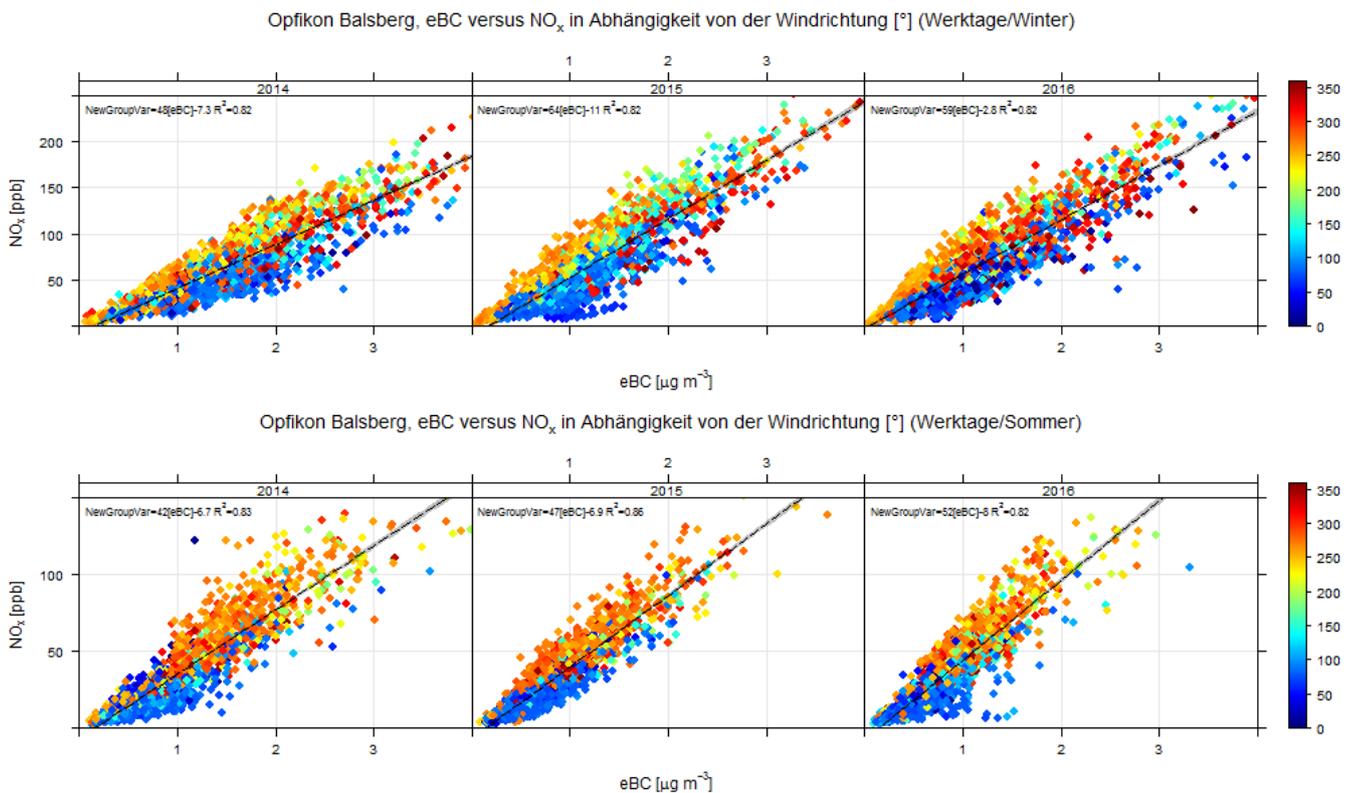


Abb. 11: Verhältnis von eBC und NO_x (Stundenmittel) an Werktagen im Winter und Sommer je nach Windrichtung (farbkodiert) für die Jahre 2014-2016 und lineare Regression.

Abb. 11 zeigt auch, dass das Verhältnis von NO_x und eBC zeitlich variiert. Zwischen 2014 und 2016 sanken die eBC-Konzentrationen leicht. Während z. B. 2014 an Werktagen im Sommer viele eBC-Stundenmittelwerte bei über $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ lagen, traten so hohe Konzentrationen im Jahr 2016 nur noch vereinzelt auf.

4.2.3 Russ und Feinstaub

Russ wird als Bestandteil von Feinstaub in den Grenzwerten für den gesamten Feinstaub (Größenfraktionen PM_{10} und $\text{PM}_{2.5}$) miteingefasst. Doch die Belastungsmuster und Konzentrationen der beiden Komponenten unterscheiden sich stark auf kurzen Zeitskalen, wie z. B. im Tagesgang. Abb. 12 zeigt exemplarisch mittlere Tagesgänge für eBC und PM_{10} im Jahr 2016 für den Standort Appenzell Feuerschau. Die Feinstaubkonzentrationen werden an vielen Standorten nur zum Teil durch den lokalen Verkehrsfluss bestimmt. Die Konzentrationen sind vor allem von der regionalen Gesamtbelastung und Faktoren wie der Wetterlage und der Grenzschichthöhe (atmosphärische Verdünnung) abhängig. Die Russbelastung wird hingegen häufig durch lokale Quellen bestimmt (motorische Verbrennung, Holzfeuerungen). An strassennahen Standorten folgen die Russbelastungen den Morgen- und Abendpeaks des Verkehrs ähnlich wie die Stickoxide (vgl. Abb. 10).

Analog zu den Stickoxiden (vgl. Abb. 11) ist auch das Verhältnis von eBC und PM_{10} nicht konstant, es variiert z. B. je nach Tageszeit. Abb. 13 zeigt das Verhältnis von eBC zu PM_{10} (Steigung der linearen Regressionsgerade von eBC und PM_{10}) in Abhängigkeit vom Tagesverlauf für die drei Standorttypen Mels (Dorfhintergrund), Appenzell (Dorfzentrum) und Opfikon (städtisch, verkehrsbelastet). Im Tagesverlauf sind für alle Standorte die Hauptverkehrszeiten auffällig, während dieser Phasen beträgt die Steigung der linearen Regressionsgeraden von eBC gegen PM_{10} etwa 0.04-0.07. Es ist also viel mehr Russ im Feinstaub vorhanden als während der restlichen Tageszeiten (Steigung der linearen Regressionsgeraden von eBC gegen PM_{10} liegt dann unter 0.04).

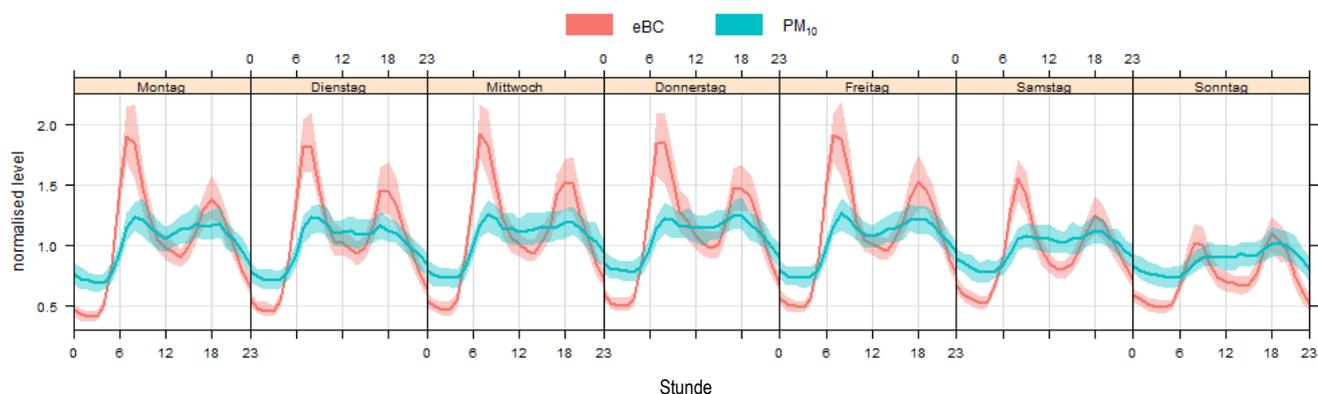


Abb. 12: Wochengang für PM_{10} und eBC am Standort Appenzell Feuerschau im Jahr 2016 mit 95% Vertrauensintervall, normalisierte Kurven.

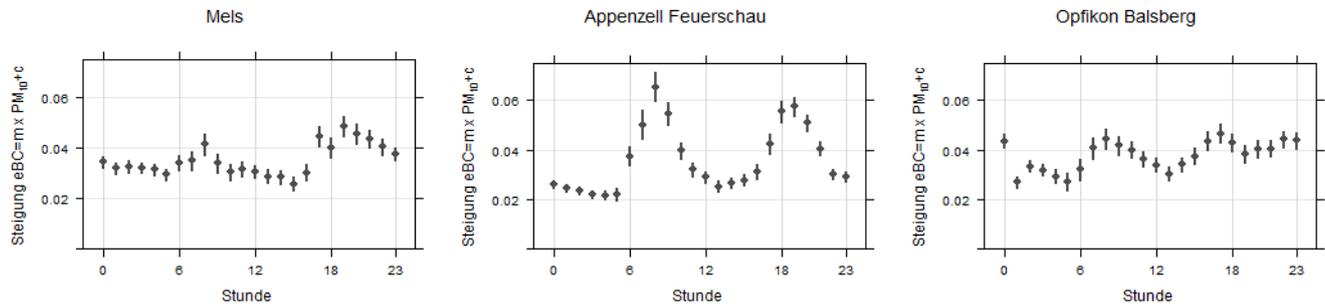


Abb. 13: Lineare Beziehung (als Steigung) zwischen eBC [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] und PM10 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] auf Stundenbasis im Tagesgang an den Standorten Mels, Appenzell Feuerschau und Opfikon Balsberg mit 95% Vertrauensintervall.

Abb. 14 zeigt die Steigung der Regressionsgeraden von eBC gegen PM10 in Abhängigkeit von den Jahreszeiten an verschiedenen Standorten. Generell ist der Anteil von Russ in PM10 im Sommer geringer als im Winter. Für die drei zuvor betrachteten Standorttypen ist das Verhältnis wie folgt: In Mels und Appenzell liegt die Steigung der Regressionsgeraden eBC gegen PM10 im Sommer unter 0.02, im Winter um 0.07 in Mels und 0.11 in Appenzell. Für den verkehrsbelasteten Standort Opfikon ist der Unterschied von Sommer zu Winter weniger stark ausgeprägt. Im Sommer liegt die Steigung der Regressionsgeraden um 0.02-0.06, im Winter bei 0.06-0.1. Über alle Standorte gesehen war das Niveau der linearen Regressionsgeraden eBC zu PM10, abgesehen von den saisonalen Schwankungen über die letzten zehn Jahre relativ stabil.

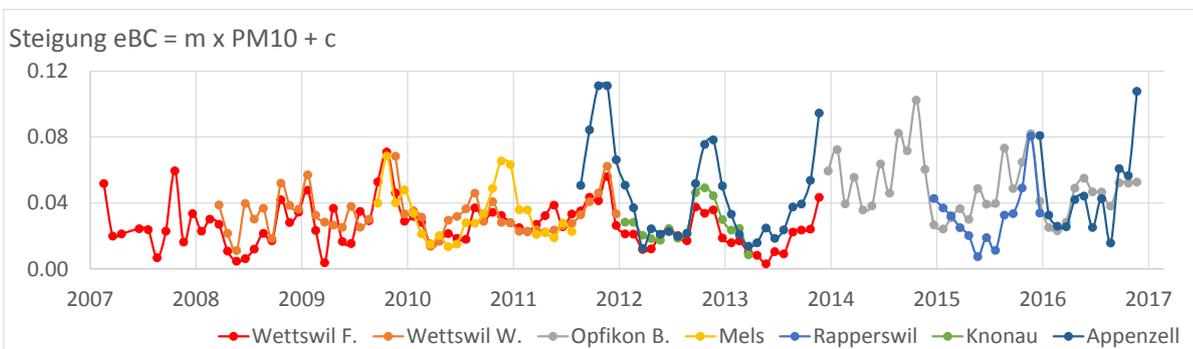


Abb. 14: Lineare Beziehung (als Steigung) zwischen eBC [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] und PM10 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] an verschiedenen Standorten (Monatsmittelwerte).

4.2.4 Russ und Stickoxide

Die Abb. 15-17 zeigen den Wochengang von NO_x und eBC an den Standorten Opfikon, Appenzell und Mels. Für alle Standorte ist generell eine gute Übereinstimmung zwischen den beiden Schadstoffen zu sehen, denn der Tagesgang der beiden Komponenten ist überwiegend durch den Verkehr geprägt. In Opfikon ist der Verlauf von NO_x und eBC hoch korreliert und die Verkehrsspitzen erfolgen simultan. Die relative Spannweite von eBC ist im Tagesverlauf etwas geringer als für NO_x , was auf ein höheres Hintergrundniveau von eBC zurückzuführen ist. An den Werktagen ist der Tagesgang praktisch identisch und folgt

dem typischen Verkehrsfluss. Es kann davon ausgegangen werden, dass die benachbarten Hauptverkehrsstrassen die Hauptquelle der beiden Schadstoffe sind.

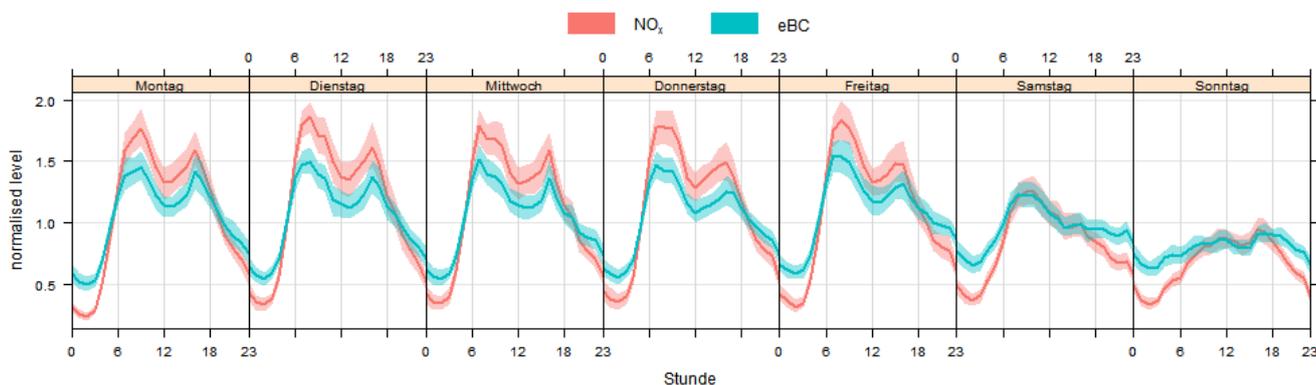


Abb. 15: Wochengang für NO_x und eBC am Standort Opfikon Balsberg mit 95% Vertrauensintervall, normalisierte Kurven.

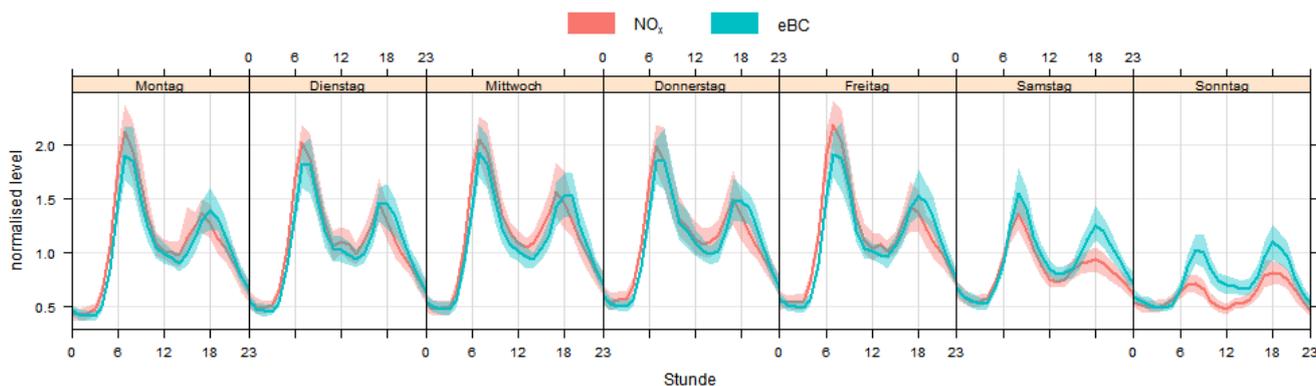


Abb. 16: Wochengang für NO_x und eBC am Standort Appenzell Feuerschau mit 95% Vertrauensintervall, normalisierte Kurven.

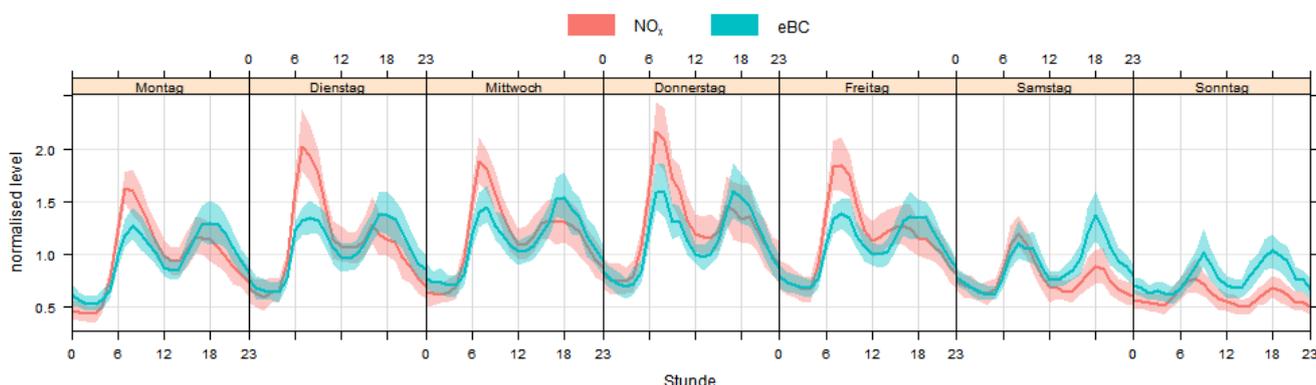


Abb. 17: Wochengang für NO_x und eBC am Standort Mels mit 95% Vertrauensintervall, normalisierte Kurven.

Auch in Appenzell ist der Tagesverlauf von NO_x und eBC stark vom Verkehrsfluss geprägt, an Werktagen ist der Verlauf der Schadstoffe praktisch gleich. Das unterschiedliche Niveau zwischen Morgen- und Abendpeak kann möglicherweise durch die im Tagesverlauf wechselnde Windrichtung erklärt werden. Morgens weht der Wind über das Dorfzentrum im Südosten, nachmittags bis abends eher aus dem Hintergrundsektor

Nordwest (vgl. Abb. 9). Das erhöhte eBC/NO_x-Verhältnis am Abend und Wochenende dürfte durch zusätzliche Holzfeuerungen entstehen.

In Mels sind die üblichen Verkehrsspitzen zu sehen, das eBC/NO_x Verhältnis ändert sich zwischen Morgen- und Abendpeak. Grund dafür könnten unterschiedliche Quellen sein. Morgens stammen die Luftmassen überwiegend aus Richtung des Dorfcentrums (Südost), abends eher aus Richtung der Autobahn (Nordwest), vgl. Abb. 9). Auch in Mels tragen Holzfeuerungen zu den Immissionen bei. Dies zeigt das erhöhte eBC/NO_x Verhältnis am Abend und am Wochenende (weitere Informationen zum Messstandort und den Luftqualitätsmessungen 2009-2011 finden sich im Fachbericht [Immissionsmessungen Seezetal, 2011](#)).

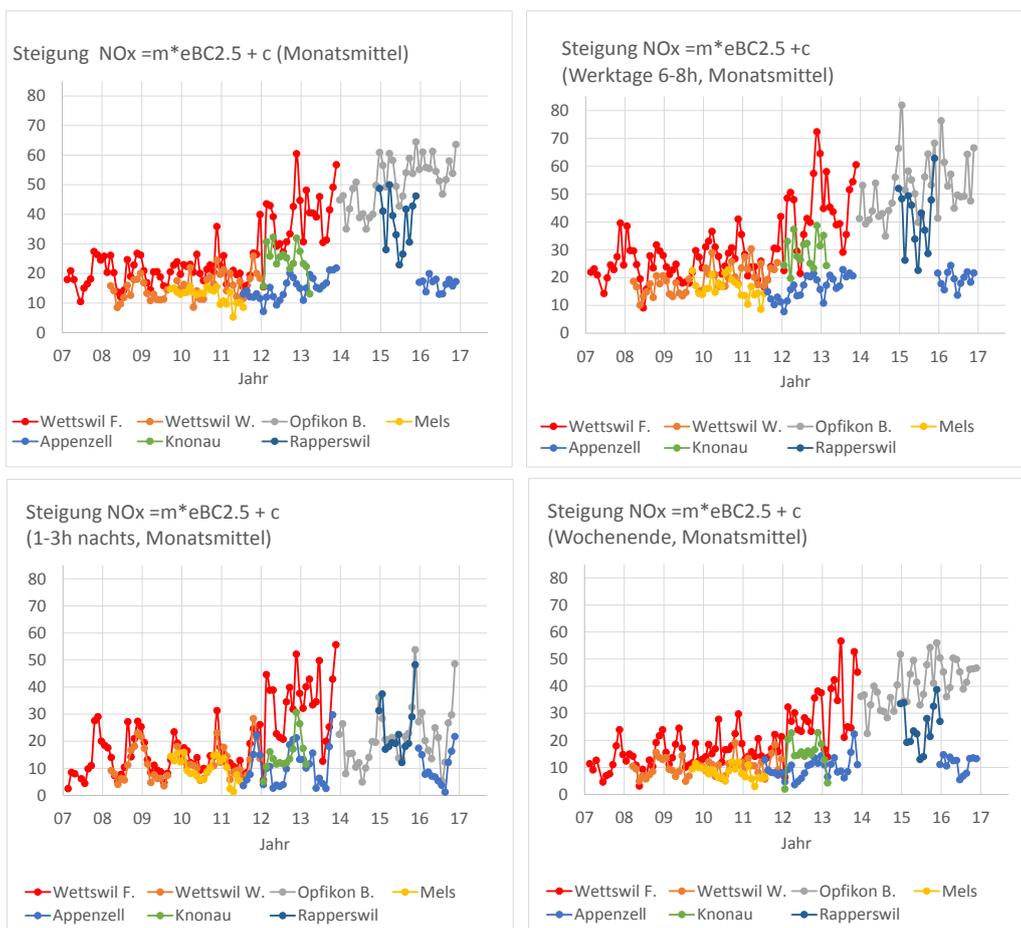


Abb. 18: Verhältnis von NO_x [ppb] zu eBC [µg/m³] als Steigung der linearen Regression (Monatsmittelwerte) für
 oben links: alle Daten eines Monats
 oben rechts: nur für Werktage 6-8 Uhr
 unten links: nur für Messungen nachts 1-3 Uhr
 unten rechts: am Wochenende

Das Verhältnis von eBC und NO_x zueinander (hier dargestellt als Steigung der linearen Regressionsgeraden eBC gegen NO_x, siehe auch Abb. 11) variiert mit der Zeit und je nach Standort und folgt einem Jahresgang. In Abb. 18. wurde für verschiedene Standorte die Steigung der linearen Regressionsgeraden zwischen eBC

und NO_x monatsweise bestimmt und für die Jahre 2007-2016 aufgetragen. Dabei wurden entweder alle Daten, nur die Datenpunkte an Werktagen zwischen 6-8 Uhr (Verkehrsspitze), nur die Daten zwischen 1-3 Uhr nachts (Hintergrundniveau) oder nur die Messdaten von Wochenenden ausgewertet. Für die gesamten Daten und die Teildaten während der morgendlichen Hauptverkehrszeit war die Steigung der linearen Regressionsgeraden eBC gegen NO_x bis 2012 relativ stabil. Seit 2012 wird an den meisten Standorten mehr NO_x pro eBC emittiert und die Steigung der linearen Regressionsgeraden nimmt zu. Dies zeigt, dass die eBC-Immissionen im Verhältnis zu den NO_x -Immissionen stärker abgenommen haben, insbesondere während der Belastungsphasen durch den Verkehr. In der Hintergrundbelastung (Daten nachts 1-3 Uhr und Wochenende) ist das Verhältnis zwischen NO_x und eBC hingegen eher stabiler im Rahmen der saisonalen Schwankungen.

5 Fazit

- Russ ist krebserregend, es gilt das Minimierungsgebot. Heute liegen die Konzentrationen im OSTLUFT-Gebiet noch weit über dem Richtwert der EKL.
 - ⇒ Russmonitoring ist als Erfolgskontrolle sinnvoll.
- Die längsten kontinuierlichen Russmessreihen im OSTLUFT-Gebiet reichen an einzelnen Stationen mittlerweile fast 15 Jahre zurück und sind damit schweizweit herausstehend. MAAPs werden seit 2007 eingesetzt, mittlerweile liegen für praktisch alle im OSTLUFT-Gebiet vorhandenen Standorttypen kontinuierliche Russmessungen vor (ein- bis mehrjährig).
- In den letzten 14 Jahren nahm die Russbelastung im OSTLUFT-Gebiet um mehr als 50% ab. Gründe dafür sind unter anderem die Einführung der Dieselpartikelfilter.
- Bedeutung der Russmessungen allgemein
 - ⇒ Auch in der Zukunft ist Russ ein wichtiger Messparameter, um die weitere Entwicklung der Verkehrsimmissionen zu beobachten. Detaillierte Auswertungen der MAAP-Ergebnisse zusammen mit NO_x an Strassenstandorten dienen zum Nachweis, ob die Dieselpartikelfilter-Technik langfristig zu tiefer Russbelastung führt.
 - ⇒ Zusätzliche Messparameter wie die Anzahl ultrafeiner Partikel können in der Zukunft zusätzliche Informationen liefern. Die Messmethode ist aber derzeit noch nicht für langfristiges Monitoring etabliert.
 - ⇒ Bisher wurden Russmessungen vermehrt an verkehrsbelasteten Standorten durchgeführt, an denen Holzfeuerungen nur gering zu den Immissionen beitragen. Es besteht Nachholbedarf im Russmonitoring an Standorten, an denen Holzfeuerungen wesentlich zur Russbelastung beitragen.
 - ⇒ Zur Unterscheidung des Russanteils aus Holzfeuerungen und dem Verkehr sollte eine Quellenzuordnung mit ergänzenden Messmethoden angestrebt werden (Aethalometer, Levoglukosan, usw.).
- Vorteile der kontinuierlichen MAAP-Messungen anhand ausgewählter Beispiele:
 - ⇒ Russmessungen in Stundenaufösung können als Tagesgänge dargestellt werden und zeigen die Unterschiede zwischen Belastungszeiten und Hintergrundniveau.
 - ⇒ Kontinuierliche Messungen in hoher Auflösung bieten die Möglichkeit, Russmessungen nach Windrichtung getrennt zu betrachten und damit im Hinblick auf verschiedene Quellen zu

analysieren. Je nach Windrichtung kann auch das Verhältnis von Russ zu anderen Schadstoffen variieren.

- ⇒ Die Auflösung der Russwerte als Halbstundenwerte erlaubt Detailanalysen zu Tagesaktivitäten und zur Schadstoffentwicklung (Trend).
- ⇒ Mit hoch aufgelösten Messdaten kann das Verhältnis von eBC zu anderen Schadstoffen wie z. B. NO_x in Teildatensätzen und während Belastungsphasen betrachtet werden.

6 Empfehlung für zukünftige Messungen der Russimmissionen im OSTLUFT-Gebiet

- Der Betrieb von MAAP-Monitoren in bestehenden Messstationen bedeutet einen minimalen Aufwand. Die Kosten für eine Jahresmessung in einer bestehenden Messstation betragen ca. Fr. 5'000 (Jahresservice, Wartung, Datenaufarbeitung).
- Die MAAP-Monitore sollen speziell für diese Fragestellungen eingesetzt werden:
 - Wie ist die Dynamik der Russquellen?
 - Können anhand der Quellenaktivität einzelne Quellen zugeordnet werden?
 - Wie korreliert Russ mit anderen Schadstoffen?
- Das Projektteam empfiehlt der OSTLUFT-Geschäftskommission mit den vorhandenen vier MAAP-Monitoren an folgenden Standorten weitere Messungen vorzunehmen:
 - Autobahn-Standort Opfikon mit starker Verkehrsbelastung
 - Innerstädtischer Verkehrsstandort in St. Gallen Blumenbergplatz
 - eventuell ein Standort im Siedlungshintergrund (z. B. Winterthur Veltheim)
 - Projektstandorte mit speziellen Fragen zum Russ von Strassenverkehr, Industrie und Gewerbe oder Holzfeuerungsanlagen

7 Anhang

ORT	LAGE	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Frauenfeld	Stadt, verkehrsbelastet	1.7	1.4	1.3	1.1	1.1	0.9	0.8	0.8	0.7	0.8
Neuhausen a.Rhf. Schaffhauserstr.	Stadt, verkehrsbelastet									0.9	
Opfikon	Stadt, verkehrsbelastet		2.4	2.1	1.6	1.8	1.5	1.1	1.2	1.0	1.2
Rapperswil	Stadt, verkehrsbelastet	1.7		1.3		1.0		0.7		0.6	
Schaffhausen Bahntal	Stadt, verkehrsbelastet								1.4		
St.Gallen Bild.	Stadt, verkehrsbelastet	1.7	1.3								
St.Gallen Rorschacherstrasse	Stadt, verkehrsbelastet	1.5	1.1	1.1	0.9	0.9	0.6	0.6			
Wil Rudenzburg	Stadt, verkehrsbelastet								0.8		
Wil Rudenzburg Kreuzung	Stadt, verkehrsbelastet										1.2
Winterthur Obertor	Stadt, verkehrsbelastet	1.5	1.3	1.3	1.1	1.0	0.8	0.6	0.8		
Konstanz	Stadt, Hintergrund									0.8	
Kreuzlingen	Stadt, Hintergrund									0.6	
Neuhausen a.Rhf. Galoebuck	Stadt, Hintergrund					0.6	0.5	0.4	0.5	0.4	
Wallisellen	Stadt, Hintergrund	1.3									
Wetzikon	Stadt, Hintergrund									0.5	
Winterthur Veltheim	Stadt, Hintergrund									0.5	0.6
Altstätten	Dorfzentrum								0.7		
Appenzell Feuerschau	Dorfzentrum						0.0	0.0			0.6
Arbon	Dorfzentrum	1.4		1.1		1.0		0.6			
Grabs	Dorfzentrum	1.5		1.2							
Heiden	Dorfzentrum		0.9		0.6		0.5				
Vaduz Austrasse	Dorfzentrum	1.7	1.3	1.2	1.0	0.9	0.7	0.8	0.6		
Weinfelden	Dorfzentrum								0.7		0.9
Ebnat-Kappel	Dorfzentrum, Staulage				0.7	0.8	0.5				
Flums	Dorfhintergrund									0.6	
Glarus	Dorfhintergrund	1.3				0.9	0.6	0.7	0.6		0.6
Knonau	Dorfhintergrund						0.7				
Mels	Dorfhintergrund				0.7						
Schlieren	Dorfhintergrund									0.6	
Tuggen	Dorfhintergrund		1.1		0.9		0.6				
Vaduz Landesbibliothek	Dorfhintergrund									0.5	0.6
Wettswil Weieraecher	Dorfhintergrund				0.8	0.7					
Wettswil Filderen	Ländlich, an Autobahn			1.1	0.9	0.8	0.6				
Hemmental	Ländlich, Hügelzone			0.7							
Höhenlinik Wald	Ländlich, Hügelzone	0.6		0.4	0.4	0.4	0.3	0.3		0.2	
St.Gallen Stueleaa.	Ländlich, Hügelzone								0.2	0.2	0.3
Weerswilen	Ländlich, Hügelzone	0.8	0.5		0.6	0.5	0.4	0.3	0.4		0.4
Braunwald	Dorf, Hochlage									0.3	

Tabelle 2: EC Jahresmittelwerte (Stichprobenkonzept)

eBC [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	Appenzell Feuerschau	Knonau Oberdorfstrasse	Mels Waltigasse	Opfikon Balsberg	Rapperswil-Jona Tuchelweier	Schellenberg Zollamt	Schlieren Güterstrasse	St.Gallen Bild	Wetswil Filderen	Wetswil Weieraacher	Wetzikon Turnhallenstrasse	Wil Rudenzburg
2007	Jan											
	Feb					1.59						
	Mrz					1.35		2.34				
	Apr					1.30		2.01	0.88			
	Mai					0.79		1.27				
	Jun					0.74						
	Jul								0.61			
	Aug							1.56	0.71			
	Sep								0.69			
	Okt								1.10			
	Nov								1.24			
	Dez							1.95	0.84			
2008	Jan							2.87	1.29			
	Feb					1.54		2.49	1.15			
	Mrz							1.13	0.50			
	Apr							1.41	0.57	0.59		
	Mai								0.54	0.50		
	Jun							1.15	0.47	0.46		
	Jul							1.00	0.45	0.45		
	Aug							1.09		0.52		
	Sep								0.65	0.74		
	Okt								0.90	0.87		
	Nov								1.08	1.12		
	Dez								1.05	1.18		
2009	Jan								1.28	1.42		
	Feb							2.02	1.20	1.25		
	Mrz							1.31	0.73	0.70		
	Apr								0.83	0.78		
	Mai								0.80	0.59		
	Jun								0.61	0.43		
	Jul								0.72	0.53		
	Aug								0.85	0.69		
	Sep								0.99			
	Okt			1.01					1.13			
	Nov			1.18					1.10			
	Dez			1.12					1.15			
2010	Jan			1.90					1.11	1.19		
	Feb			1.23					1.11	1.10		
	Mrz			0.84					0.76	0.66		
	Apr			0.83					0.65	0.55		
	Mai			0.62					0.44	0.32		
	Jun			0.67					0.57	0.44		
	Jul			0.64					0.58	0.46		
	Aug			0.65					0.53	0.38		
	Sep			0.85					0.66	0.55		
	Okt			1.00					0.95	0.83		
	Nov			1.10					0.74	0.64		
	Dez			1.32					1.05	1.02		
2011	Jan			1.68					0.93	0.92		
	Feb			1.84					1.41	1.25		
	Mrz			1.17					1.08	1.03		
	Apr			0.73					0.74	0.67		
	Mai			0.59					0.57	0.54		
	Jun			0.48					0.46	0.43		
	Jul			0.53					0.44	0.43		
	Aug								0.65	0.58		
	Sep	0.87							0.77	0.70		
	Okt	1.15							0.95	0.90		
	Nov	1.74							1.51	1.46		
	Dez	0.91							0.50	0.59		
2012	Jan	1.07							0.61			
	Feb	2.13							1.05			
	Mrz	1.12	0.89						0.77			
	Apr	0.59	0.44						0.46			
	Mai	0.63	0.39						0.47			
	Jun	0.58	0.37						0.50			
	Jul	0.54	0.39						0.52			
	Aug	0.64	0.50						0.58			
	Sep	0.68	0.59						0.61			
	Okt	0.74	0.79						0.72			
	Nov	1.06	0.90						0.69			
	Dez	1.02	0.85						0.61			
2013	Jan	1.21	1.07						0.75			
	Feb	1.07	1.01						0.72			
	Mrz	0.85	0.94						0.77			
	Apr	0.66							0.59			
	Mai	0.43							0.41			
	Jun	0.50							0.49			
	Jul	0.52							0.54			
	Aug	0.52							0.53			
	Sep	0.55							0.55			
	Okt	0.69							0.67			
	Nov	0.77							0.54			
	Dez								0.95			

Tabelle 3a: eBC Monatsmittelwerte für MAAP Standorte, Teil 1

eBC [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	Appenzell Feuerschau	Knonau Oberdorfstrasse	Mels Waltigasse	Opfikon Balsberg	Rapperswil-Jona Tuchelweier	Schellenberg Zollamt	Schlieren Güterstrasse	St.Gallen Bild	Wetswil Filderen	Wetswil Weieraecher	Wetzikon Turnhallenstrasse	Wil Rudenzburg
2014	Jan			1.66								
	Feb			1.47								
	Mrz			1.44								1.14
	Apr			1.15								0.90
	Mai			0.90								0.80
	Jun			0.87								0.68
	Jul			1.14								0.80
	Aug			1.14								0.81
	Sep			1.35								0.89
	Okt			1.49								1.02
	Nov			1.69								1.19
	Dez			1.25								1.04
2015	Jan			1.07							0.57	
	Feb			1.19	0.99		0.79				0.79	
	Mrz			0.95	0.76		0.60				0.53	
	Apr			0.70	0.43		0.36				0.30	
	Mai			0.84	0.35		0.29				0.24	
	Jun			0.76	0.35		0.30				0.24	
	Jul			0.80	0.37		0.35				0.26	
	Aug			0.93	0.43		0.40				0.30	
	Sep			0.77	0.41		0.37				0.29	
	Okt			1.03	0.70		0.56				0.55	
	Nov			1.06	0.80		0.62				0.53	
	Dez			1.54	1.20		1.04				0.97	
2016	Jan	0.87		1.05								
	Feb	0.53		0.83								
	Mrz	0.82		0.90								
	Apr	0.46		0.75								
	Mai	0.41		0.78								
	Jun	0.35		0.82								
	Jul	0.37		0.84								
	Aug	0.45		0.81								
	Sep	0.67		1.02								
	Okt	0.70		0.98								
	Nov	0.71		1.14								
	Dez	1.60		1.66								

Tabelle 3b: eBC Monatsmittelwerte für MAAP Standorte, Teil 2