



**CercI
Air**

Schweizerische Gesellschaft der Lufthygiene-Fachleute
Société suisse des responsables de l'hygiène de l'air
Società svizzera dei responsabili della protezione dell'aria
Swiss society of air protection officers

innet
Umweltmonitoring

HIGH VOLUME SAMPLER RINGVERSUCH



Vergleichskampagne im Winter 2017/2018 in Sempach für Feinstaubmessgeräte in der Schweiz

Version: 30.11.2018

Autoren: Hannah Wey, inNET Monitoring AG
Renato Mauri, inNET Monitoring AG
Christian Ruckstuhl, inNET Monitoring AG

Begleitung: CercI'Air Arbeitsgruppe QS Immissionen

inNET Monitoring AG

innet
Umweltmonitoring

Dätwylerstrasse 15 / CH-6460 Altdorf

T +41 41 500 50 40
info@innetag.ch
innetag.ch

Zusammenfassung

Im Winter 2017/2018 wurde in Sempach im Auftrag vom Bundesamt für Umwelt (BAFU) und der teilnehmenden Umweltfachstellen ein nationaler Ringversuch für gravimetrische Feinstaubmessungen durchgeführt. Das Ziel war, Messunsicherheiten zu erkennen und in der Folge die Messqualität aller beteiligten Institutionen weiter zu verbessern, um ein einheitliches Monitoringsystem zu gewährleisten. Es haben 12 Teilnehmer an den PM10 Vergleichsmessungen mit High Volume Samplern (HVS) teilgenommen. Davon haben 5 Institutionen auch die PM2.5 Immissionen gemessen. Parallel zu den HVS-Messungen waren ein Low Volume Sampler (LVS) und ein Online-Monitor (Fidas 200S) im Einsatz.

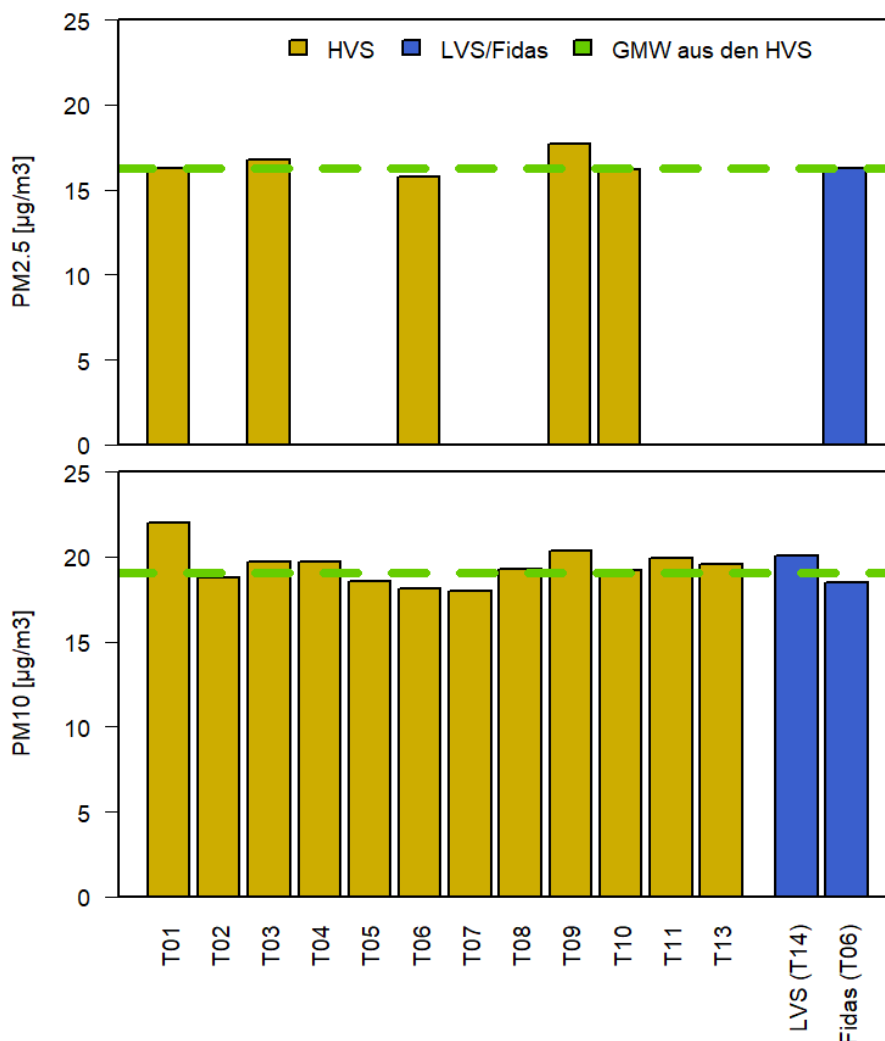


Abbildung 1: Zusammenfassung der Messresultate pro Teilnehmer (T). Die Werte in Gelb wurden mit einem High Volume Sampler ermittelt. Aus diesen Messungen wurde der Vergleichsgesamtmittelwert (GMW, grün) berechnet. Zusätzlich fand je eine Messung mit einem Low Volume Sampler und einem Fidas statt (blau). Einige Teilnehmer messen nicht nur PM10, sondern auch PM2.5 (obere Grafik).

Die HVS Gerätemittelwerte liegen zwischen 18.00 und 21.97 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ für PM10 bzw. 15.74 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ bis 17.71 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ für PM2.5. Die über alle Teilnehmer empirisch bestimmte Messunsicherheit für einen PM10-Tagesmittelwert liegt bei 1.15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, was im Tagesmittel-Grenzwertbereich für PM10 etwa 2 % ausmacht und eine deutliche Verbesserung zu 2001 anzeigt. Generell sinkt die Unsicherheit mit steigenden Feinstaubkonzentrationen leicht, aber nicht bei allen Teilnehmern. Bei Werten $>25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ wurde eine Streuung von -5.4 % bis +5.4 % Abweichung vom Vergleichstagesmittelwert beobachtet. Damit werden die Immissionsmessempfehlungen des BAFU (+/- 15 %) sehr gut erfüllt.

Verbesserungen in Bezug auf Volumenflussprüfung, Filterkonditionierung, Datenlieferung und Datenvalidierung sind dennoch möglich und angebracht. Konkret können aufgrund des Ringversuchs folgende Optimierungsmöglichkeiten zum Betrieb von HVS abgegeben werden:

- Waage nach Norm EN 12341
- Filterkonditionierung nach Norm EN 12341
- Umgang mit Messwerten kleiner 5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$: Der effektiv gemessener Wert wird geliefert, um systematische Fehler zu vermeiden.
- Umgang mit Messwerten PM2.5 > PM10: Der effektiv gemessener Wert wird geliefert, um systematische Fehler zu vermeiden.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	- 4 -
2	Begriffsdefinitionen.....	- 5 -
3	Methodik	- 6 -
3.1	Standort und Aufbau der Messinstrumente	- 6 -
3.2	Messprogramm	- 9 -
3.3	Wetterstation	- 12 -
3.4	Volumenflussüberprüfung	- 12 -
3.5	Datenauswertung.....	- 12 -
4	Resultate.....	- 15 -
4.1	Meteorologische Situation während der Versuchsperiode	- 15 -
4.2	Volumenflussüberprüfung	- 16 -
4.3	Zeitliche Betrachtung der Feinstaubdaten der High Volume Sampler.....	- 17 -
4.4	Auswertung der Teilnehmer.....	- 20 -
4.4.1	PM10 Messungen.....	- 20 -
4.4.2	PM2.5 Messungen.....	- 22 -
4.5	Low Volume Sampler.....	- 23 -
4.6	Fidas.....	- 23 -
5	Diskussion.....	- 24 -
6	Anhang	- 27 -
6.1	Low Volume Sampler.....	- 29 -
6.2	Fidas.....	- 30 -
6.3	Abweichungen D_s und $D_{s,rel}$	- 31 -
6.4	Tägliche Windrosen.....	- 32 -

1 Einleitung

Die Luftreinhalte-Verordnung (LRV) legt unter anderen für die Feinstaubfraktionen PM₁₀ und PM_{2.5} Grenzwerte fest, welche in der Schweiz nach wie vor zeitweise und abhängig vom Standort überschritten werden. Daher und zur Überwachung der Trendentwicklung ist ein Monitoring der Feinstaubkonzentration in der Zukunft weiterhin angezeigt.

Um zuverlässige und vergleichbare Datensätze zu generieren ist es notwendig, dass solche Messungen mit einem hohen Qualitätsstandard durchgeführt werden. Zum Erreichen dieser Standards sollen die Messungen gemäss aktuell gültigen Normen und Empfehlungen durchgeführt werden. Deshalb wurde ein nationaler Ringversuch veranlasst, in dessen Rahmen untersucht wurde, ob diese Qualitätsstandards in der Schweiz eingehalten und die Messresultate von allen beteiligten Institutionen mit der nötigen Genauigkeit ermittelt werden. Ähnliche Versuche wurden bereits in der Vergangenheit beispielsweise vom Joint Research Center¹, von der EMPA² oder in kleinerem kantonalem Rahmen³ durchgeführt. Im Bericht der EMPA wurde 2001 eine Messunsicherheit von 3.4 µg/m³ für den Tagesmittelwert der High Volume Sampler (HVS) PM₁₀-Messungen berechnet. Damit lag die Messunsicherheit im Grenzwertbereich unter 10 %. Allerdings wird im selben Bericht erwähnt, dass vorhergehende Messungen unerwartet grosse Abweichungen gezeigt hatten.

Dieser Ringversuch wurde im Winter 2017/2018 von der inNET Monitoring AG im Auftrag des Bundesamts für Umwelt (BAFU) und der teilnehmenden Umweltfachstellen unter Aufsicht der Cercl'Air Arbeitsgruppe «QS Immissionen» durchgeführt. Die Ziele dieses Ringversuchs unter realen Umweltbedingungen waren das Erkennen von Fehlern bei den HVS-Messungen, sowie das Verifizieren der Messunsicherheiten. Dabei sollte die ganze Prozesskette von den HVS-Einstellungen, Filterexposition und -handling, Transport, Konditionierung, Wägung und Datenlieferung abgedeckt werden.

Die Untersuchungen wurden für PM₁₀ und für PM_{2.5} durchgeführt. Dieser Ringversuch beschränkt sich auf das gravimetrische Messverfahren. Informativ wurde parallel zu den HVS-Messungen ein Low Volume Sampler (LVS) und ein Online-Monitor (Fidas 200S) betrieben.

¹ Evaluation of the Field Comparison Exercise for PM₁₀ and PM_{2.5}. Ispra. February 13th – April 9th, 2015. JRC Technical Report.

² Immissionsringversuch Feinstaub PM₁₀ 2001 in Dübendorf, Zusammenfassung der Resultate im Auftrage des Cercl'Air. EMPA. 2001.

³ Wägevergleich für HiVol-Glasfaser-Filter. Ostluft, ANU Graubünden, AfU Aargau und EMPA. 2016.

2 Begriffsdefinitionen

BAFU	Bundesamt für Umwelt
LRV	Luftreinhalte-Verordnung, SR 814.318.142.1
PM10	<p>Staubpartikel mit einem Durchmesser von bis zu 10 µm. Für PM10 gilt gemäss Luftreinhalte-Verordnung (LRV) ein Tagesmittelgrenzwert von 50 µg/m³, welcher maximal dreimal pro Jahr überschritten werden darf und ein Jahresmittelgrenzwert von 20 µg/m³.</p>
PM2.5	<p>Staubpartikel mit einem Durchmesser von bis zu 2.5 µm. Die Menge an PM2.5 ist also per Definition immer ein Teil von PM10. Der Jahresmittelgrenzwert von PM2.5 ist seit dem 1. Juni 2018 in der LRV geregelt, wobei der PM2.5-Jahresmittelgrenzwert von 10 µg/m³ nicht überschritten werden darf.</p>
Gravimetrische Feinstaubmessungen	<p>Bei diesem Verfahren wird Feinstaub auf einem Filter abgeschieden und anschliessend gewogen. Für die gravimetrischen Feinstaubmessungen in der Schweiz sind zwei Dokumente entscheidend:</p> <ul style="list-style-type: none">• die BAFU Immissionsmessempfehlung «Immissionsmessempfehlung von Luftfremdstoffen, Messempfehlungen, BAFU, 2004»• die Europäische Norm EN 12341:2014 «Aussenluft – Gravimetrisches Standardmessverfahren für die Bestimmung der PM10 oder PM2.5-Massenkonzentration des Schwebstaubes»
HVS	High Volume Sampler. Diese Methode gilt in der Schweiz als Referenzverfahren zur Bestimmung der Feinstaubkonzentration.
LVS	Low Volume Sampler. Im Unterschied zum HVS ist das gefilterte Luftvolumen viel kleiner, das heisst anstatt 500 l/min nur knapp deren 40 l/min.

3 Methodik

3.1 Standort und Aufbau der Messinstrumente

Alle Messinstrumente wurden auf dem TCS Campingplatz in Sempach aufgestellt (Abbildung 2). Dieser Standort erfüllt die folgenden Anforderungen:

- Es handelt sich bezüglich Topographie und regionaler Landnutzung um einen typischen Standort im Mittelland.
- Die Autobahn A2 liegt in 1.5 km Entfernung auf der anderen Seite der Gemeinde und ist damit weit genug entfernt, dass die verbundenen Emissionen nicht unmittelbar messbar sind, sondern als Hintergrundbelastung erscheinen.
- Es befinden sich keine grösseren Emittenten in der näheren Umgebung.
- Die Anlagen sind vor Vandalismus geschützt, da der Campingplatz im Winter ausser Betrieb ist.
- Es gibt keine grossen Bäume in unmittelbarer Umgebung.

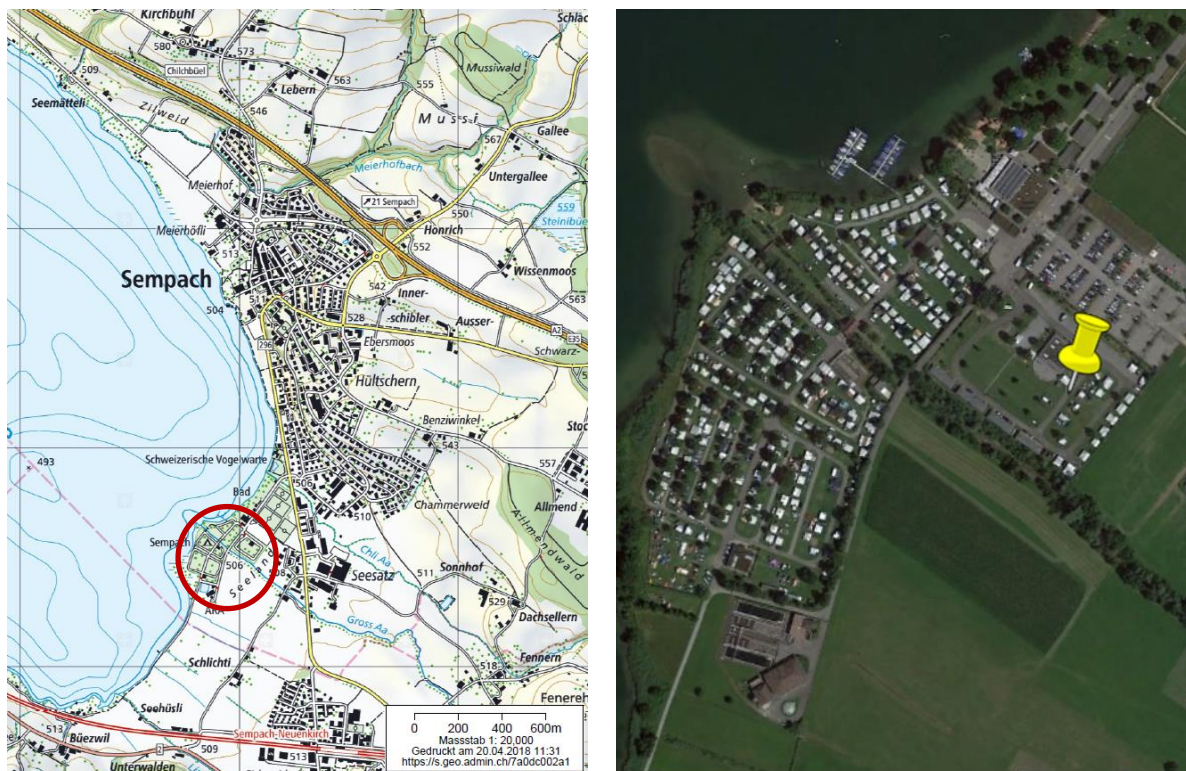


Abbildung 2: Der TCS Campingplatz in Sempach als gut geeigneter Standort für den Ringversuch im Winter 2017/2018.

Die HVS wurden in zwei Reihen und in einem Abstand von mindestens zwei Metern auf Holzpaletten aufgestellt (Abbildung 4).

Die DIGITEL High Volume Sampler DHA-80 sind vollautomatische Geräte zur Sammlung von Staub- und Aerosolteilchen zur späteren Bewertung und Analyse (gravimetrische und analytische Verfahren). Der DIGITEL HVS DHA-80 verfügt über ein Magazin mit 15 Filtern, die in Filterhalter eingespannt sind. Diese werden zur vorprogrammierten Zeit automatisch in die Beströmungsposition eingewechselt. Die Geräte können über verschiedene Schnittstellen in automatische Überwachungsnetzwerke integriert

werden. Eingebaut sind die Staubprobensammler in einem Feldgehäuse, das zum direkten Aufstellen im Freien geeignet ist.

Die einzelnen Bestandteile des HVS sind in Abbildung 3 dargestellt: Die Luftanströmung erfolgt in einer Höhe von 1.5-2.5 Metern. Die Luft wird durch einen Vorabscheider (1) PM10/PM2.5/PM1 mit Entnahmerohr senkrecht von oben nach unten durch einen in die Beströmungskammer (2) eingelegten Filter (3) gesogen. Der obere Teil der Beströmungskammer funktioniert wie ein Diffusor mit regelmässigem Querschnitt und sorgt für eine gleichmässige Belegung des bestaubten Rundfilters. Durch den relativ grossen Filterdurchmesser beträgt die Durchflussgeschwindigkeit der gesammelten Luft durch den Filter nur 0.5 m/s (bei 500 l/min). Der Druckabfall über den Filter ist mit 130 mbar limitiert, wodurch das Reißen von stark belegten oder nassen Filtern verhindert wird. Der Wechsel der Filter erfolgt beim DIGITEL HVS DHA-80 automatisch. Hinter dem Filter wird die geförderte Luftmenge in einem Durchflussmesser mit Schwebekörper (5) gemessen. Die Schwebekörper-Position wird mit der Doppel-Lichtschranke (5a) optisch erfasst. In Verbindung mit der Regelelektronik (5b, 5c) wird durch Drehzahlsteuerung die Leistung des Saugaggregates (6) so geführt, dass die Luftmenge den vorgegebenen Sollwert einhält. Vor dem Durchflussmesser wird der Druck und die Temperatur (8) der Luft zur Berechnung des gesammelten Volumens erfasst. Die Luft verlässt das Gerät geräuscharm über die Schalldämpfung (7). Das Sammelprotokoll listet die Sammelzeit, das effektive und das standardisierte Luftvolumen der Messluft, das durch den Filter gefördert wurde, die Durchschnittswerte des Drucks und der Temperatur im Messsystem sowie die Status- und Störungsmeldungen auf. ⁴

⁴ Bedienungsanleitung Version Hxx.50. März 2014. DIGITEL Elektronik.

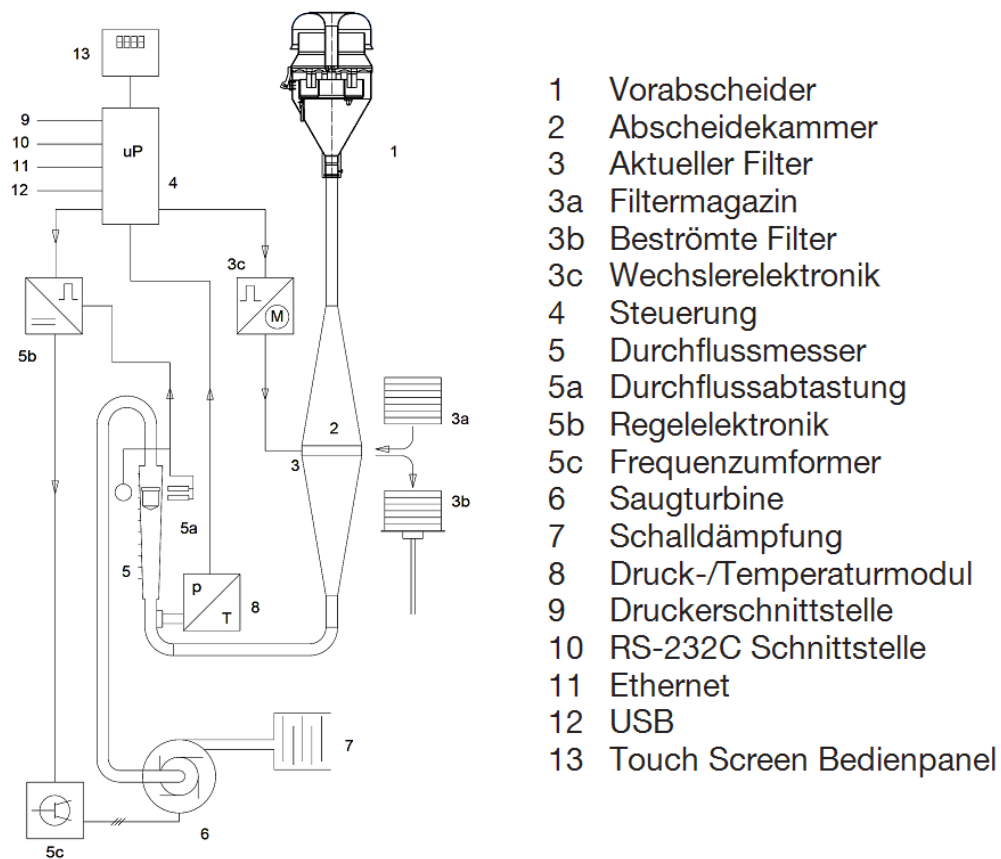


Abbildung 3: Schematische Darstellung vom Aufbau eines High Volume Sampler (HVS) Messgeräts.



Abbildung 4: Der Aufbau der Messeinrichtungen des Ringversuchs.

3.2 Messprogramm

Das Programm wurde von der inNET Monitoring AG koordiniert, welche in der Folge als «Messstelle» bezeichnet wird. Der Ringversuch dauerte sechs Wochen bzw. drei HVS Serien à zwei Wochen:

- Messbeginn: Donnerstag, 18. Januar 2018
- Erster Austausch der Filter: Mittwoch, 31. Januar 2018
- Zweiter Austausch der Filter: Mittwoch, 14. Februar 2018
- Messende: Mittwoch, 28. Februar 2018

Ursprünglich war eine Messdauer von vier Wochen geplant. Da in der ersten Messperiode meteorologisch bedingt sehr tiefe Immissionswerte gemessen wurden, wurde die Messdauer um eine Periode verlängert.

Insgesamt nahmen 13 Teilnehmer am Versuch teil, welche in der Folge von «T01» bis «T14» durchnummeriert werden, um die Anonymität zu gewährleisten. Teilnehmer «T12» hat sich im Laufe der Vorbereitungen zurückgezogen, weshalb die Daten dieser Gruppe nicht vorhanden sind. Es wurden 19 Messreihen erstellt:

- 12 Messreihen mit einem High Volume Sampler für PM10
- 5 Messreihen mit einem High Volume Sampler für PM2.5
- 1 Messreihe mit einem Low Volume Sampler für PM10
- 1 Messreihe mit einem Online Monitor (Fidas 200S)

Diese Messreihen werden im Kapitel 4 getrennt präsentiert und ausgewertet. Da dieser Versuch sich auf das ganze Messverfahren bezieht, hatten die Versuchsteilnehmer folgende Aufgaben:

- Transport, Konfiguration und Inbetriebnahme des HVS am Messort
- Die Geräte sind einsatzbereit, kalibriert und gewartet.
- Zweimaliger Austausch der Filter während der Messkampagne
- Konditionierung und Gravimetrie der HVS-Filter
- Falls nötig: Störungsbehebungen
- Ein Blindwert pro Serie
- Deinstallation und Rücktransport HVS
- Lieferung der berechneten Konzentrationen sowie der Metadaten

Die Messstelle ihrerseits hatte folgende Verantwortung:

- Volumenstromprüfung vor Messbeginn und nach Messende
- Tägliche Kontrolle auf korrekten automatischen Filterwechsel und Information der Teilnehmer bei Störungen

Alle Einstellungen der Teilnehmer sind in Tabelle 1 und Tabelle 2 zusammengefasst.

Tabelle 1: Konfigurationen Teil 1: Filter, Transport, HVS, Bezugsbedingungen.

	FILTER		TRANSPORT		HVS		BEZUGSBEDINGUNGEN VOLUMENKALIBRATION				
Nr.	Material	Hersteller	Art	Filterverpackung	Typ	Serien- nummer	Jahr	Kühlsystem	Temperatur (1.7°C)	Druck (962.7 hPa)	Konzentrationsberechnung
1PM10	Glasfaser	Munktell	PW	Filterhalter & Box	DHA-80	673	2001	Nein	1.7 °C	962.7 hPa	Konstantes Volumen
1PM2.5	Glasfaser	Munktell	PW	Filterhalter & Box	DHA-80	378-N	1995	Nein	1.7 °C	962.7 hPa	Konstantes Volumen
2PM10	Glasfaser	Munktell	PW	Filterhalter & Box	DHA-80	1174	ca. 2010	Nein	1.7 °C	962.7 hPa	Konstantes Volumen
3PM10	Glasfaser	Sartorius	Post	Filterhalter & Box	DHA-80	1583	2011	Nein	1.7 °C	962.7 hPa	Konstantes Volumen
3PM2.5	Glasfaser	Sartorius	Post	Filterhalter & Box	DHA-80	1634	2012	Nein	1.7 °C	962.7 hPa	Konstantes Volumen
4PM10	Glasfaser	Sartorius	PW	Filterhalter & Box	DHA-80	1210	2009	Nein	1.7 °C	963 hPa	Effektives Tagesvolumen
5PM10	Glasfaser	Munktell	PW	Filterhalter & Box	DHA-80	5118	2018	Ja	1.7 °C	962.7 hPa	Konstantes Volumen
6PM10	Glasfaser	Munktell	PW	Filterhalter & Box	DHA-80	747	2008	Nein	1.7 °C	962.7 hPa	Konstantes Volumen
6PM2.5	Glasfaser	Munktell	PW	Filterhalter & Box	DHA-80	1822	2018	Nein	1.7 °C	962.7 hPa	Konstantes Volumen
7PM10	Glasfaser	Munktell	PW	Filterhalter & Box	DHA-80	5110	2017	Ja	1.7 °C	962.7 hPa	Konstantes Volumen
8PM10	Glasfaser	Sartorius	Post	Pergaminbeutel	DHA-80	1755	2015	Nein	1.7 °C	962.7 hPa	Effektives Tagesvolumen
9PM10	Quarzfaser	Pall (CH) AG	PW	Filterhalter & Box	DHA-80	1816	2017	Nein	9.0 °C	950 hPa	Effektives Tagesvolumen
9PM2.5	Quarzfaser	Pall (CH) AG	PW	Filterhalter & Box	DHA-80	1817	2017	Nein	9.0 °C	950 hPa	Effektives Tagesvolumen
10PM10	Glasfaser	Sartorius	Post	Pergaminbeutel & Karton	DHA-80	1701	2013	Nein	1.7 °C	962.7 hPa	Effektives Tagesvolumen
10PM2.5	Glasfaser	Sartorius	Post	Pergaminbeutel & Karton	DHA-80	1790	2016	Nein	1.7 °C	962.7 hPa	Effektives Tagesvolumen
11PM10	Glasfaser	Munktell	PW	Filterhalter & Box	DHA-80	1619	2009	Nein	1.7 °C	962.7 hPa	Konstantes Volumen
13PM10	Glasfaser	Munktell	PW	Filterhalter & Box	DHA-80	1767	2016	Nein	1.7 °C	962.7 hPa	Konstantes Volumen
	LVS										
14PM10	Glasfaser	Munktell	PW	Filterhalter & Box	PNS 18-DM-6.1	PNS18: 10509 LVS 6.1: 00834	2016	Ja	20.9 °C – 21.1 °C	950 hPa – 951 hPa	Effektives Tagesvolumen

Tabelle 2: Konfigurationen Teil 2: Filterkonditionierung, Waage und Wägeraum.

Nr.	FILTERKONDITIONIERUNG				WAAGE			WÄGERAUM	
	Ort	Temperatur	Feuchte	Dauer	Typ	Ablesbarkeit (≤ 10 µg)	Wiederholbarkeit	Temperatur (19-21°C)	Rel. Feuchte (45-50 %)
1PM10	Klimakammer	22 °C ± 2 °C	50 % ± 5 %	48 h	Mettler-Toledo XP 205DR	10 µg	15 µg	22 ± 2 °C	50 ± 5 %
1PM2.5	Klimakammer	22 °C ± 2 °C	50 % ± 5 %	48 h	Mettler-Toledo XP 205DR	10 µg	15 µg	22 ± 2 °C	50 ± 5 %
2PM10	Klimatisierter Raum	21 °C ± 1°C	50 %	48 h	Mettler Toledo XPE 105	10 µg	2 µg	21 °C	50 %
3PM10	Labor nicht klimatisiert	20 °C ± 2 °C	0 % (Trocknung in Exsikkator)	Mind. 96 h	Mettler Toledo XP 204	10 µg	15 µg	20 °C	50 %
3PM2.5	Labor nicht klimatisiert	20 °C ± 2 °C	0 % (Trocknung in Exsikkator)	Mind. 96 h	Mettler Toledo XP 204	10 µg	15 µg	20 °C	50 %
4PM10	Klimakammer	21 °C ± 1 °C	47 % ± 3 %	Mind. 48 h	Mettler Toledo XPE 205DR	10 µg	20 µg	20 – 22 °C	45 – 50 %
5PM10	Klimakammer	22 °C ± 2°C	90 % ± 5 % (Vorkond.) 50 % ± 5 % (Wägebed.)	96 h 48 h	Mettler Toledo XP 205DR	10 µg	15 µg	22 °C	50 %
6PM10	Klimatisierter Raum	21.6 °C – 21.8 °C	49.2 % - 51.7 %	Mind. 48 h	Mettler AT 200	100 µg	40 µg	22 °C	50 %
6PM2.5	Klimatisierter Raum	21.6 °C – 21.8 °C	49.2 % - 51.7 %	Mind. 48 h	Mettler AT 200	100 µg	40 µg	22 °C	50 %
7PM10	Klimakammer	21 °C	50 %	48 h	Mettler Toledo XPE 105	10 µg	2 µg	21 °C	50 %
8PM10	Klimatisierter Raum	20 °C ± 1°C	50 % ± 2.5 %	48 h	Mettler Toledo AT 21	1 µg	2 µg	20 °C ± 1 °C	50 % ± 2.5 %
9PM10	Klimatisierter Raum	20 °C ± 1°C	> 90 % 45 – 50 %	96 h 96 h	Mettler XP205	10 µg	15 µg	20 °C ± 1 °C	45 – 50 %
9PM2.5	Klimatisierter Raum	20 °C ± 1°C	> 90 % (Vorkond.) 45 – 50 % (Wägebed.)	96 h 96 h	Mettler XP205	10 µg	15 µg	20 °C ± 1 °C	45 – 50 %
10PM10	Klimatisierter Raum	20 °C ± 2°C	50 % ± 5 %	48 h	Mettler AT 21 Comparator	1 µg	1.4 µg	20 °C ± 2°C	50 % ± 5 %
10PM2.5	Klimatisierter Raum	20 °C ± 2°C	50 % ± 5 %	48 h	Mettler AT 21 Comparator	1 µg	1.4 µg	20 °C ± 2°C	50 % ± 5 %
11PM10	Klimakammer	20 °C ± 1°C	50 % ± 1 %	48 h	Mettler Toledo XP 205	10 µg	15 µg	21 °C ± 0.7°C	50.7 % ± 4.5 %
13PM10	Laborkapelle mit konstanter Feuchtigkeit	23 °C ± 2°C	50 % ± 3 %	Mind. 48 h	Mettler Toledo AT 261	10 µg	15 µg	23 °C	50 %
14PM10	Klimakammer	Nicht überwacht	Nicht überwacht	168 h + 240 h	Mettler Toledo XS 205 DR	10 µg	10 µg	20 °C – 21 °C	45 % - 55 %

3.3 Wetterstation

Der Ringversuch wurde von Meteomessungen begleitet. Gemessen wurde der Luftdruck, die Lufttemperatur, die relative Luftfeuchtigkeit, sowie die Windrichtung und -geschwindigkeit vor Ort. Für die Windrosen wurden die 10-Minuten-Werte der geschwindigkeitsgewichteten Windsrichtung sowie der skalaren Windgeschwindigkeit herangezogen. Die Temperatur, die relative Feuchte und der Luftdruck sind als Tagesmittel dargestellt. Die Daten für den Niederschlag werden von einer benachbarten Station in Luzern (LUZ) von MeteoSchweiz genutzt und sind ebenfalls als Tageswerte gezeigt.

3.4 Volumenflussüberprüfung

Bei Messbeginn und -ende wurde von der Messstelle eine Volumenflussüberprüfung aller HVS Messgeräte durchgeführt. Eine Volumenflussüberprüfung des LVS war nicht möglich. Die Messung wurde mit Hilfe des Turbinenradialradgaszählers (Eigenbau des «Umwelt- und Gesundheitsschutz (UGZ) der Stadt Zürich⁵⁾ und der entsprechenden Standardarbeitsanweisung⁶⁾ durchgeführt. Die Temperatur- und Luftdruckbedingungen zu Messbeginn und Messende sind in Tabelle 3 ersichtlich. Der Volumenfluss der HVS wurde auf 500 l/min bei den gewählten Bezugsbedingungen eingestellt.

Tabelle 3: Übersicht der meteorologischen Verhältnisse an den beiden Tagen der Volumenflussüberprüfung.

	Temperatur	Luftdruck [hPa]
Messbeginn	T1 = 4.81 °C = 277.96 K	P1 = 952.74
Messende	T2 = -7.53 °C = 265.62 K	P2 = 959.50
Referenz für Normierung	T _{ref} = 1.7 °C = 274.85 K	P _{ref} = 962.7

Bei der Normierung auf die Referenzbedingungen (Tabelle 3) muss beachtet werden, dass die Flussregelung des HVS selbst temperatur- und druckabhängig ist (pers. Kommunikation mit Thomas von Allmen, Umwelt- und Gesundheitsschutz Stadt Zürich), da es sich um ein Rotameter handelt. Die Formel für die Normierung ist:

$$V_{\text{ref}} = V_{\text{gemessen}} * \text{Korrekturfaktor} = V_{\text{gemessen}} * \sqrt{T_{\text{gemessen}}/P_{\text{gemessen}} * P_{\text{ref}}/T_{\text{ref}}}$$

3.5 Datenauswertung

Die Feinstaubmessungen liegen als Tagesmittelwerte der PM10 bzw. PM2.5 Konzentration in µg/m³ vor. Die Daten wurden getrennt nach PM10 und PM2.5 und gemäss folgender Beschreibung mit der Software R ausgewertet und in einem späteren Schritt miteinander verglichen. Weiter wurde der Low

⁵ Kalibrierzertifikat Nr. 135-12816. Turbinenradialrad-Gaszähler. Eidgenössisches Institut für Metrologie METAS. 2017.

⁶ Ostluft. Probenahmeflusskalibration des Digital DHA 80 HiVol-Sammlers für PM10 - Messungen mit einem Turbinenradialradgaszähler. OL-BSOP23 V.1.3. Verfasser: Thomas von Allmen. 2015.

Volume Sampler (T14) nicht in die PM10 Auswertung miteinbezogen, sondern in einem getrennten Verfahren analysiert. Dasselbe gilt für die Daten des Fidas 2005.

Vereinheitlichung der Datenlieferung

Nicht alle Datensätze waren vollständig. Teilweise gab es technische Probleme beim Filterwechsel. Diese Werte wurden in der Auswertung nicht berücksichtigt, sondern als Lücken erfasst.

Boxplotanalyse und Beseitigen der Ausreisser

In einer Boxplotanalyse (Abbildung 5) der Tageswerte (x) wurden der Median (M), das obere und untere Quartil (Q1 und Q3), der untere und obere Whisker (W1 und W3) sowie die Ausreisser (A) bestimmt. Die Ausreisser sind definiert als:

$$A = x < W1 \mid x > W3$$

$$W1 = Q1 - 1.5 \cdot IQA$$

$$W3 = Q3 + 1.5 \cdot IQA$$

$$IQA = Q3 - Q1$$

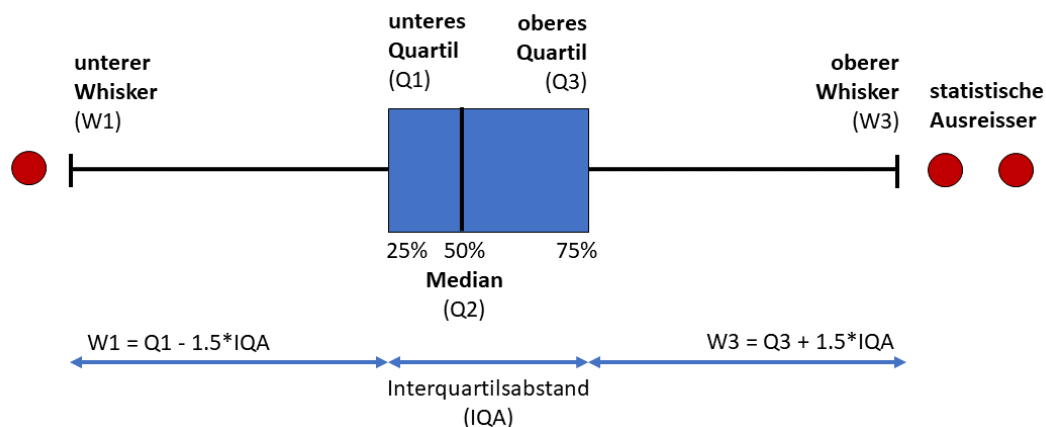


Abbildung 5: Graphische Erläuterungen zur Boxplotanalyse und zur Beseitigung der statistischen Ausreisser.

Bestimmung des Gerätemittelwertes G_n (Abbildung 6)

Es wurden die Gerätemittelwerte G_n berechnet, welche die durchschnittlich gemessene Feinstaubbelastung pro Teilnehmer über die ganze Messperiode darstellen. Diese Werte haben keine physikalische Bedeutung, sondern werden für den Vergleich der Teilnehmer untereinander verwendet. Bei grossen Datenlücken eines Teilnehmers ist dieser Vergleich allerdings nicht mehr aussagekräftig. Die Ausreisser wurden bei der Berechnung nicht entfernt (Abbildung 6). «n» steht in der Folge für die Anzahl Teilnehmer ($n = 12$ bzw. $n = 5$ für PM10 bzw. PM2.5) und «t» für die Anzahl Tage, an denen gemessen wurde ($t = 42$).

$$G_n = \frac{\sum_{t=1}^t x(t,n)}{t}$$

Vergleichstagesmittelwerte R_t

Es wurden die Vergleichstagesmittelwerte R_t aller Einzelmesswerte (x) der Teilnehmer pro Tag (t) berechnet. Die Ausreisser wurden bei dieser Berechnung aus dem Datensatz entfernt.

$$R_t = \frac{\sum_{n=1}^n x(t,n)}{n}$$

Diese Vergleichstagesmittelwerte gelten als die konventionell richtigen täglichen Feinstaubwerte in $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Vergleichsgesamtmittelwert (GMW)

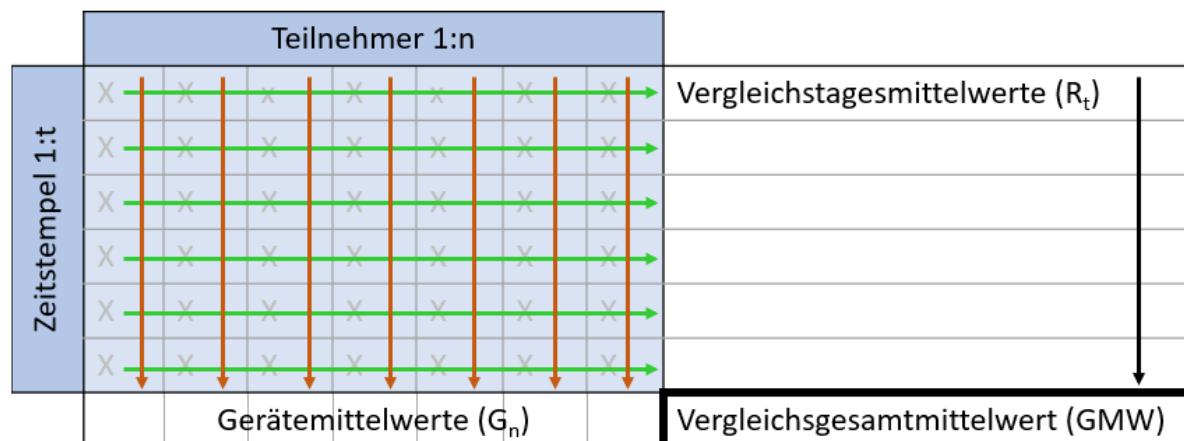
Der Vergleichsgesamtmittelwert (GMW) ist der Mittelwert aller Vergleichstagesmittelwerte R_t (Abbildung 6). Dieser ist nicht identisch mit dem Mittelwert aller Gerätemittelwerte G_n . Der Unterschied der zwei Berechnungsmethoden erklärt sich mit den fehlenden Einzelwerten («NA») und dem Entfernen der Ausreisser.

Abweichungen vom Vergleichstagesmittelwert pro Teilnehmer

Die mittlere Abweichung D_n pro Teilnehmer wurden sowohl absolut als auch prozentual berechnet. Dabei wurde zuerst die Differenz jedes Messwerts $x(n,t)$ zum jeweiligen Vergleichstagesmittelwert R_t berechnet, um dann den Mittelwert der Differenzen zu bestimmen.

$$\text{absolute Abweichung: } D_{n, \text{abs}} [\mu\text{g}/\text{m}^3] = \frac{1}{t} * \sum_{t=1}^t x(n,t) - R_t$$

$$\text{relative Abweichung: } D_{n, \text{rel}} [\%] = \frac{1}{t} * \sum_{t=1}^t \frac{[x(n,t) - R_t]}{R_t} * 100$$



→ Berechnung des Mittelwerts (Ausreisser entfernt / Ausreisser nicht entfernt)

Abbildung 6: Veranschaulichung der Berechnungen.

4 Resultate

4.1 Meteorologische Situation während der Versuchsperiode

Die Mitteltemperaturen lagen zu Versuchsbeginn am 18. Januar 2018 bei etwa 5 Grad. Dazu herrschte eine schwache Brise aus Nordwesten als Ausläufer des Sturmtiefs «Evi», welches zwei Tage zuvor gewütet hatte. An mehreren aufeinanderfolgenden Tagen wurde Niederschlag registriert. Anfang Februar nahm der Luftdruck stark ab, worauf die Temperatur auf den Gefrierpunkt sank, begleitet von einem erneuten Niederschlags-Ereignis. Nach zwei wärmeren Tagen Mitte Februar, wiederum begleitet von Regenereignissen und hoher Luftfeuchtigkeit, gab es einen Temperatursturz auf bis zu -10 Grad. Diese kalten Temperaturen gingen einher mit dem Aufkommen von Wind aus Nordosten (Bise) um die 15 km/h und einer sinkenden Luftfeuchtigkeit.

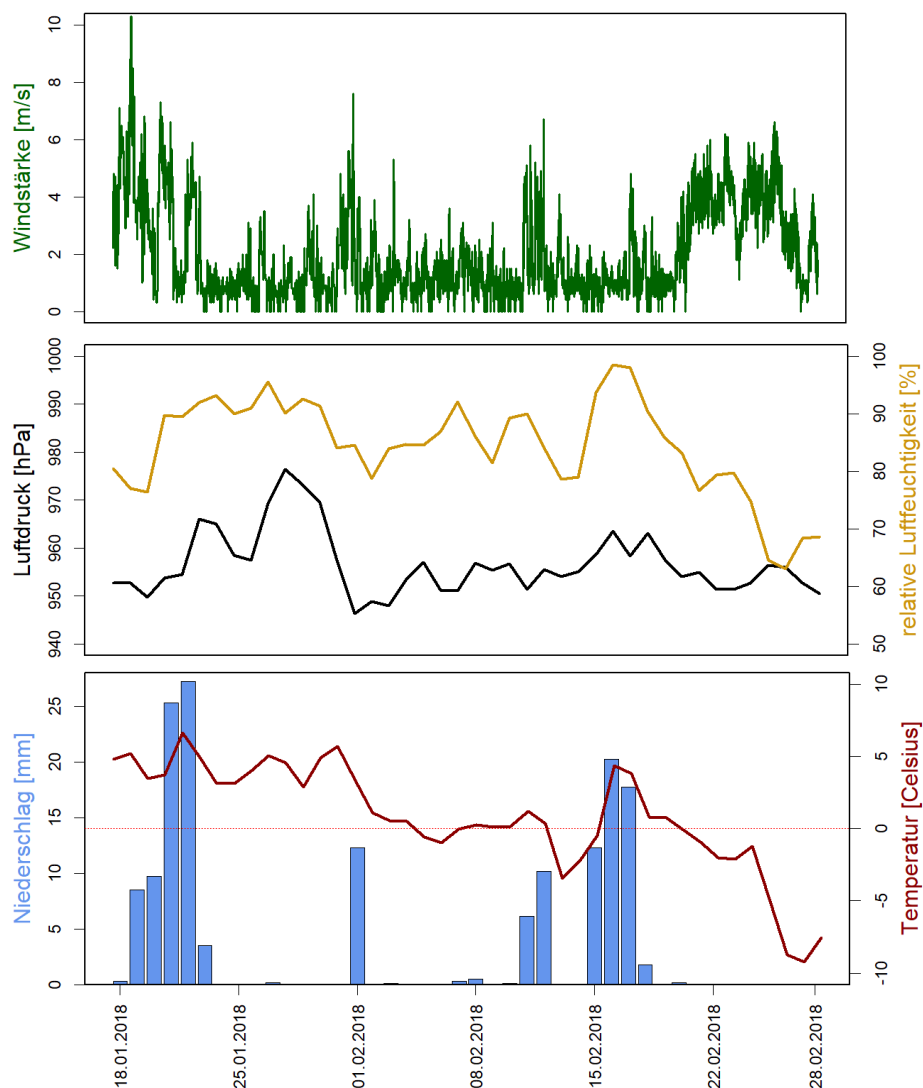


Abbildung 7: Die Wind- (grün), Luftdruck- (schwarz), Luftfeuchte- (gelb) und Temperaturmessungen (rot) zur Versuchszeit in Sempach und die Niederschlagsmessungen (blaue Balken) zur gleichen Zeit in Luzern. Für den Wind wurden 10 min Werte verarbeitet, die restlichen Daten sind in täglicher Auflösung dargestellt.

Die Windrose zeigt, dass die stärkeren Winde vor allem aus dem Nordwesten und Nordosten kommen. Bei Schwachwind werden auch südöstliche Windrichtungen registriert. Die Grafiken mit den täglichen Windrosen sind im Anhang angefügt.

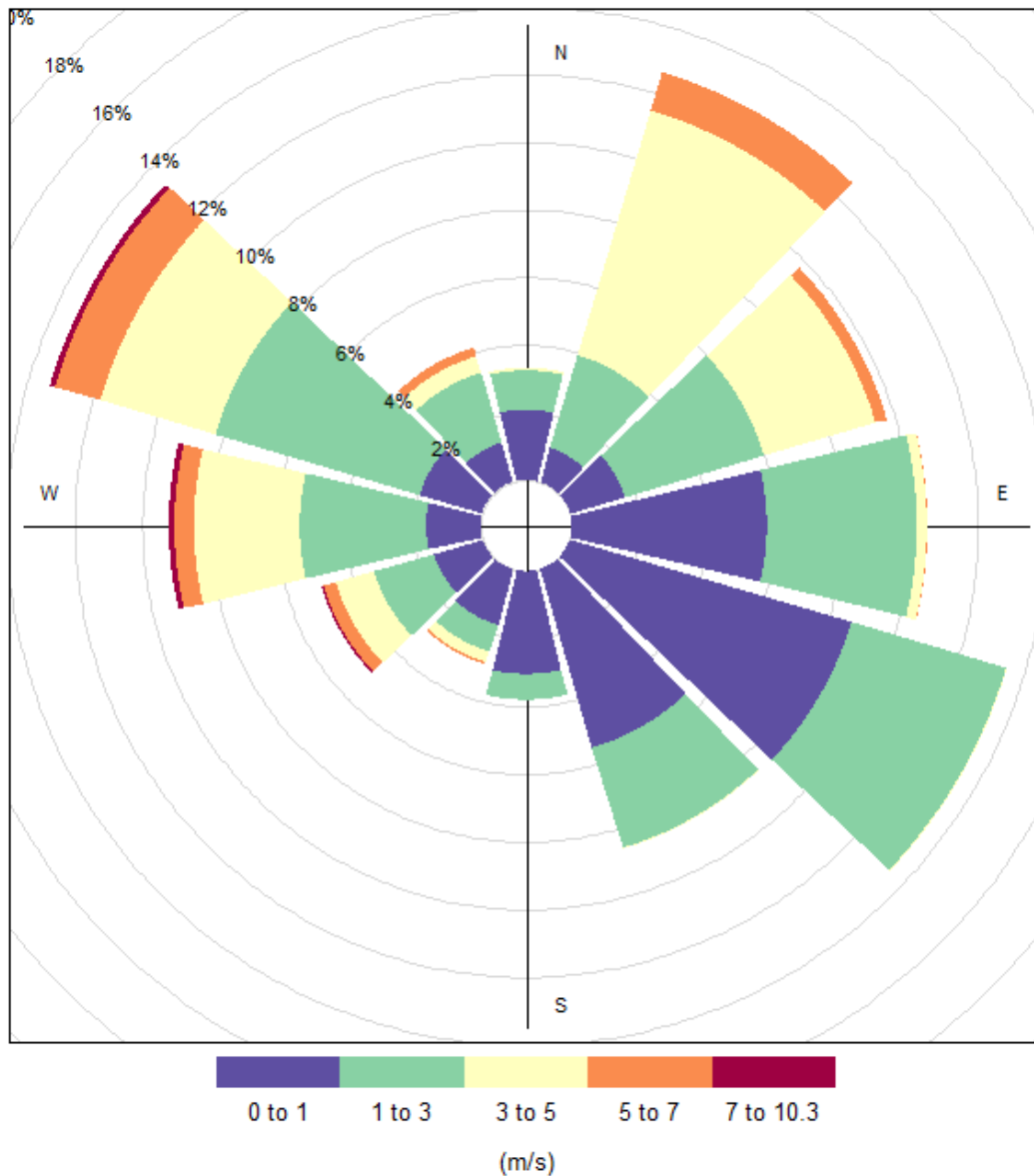


Abbildung 8: Die Windrose über die gesamte Versuchszeit mit 10-Minuten-Daten. Die täglichen Windrosen sind im Anhang angefügt. Die Windrosen geben die Windrichtung an, aus der der Wind eintrifft. Zusätzlich ist die Windstärke mit Farben eingetragen und die Häufigkeit der Messungen als Länge der Windblätter.

4.2 Volumenflussüberprüfung

Die Ergebnisse der beiden Volumenflussüberprüfungen je zu Beginn und Ende der Messungen sind in Tabelle 4 aufgelistet. Pro Teilnehmer wurden jeweils drei Messungen vorgenommen. In der Tabelle ist der Mittelwert dieser drei Messungen eingetragen bzw., falls eine der Messungen ungültig ist, der zwei Messungen. Teilnehmer 09 hat zu Messende aus Zeitgründen auf die Schlussmessung verzichtet.

Tabelle 4: Durchschnittsdaten zu den Flusstrommessungen in l/min jeweils zu Beginn und am Ende der Vergleichskampagne. Die Referenzwerte für die Normierung sind in Tabelle 3 aufgelistet.

	Anfangsmessung		Schlussmessung	
	gemessen	normiert	gemessen	normiert
01 PM2.5	493.45	498.8	506.77	499.0
01 PM10	494.58	500.0	510.80	503.0
02 PM10	497.36	502.8	513.16	505.3
03 PM2.5	510.05	515.6	522.72	514.7
03 PM10	509.29	514.8	521.12	513.1
04 PM10	498.91	504.3	513.67	505.8
05 PM10	498.47	503.9	511.91	504.1
06 PM2.5	494.09	499.5	508.72	500.9
06 PM10	494.20	499.6	508.85	501.1
07 PM10	500.45	505.9	509.31	501.5
08 PM10	501.08	506.5	513.67	505.8
09 PM2.5	496.01	501.4	-	-
09 PM10	494.62	500.0	-	-
10 PM2.5	501.07	506.5	511.72	503.9
10 PM10	499.51	504.9	512.93	505.1
11 PM10	489.02	494.3	503.54	495.8
13 PM10	496.80	502.2	508.57	500.8
Mittelwert	498.17	503.6	511.83	504.0
Standardabweichung	5.36	5.42	4.97	4.89

Die gemessenen Werte wurden normiert, um den unterschiedlichen Temperatur- und Luftdruckverhältnissen zu Beginn und Ende der Messungen Rechnung zu tragen (Tabelle 3 und Tabelle 4). Die Streuung unter den Teilnehmern ist mit jeweils etwa 1 % Standardabweichung (sowohl bei den Roh- als auch den normierten Werten) niedrig.

4.3 Zeitliche Betrachtung der Feinstaubdaten der High Volume Sampler

Die beiden Konzentrationsverläufe von PM10 und PM2.5 zeigen generell das gleiche zeitliche Muster (Abbildung 9). Der minimale Vergleichstagesmittelwert (R_t) für PM10 lag bei $2.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ und das Maximum bei $42.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ mit einem Vergleichsgesamtmittelwert (GMW) von $19.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Dieser Wert ist die konventionell richtige durchschnittliche Feinstaubbelastung. Damit wird der gesetzliche Tagesmittelgrenzwert für PM10 von $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ an keinem Messtag überschritten. Die Vergleichstagesmittelwerte für PM2.5 reichen von $1.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ bis $38.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ mit einem GMW von $16.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

In den ersten 30 Versuchstagen sinkt die PM Konzentration mit zunehmendem Wind und Regenfällen. In den letzten Versuchstagen, während denen die Temperaturen sehr tief sind und es nicht regnet, sind die Konzentrationen hoch, obwohl Bise vorherrscht und kein Niederschlag fällt. Wahrscheinlich führt der Nordostwind während diesen Tagen belastete Luft aus dem nördlichen Mittelland zu.

Ein Zusammenhang zwischen Windrichtung und der Feinstaubkonzentration ist nicht ersichtlich.

Der Anteil von PM_{2.5} im Durchschnitt über die Messperiode liegt bei 83 %. Auffällig ist aber, dass bei einzelnen Teilnehmern und Tagesmittelwerten der Vergleich PM_{2.5}/PM₁₀ über 1.0 steigt, was physikalisch nicht möglich ist. In Abbildung 10 wird die absolute und relative Differenz zwischen den beiden Fraktionen aufgezeigt. Beachtet wurden dabei nur die Teilnehmer, die sowohl PM₁₀ als auch PM_{2.5} gemessen haben. Ausreisser wurden bei der Darstellung nicht entfernt. Es kann kein Muster zwischen den Differenzen und der absoluten Messungen erkannt werden.

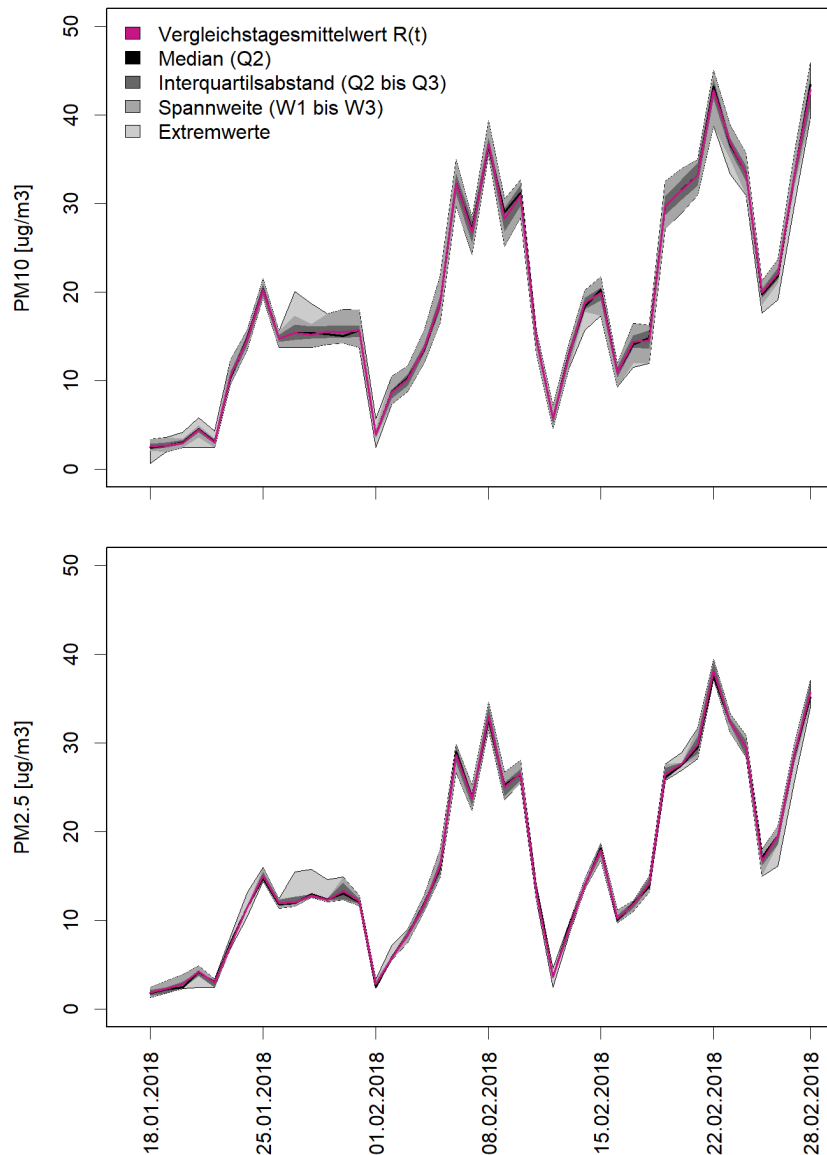


Abbildung 9: Konzentrationsverläufe für PM₁₀ (oben) und PM_{2.5} (unten). Eingetragen ist der Vergleichstagesmittelwert R_t in Rot, der Median in Schwarz sowie die jeweiligen abweichenden Messungen in Graustufen. In der unteren Grafik ist dazu der Anteil von PM_{2.5} in PM₁₀ auf der rechten y-Achse angegeben.

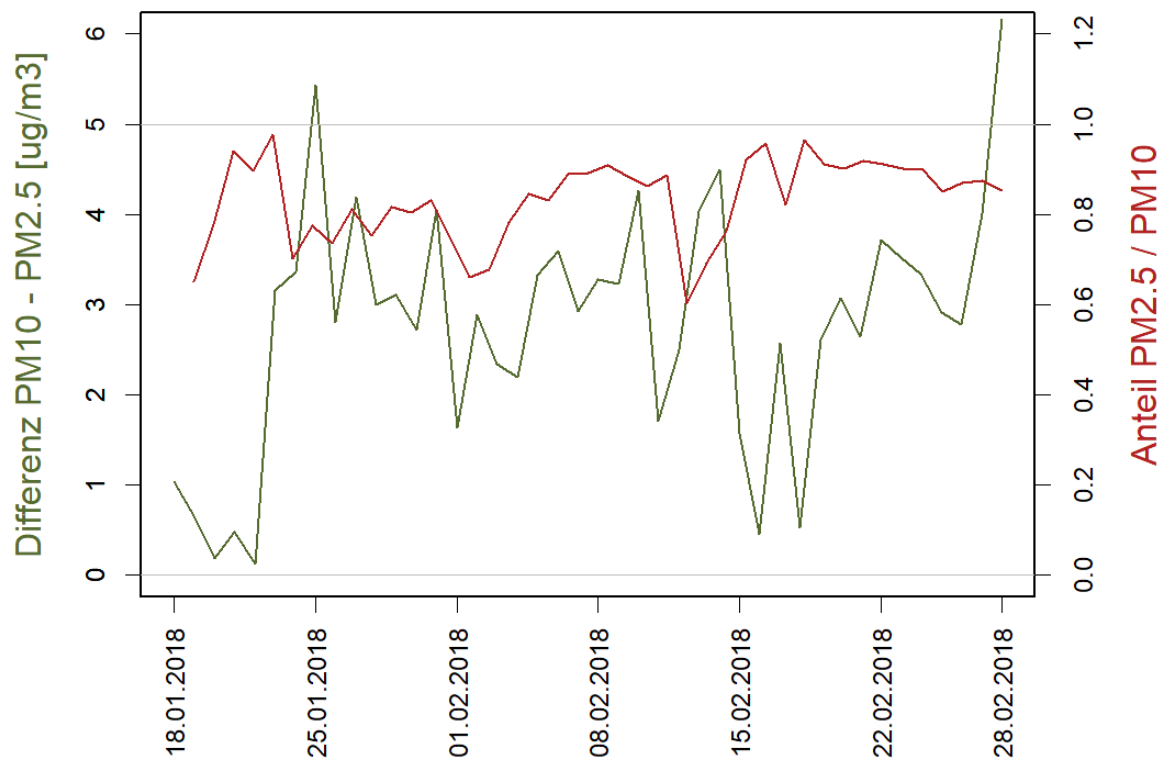


Abbildung 10: Absolute Differenz (linke y-Achse) und Quotient (rechte y-Achse) mit der Zeit zwischen PM10 und PM2.5 derjenigen Teilnehmer, die beide Feinstaubfraktionen gemessen haben. Die Ausreisser wurden nicht entfernt.

4.4 Auswertung der Teilnehmer

Alle teilnehmenden Institutionen ausser T12, welche in den Versuch gestartet sind, haben diesen nach 42 Tagen bzw. 42 Tagesmessungen beendet. Allerdings ist die Anzahl gültiger Tageswerte unterschiedlich (Tabelle 5). In einigen Fällen kam es vor allem zu Beginn des Versuchs und bei Filterwechseln zu technischen Problemen, welche ungültige Messwerte («NA») zur Folge hatten, welche von den Teilnehmern direkt kommuniziert wurden.

4.4.1 PM10 Messungen

Mit einer Boxplotanalyse wurden die Ausreisser eliminiert (Abbildung 5 und Kapitel 3.5). Von den 42 Tagesmessungen wurden pro Teilnehmer zwischen 0 und 5 Tagesmessungen entfernt (Tabelle 5). Der Gerätemittelwert G_n (berechnet, ohne diese Ausreisser zu eliminieren) liegt zwischen $18.00 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (T07) und $21.97 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (T01). Der Gesamtmittelwert GMW (berechnet, indem die Ausreisser zuerst eliminiert wurden) liegt bei $19.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Das heisst, dass es bei einzelnen Teilnehmern zu einer Abweichung des Gerätemittelwert von diesem Gesamtmittelwert (GMW) von mehr als 5 % kommt (Tabelle 5). Spezifisch sind dies T01 (+15 %), T06 (-5 %), T07 (-6 %) und T09 (+6 %). Allerdings wird der Vergleich bei vielen Messlücken verfälscht.

Teilnehmer 01 überschätzt kleine Vergleichstagesmittelwerte und unterschätzt grosse, was in einer negativen Steigung der Geraden in Abbildung 14 resultiert. Die Unsicherheit bleibt aber ab Messwerten um die $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ stabil klein. Weiter gab es zu Beginn der Messung technische Probleme. Daher fehlen einige niedrige Tagesdaten zu, was zu einem deutlich zu hohen Gerätemittelwert führt. Das Gegenteil ist für Teilnehmer 06 der Fall: Die Daten dieses Instituts gegen Ende der Messperiode mussten als Ausreisser eliminiert werden. Ausserdem unterschätzt der Teilnehmer generell die «Realität», wobei der Fehler mit steigendem Vergleichstagesmittelwert zunimmt (Abbildung 14).

Auch Teilnehmer 07 unterschätzt den Vergleichstagesmittelwert im Allgemeinen. Im Unterschied zu Teilnehmer 6 nimmt der (relative und absolute) Fehler aber mit höheren Vergleichstagesmittelwerten ab. Das heisst, dass kleine Vergleichstagesmittelwerte schlechter gemessen wurden als grosse. Dieser Teilnehmer zeigt die grösste mittlere Abweichung der gültigen Messwerte von den Vergleichstagesmittelwert ($D_{s,rel} = -7.4 \%$ in Tabelle 5). Allerdings betrifft diese Abweichung vor allem kleine Messwerte. Betrachtet man nur die Messungen bei Vergleichstagesmittelwerten von über $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ verringert sich der Wert auf -3.0% . Dies gilt auch für Teilnehmer 09, welcher den Vergleichstagesmittelwert leicht, vor allem bei Messwerten des unteren und mittleren Bereichs, überschätzt.

Teilnehmer 02 und Teilnehmer 13 zeigen zwar eine sehr geringe Abweichung vom GMW ($-1.85 \mu\text{g}/\text{m}^3$ bzw. $+2.64 \mu\text{g}/\text{m}^3$ in Tabelle 5), allerdings eine positive Steigung in der Geraden in Abbildung 14. Dabei werden kleine Vergleichstagesmittelwerte unterschätzt und grosse überschätzt, was sich im Mittelwert sehr gut ausgleicht. Dasselbe gilt für Teilnehmer 10 und 11. Dort ist die Steigung der Geraden aber negativ. Somit werden kleine Referenzwerte über- und grosse bei T10 unterschätzt.

Die Teilnehmer 03, 04 und 08 zeigen neben konstanten Messungen ohne Lücken und Ausreissern auch eine sehr geringe Überschätzung vom GMW und der Vergleichstagesmittelwerte und damit einen kleinen positiven Offset q . Teilnehmer 05 unterschätzt sowohl den GMW als auch hohe Vergleichstagesmittelwerte leicht.

Generell sind die Abweichungen aller Teilnehmer von den Vergleichstagesmittelwerten als klein und deshalb die Messqualität als gut einzustufen: $D_{n,rel}$ reicht von -7.72 % bis +6.94 %. Betrachtet man nur die grösseren Werte, d. h. alle Messungen zu zeitlichen Referenzwerten grösser als $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$, liegen die Unsicherheiten bei -5.38 % bis +5.36 %.

Wie im Bericht der EMPA (2001)⁷ wurde die Messunsicherheit für einen Tageswert aus der Standardabweichung der Differenzen aller Teilnehmer vom Tagesmedian berechnet (ohne Entfernen von Ausreissern). Dieser Wert ergibt im vorliegenden Projekt $1.15 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Tabelle 5: Übersicht der Teilnehmer des Ringversuchs und die Qualitäten ihrer Messungen.

		HVS												LVS ^A	Fidas ^A
		T01	T02	T03	T04	T05	T06	T07	T08	T09	T10	T11	T13	T14	T06
PM10	Anzahl Messungen	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42
	davon NA	9	0	0	0	0	0	0	0	1	2	0	1	1	0
	davon Ausreisser	1	1	0	0	2	5	1	0	2	0	3	0	4	14
	Gerätemittelwert	21.97 ^E	18.73	19.67	19.70	18.53	18.11	18.00	19.27	20.32	19.19	19.94	19.59	20.08	18.49
	Abweichung vom GMW [%]	+15.11 ^E	-1.85	+3.05	+3.21	-2.92	-5.11	-5.67	+0.97	+6.45	+0.52	+4.46	+2.64	+5.19	-3.12
	Offset q ^B	+17.98	-21.26	+3.49	+2.72	-4.74	-1.64	-13.63	+4.77	+9.96	+6.04	+14.06	-8.08	+7.28	-11.80
	Steigung der Fehler m ^C	-0.68	+0.75	-0.02	+0.02	+0.07	-0.13	+0.31	-0.15	-0.21	-0.30	-0.37	+0.33	-0.08	+0.34
	D(n,rel) [%] ^D	+2.90	-6.87	+3.17	+3.08	-3.39	-4.21	-7.72	+1.96	+5.79	+0.11	+6.94	-1.58	+5.71	-5.37
	D(n,rel) bei x > 25 [%] ^D	-4.27	+2.63	+2.98	+2.76	-5.38	-4.64	-2.96	+0.14	+0.54	-2.81	+5.36	+4.11	+4.19	-2.58
PM2.5	Anzahl Messungen	42		42		42				42	42				42
	davon NA	1		0		0				5	2				0
	davon Ausreisser	4		1		3				6	0				28
	Gerätemittelwert	16.29		16.78		15.74				17.71	16.20				16.27
	Abweichung von GMW [%]	+0.10		+3.15		-3.25				+8.86	-0.41				0.00
	Offset q ^B	-1.11		-0.07		-8.70				+20.91	-6.38				-17.46
	Steigung der Fehler m ^C	+0.03		+0.14		+0.24				-0.71	+0.15				+0.77
	D(n,rel) [%] ^D	-0.56		+2.25		-4.77				+8.85	-3.93				-4.88
	D(n,rel) bei x > 25 [%] ^D	-1.56		+4.66		-1.60				+0.45	-2.66				-2.58

^{A)} Die Messungen des LVS und des Fidas wurden nicht für die Berechnung des GMW verwendet.

^{B)} und ^{C)} Diese Angaben (q und m) beziehen sich auf die relative Abweichung in Abbildung 14.

^{D)} D(n,rel) bezeichnet die mittlere relative Abweichung der einzelnen Messwerte vom Vergleichstagesmittelwert (Kapitel 3.5)

^{E)} T01 hatte zu Beginn der Messperiode technische Probleme. Deshalb gibt es mehrere fehlende (tiefe) Messwerte, was zu einem zu hohen Gerätemittelwert führt.

⁷ Immissionsringversuch Feinstaub PM10 2001 in Dübendorf, Zusammenfassung der Resultate im Auftrage des Cercl'Air. EMPA. 2001.

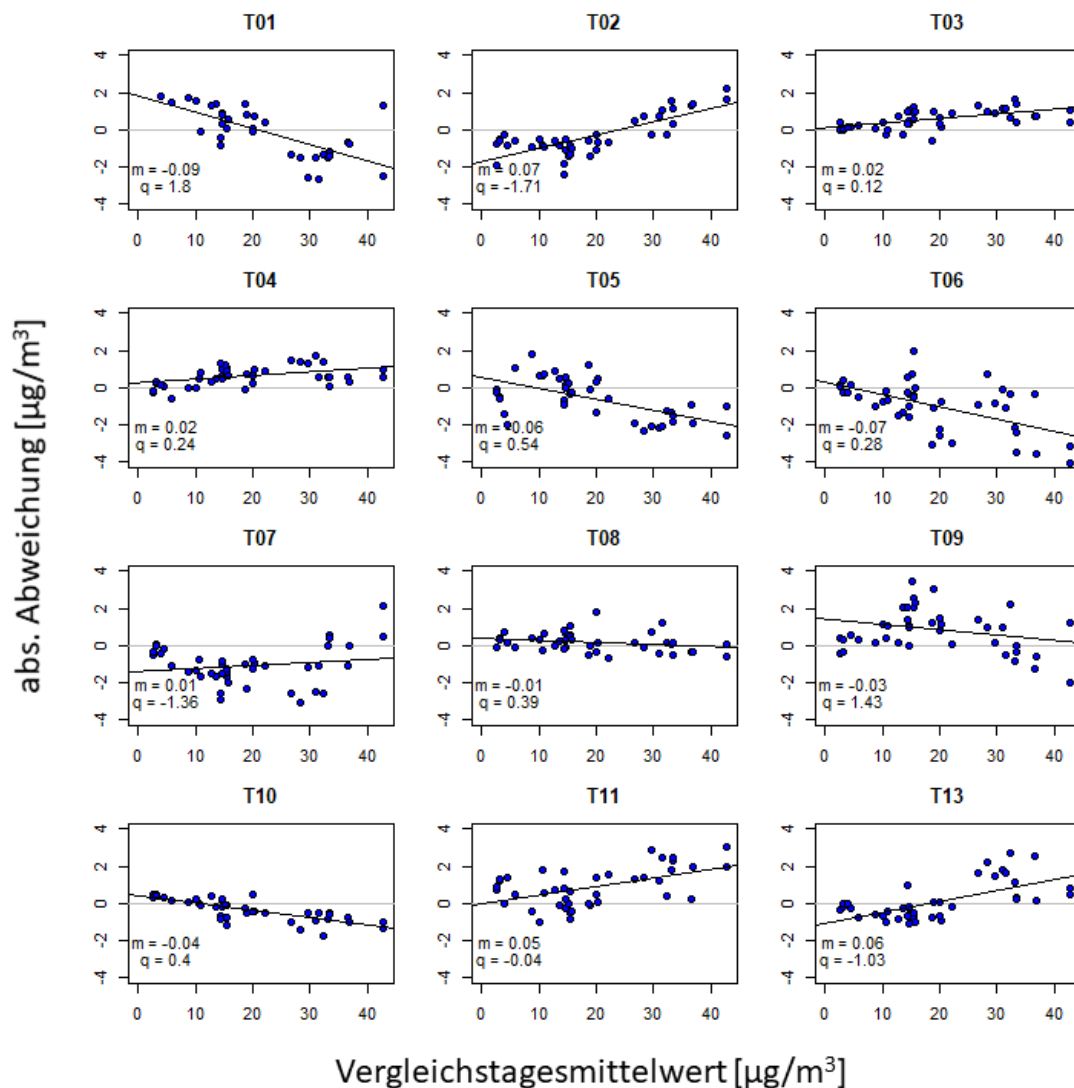


Abbildung 11: Absolute Abweichungen der HVS PM10 Messwerte des jeweiligen Teilnehmers vom Vergleichstagesmittelwert. Durch die Datenpunkte ist die passende Gerade gelegt. Die dazugehörige Steigung ist mit m angegeben, der Achsenabschnitt mit q .

4.4.2 PM2.5 Messungen

Von den 12 Teilnehmern haben deren fünf auch Messungen für PM2.5 durchgeführt. Wegen dieser geringen Teilnehmerzahl ist die statistische Auswertung bzw. die Bestimmung des GMW mit einer geringeren Aussagekraft zu interpretieren.

Von den Teilnehmern selbst wurden von den 42 Messungen bereits bis zu 5 Werte wegen technischen Schwierigkeiten entfernt. Wie bei den PM10 Messungen wurden zusätzlich die Ausreisser mit einer Boxplotanalyse bereinigt. Dies sind zusätzlich zwischen 0 und 6 Werte. Der Gerätemittelwert G_n liegt zwischen $15.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (T06) und $17.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (T09) (Tabelle 5) und der GMW bei $16.26 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Die Performance der einzelnen Teilnehmer ist im Übrigen sehr ähnlich wie bei den PM10 Werten. Teilnehmer

01 schneidet besser ab als bei den PM10 Messungen, da es weniger fehlende Messungen gibt. Die Abweichungen sind in Tabelle 5 und Abbildung 12 abgebildet.

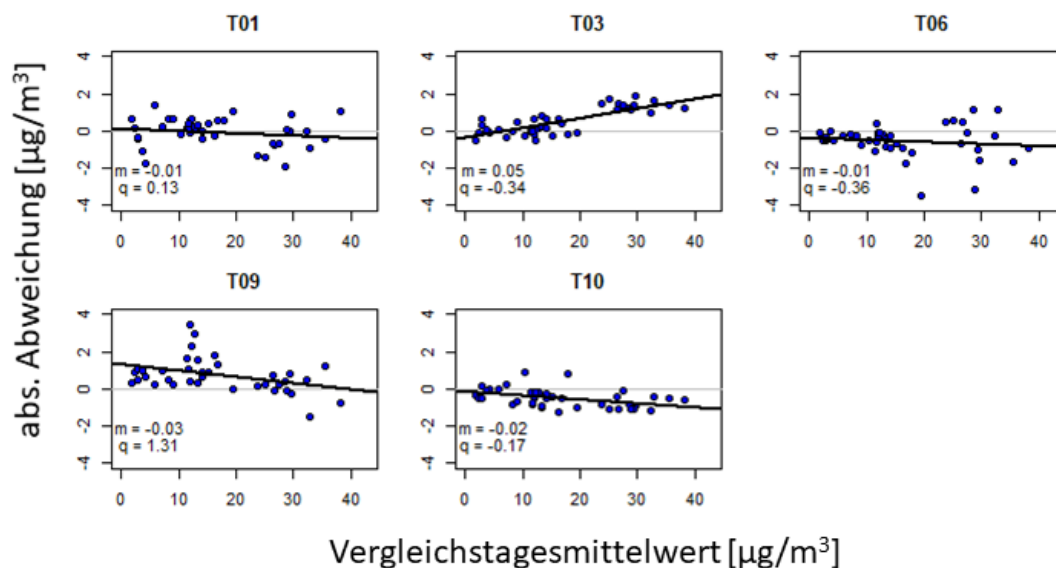


Abbildung 12: Absolute Abweichungen der HVS PM2.5 Messwerte des jeweiligen Teilnehmers vom Vergleichstagesmittelwert. Durch die Datenpunkte ist die passende Gerade gelegt. Die dazugehörige Steigung ist mit m angegeben, der Achsenabschnitt mit q.

4.5 Low Volume Sampler

Bei den LVS Messungen gibt es nur einen fehlenden Messwert und vier Ausreisser, von denen einer sehr deutlich ist (Abbildung 15, Tag 10). Generell gehen die Messungen des LVS mit den Werten der HVS Messungen einher. Allgemein werden die Vergleichstagesmittelwerte der HVS Messungen leicht überschätzt (Offset von +7.28, Tabelle 5). Der Gerätemittelwert liegt etwas über 5 % über dem Vergleichsgesamtmittelwert. Die absolute Abweichung steigt mit wachsenden Referenzwerten, die relative hingegen sinkt leicht (Abbildung 18).

4.6 Fidas

Die Messungen mit dem Fidas 200S resultieren sowohl für PM10 als auch für PM2.5 in einer zuverlässigen, das heisst lückenfreien Zeitreihe mit gültigen Tagesmittelwerten. Die Fidas Messwerte sind Rohdaten, welche nicht auf HVS-Referenzmessungen korrigiert wurden. Es gibt jedoch viele Ausreisser im Vergleich mit den Vergleichstagesmittelwerten der HVS (Tabelle 5). Das heisst nicht unbedingt, dass die Fidas Messungen schlechter, sondern dass die zwei Methoden noch nicht genau deckungsgleich sind. Interessant ist, dass die Abweichungen vom Vergleichsgesamtmittelwert mit -3.1 % bzw. 0.0 % Abweichung für PM10 und PM2.5 trotzdem sehr klein sind.

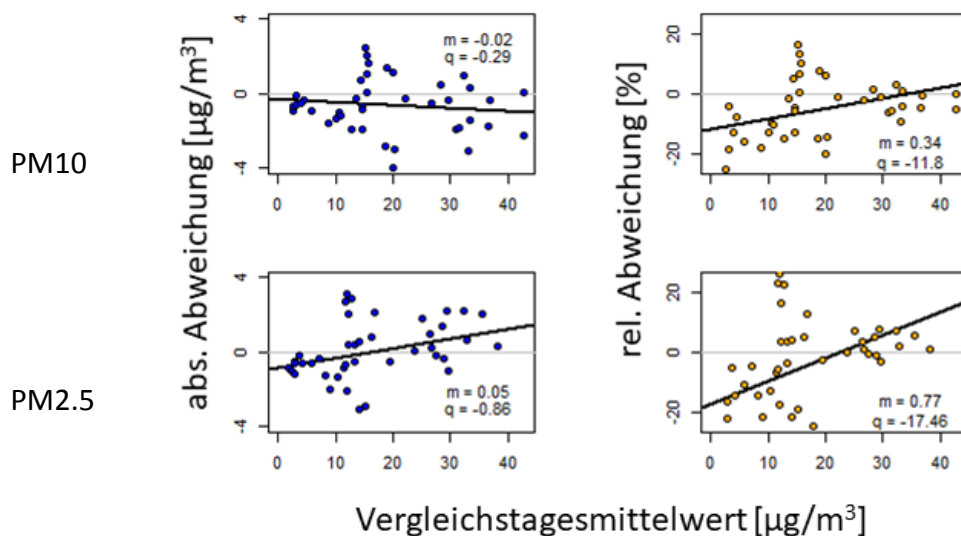


Abbildung 13: Absolute und relative Abweichungen (D_n und $D_{n,rel}$) der PM10 (oben) und PM2.5 (unten) Fidas-Messwerte vom HVS Referenzwert. Durch die Datenpunkte ist die passende Funktionsgerade gelegt. Die dazugehörige Steigung m und der Achsenabschnittswert q ist ebenfalls angegeben und zusätzlich in Tabelle 5 eingetragen.

5 Diskussion

Die Messungen für PM10 und PM2.5 aller Teilnehmer sind generell von guter Qualität. Allerdings gibt es einige Punkte, die verbessert bzw. vereinheitlicht werden müssen, um ein schweizweit einheitliches Messprogramm zu garantieren.

Es wird angenommen, dass es beim Filtertransport, beim -handling und Filterbehandlung im Labor zu kleinen individuellen Abweichungen kommt. Diese könnten eventuell die Geradenpositionen (z. B. Abbildung 14) erklären. Die Ungenauigkeit der Waage, die Temperatur und die relative Feuchte im Wägeraum sind von der Europäischen Norm vorgegeben⁸. Bezüglich Wägung hat Teilnehmer 06 eine Waage mit ungenügender Genauigkeit verwendet. Die Temperatur war bei einigen Teilnehmern leicht zu hoch (Tabelle 2). Die Vorgaben bezüglich relativer Feuchte im Wägeraum wurden mehrheitlich eingehalten. Teilnehmer 03 hat einen anderen Vorgang bei der Filterkonditionierung implementiert als die übrigen Teilnehmer (Trocknung in Exsikkator auf 0 %). Teilnehmer 05 und 09 haben jeweils ein zweistufiges Verfahren, bei dem der leere Filter zuerst bei über 90 % und dann bei 45 – 50 % relativer Luftfeuchtigkeit konditioniert wird.

Die Volumenflussprüfung wurde vor und nach der Kampagne durchgeführt. Allgemein sind die auf Standardbedingungen bezogenen Volumenflüsse mit etwa 1 % Standardabweichung vom Zielwert von hoher Qualität.

Bei der Lieferung der Daten muss ein einheitliches Verfahren im Umgang mit tiefen Messwerten gefunden werden. Momentan gibt es drei verschiedene Vorgehensweisen:

⁸ Außenluft – Gravimetrisches Standardmessverfahren für die Bestimmung der PM10 oder PM2,5 Massenkonzentration des Schwebstaubes; Deutsche Fassung EN 12341:2014.

- Bei Werten $<5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ werden keine Messwerte geliefert (NA), da die Unsicherheit grösser ist als der Wert.
- Der genaue Wert wird trotzdem geliefert.
- Bei Werten $<5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ wird der halbe Wert, also $2.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$, geliefert.

Aus Gründen der Vollständigkeit und Genauigkeit ist die zweite Version (effektiv gewogener Wert verwenden) zu bevorzugen, da sonst bei der Jahresmittelberechnung systematische Fehler entstehen können.

Bei der Datenvalidierung soll auch einheitlich mit PM_{2.5}-Werten umgegangen werden, welche höher als der PM₁₀-Wert sind. Es wird empfohlen diese Werte beizubehalten, damit in der zeitlichen Mittelberechnung kein systematischer Fehler generiert wird.

Nach BAFU Immissionsempfehlungen darf die Messunsicherheit im Bereich des Tagesmittelgrenzwertes, also bei PM₁₀ um $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$, bis zu 15 % betragen. In diesem Ringversuch wurden bei den HVS Messungen bei Werten $>25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ eine Streuung von -5.4 % bis +5.4 % vom Vergleichstagesmittelwert beobachtet (Tabelle 5). Damit sind die Empfehlungen sehr gut erfüllt.

Im Jahr 2001 wurde in einer ähnlichen Untersuchung eine Messunsicherheit für die HVS-PM₁₀ Werte berechnet, indem die Standardabweichung der Differenzen aller Teilnehmer vom Tagesmedian ermittelt wurde.⁹ Der Wert lag damals bei $3.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Berechnet man denselben Wert für die vorliegende Kampagne, ergibt sich ein Wert von $1.15 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Die Messunsicherheit hat sich also in den letzten Jahren nochmals verringert und liegt damit bei etwa 2 % im Grenzwertbereich für PM₁₀.

Grundsätzlich darf festgehalten werden, dass sich die Qualität der Feinstaubmessungen mittels HVS in der Schweiz auf einem guten Niveau befinden. Einzelne Optimierungsmöglichkeiten wurden mit dem Ringversuch aufgedeckt und fliessen in die sich zurzeit in Überarbeitung befindenden BAFU-Immissionsmessempfehlung ein. Ein weiteres Verbesserungspotential ergibt sich bei der Filterkonditionierung. Bei dieser sollten sich die Labors an der entsprechenden Norm¹⁰ orientieren.

Die als Begleitung zum Versuch durchgeführten Messungen mit dem Online-Monitor Fidas 200S geben Hinweise, dass sich zwischen den verschiedenen Messverfahren grössere Differenzen ergeben können und dass es weiterhin angezeigt ist, Monitorgeräte an das Referenzverfahren anzubinden.

Um weiterhin eine hohe Qualität der Feinstaubmessungen zu gewährleisten, ist es angebracht solche Ringversuche periodisch zu wiederholen. Dies ist insbesondere auch wichtig, da mit dem neuen Grenzwert PM_{2.5} die Qualitätsanforderungen an die Messnetzbetreiber steigen. Zusammenfassend können folgende Empfehlungen abgeleitet aus der Ringkontrolle zum Betrieb von HVS abgegeben werden:

- Waage nach Norm EN 12341
- Filterkonditionierung nach Norm EN 12341

⁹ Immissionsringversuch Feinstaub PM₁₀ 2001 in Dübendorf, Zusammenfassung der Resultate im Auftrage des Cercl'Air. EMPA. 2001.

¹⁰ Außenluft – Gravimetrisches Standardmessverfahren für die Bestimmung der PM₁₀ oder PM_{2,5} Massenkonzentration des Schwebstaubes; Deutsche Fassung EN 12341:2014

- Umgang mit Messwerten kleiner $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$: Der effektiv gemessener Wert wird geliefert, um systematische Fehler zu vermeiden.
- Umgang mit Messwerten $\text{PM}_{2.5} > \text{PM}_{10}$: Der effektiv gemessener Wert wird geliefert, um systematische Fehler zu vermeiden.

6 Anhang

Vergleichstagesmittelwerte für PM10 und PM2.5 in $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Die Daten sind in Abbildung 9 grafisch dargestellt.

Tag	PM10	PM2.5
1	2.62	1.88
2	2.73	2.31
3	3.01	2.86
4	4.47	4.26
5	3.07	2.95
6	10.58	7.23
7	14.61	11.47
8	20.34	15.08
9	14.74	11.94
10	15.40	12.03
11	15.22	12.81
12	15.57	12.30
13	15.52	13.32
14	15.71	12.18
15	3.91	2.81
16	8.75	5.79
17	10.17	8.34
18	13.67	11.82
19	18.88	16.19
20	32.32	28.61
21	26.77	23.72

Tag	PM10	PM2.5
22	36.75	33.00
23	28.30	25.03
24	30.92	26.59
25	14.60	13.22
26	5.77	3.63
27	12.87	9.06
28	18.78	14.03
29	19.95	17.95
30	10.92	10.25
31	14.43	11.81
32	14.53	14.09
33	29.69	26.51
34	31.54	27.60
35	33.16	29.77
36	42.81	38.15
37	36.88	32.32
38	33.39	29.52
39	19.92	16.73
40	22.13	19.62
41	33.33	28.87
42	42.89	35.66

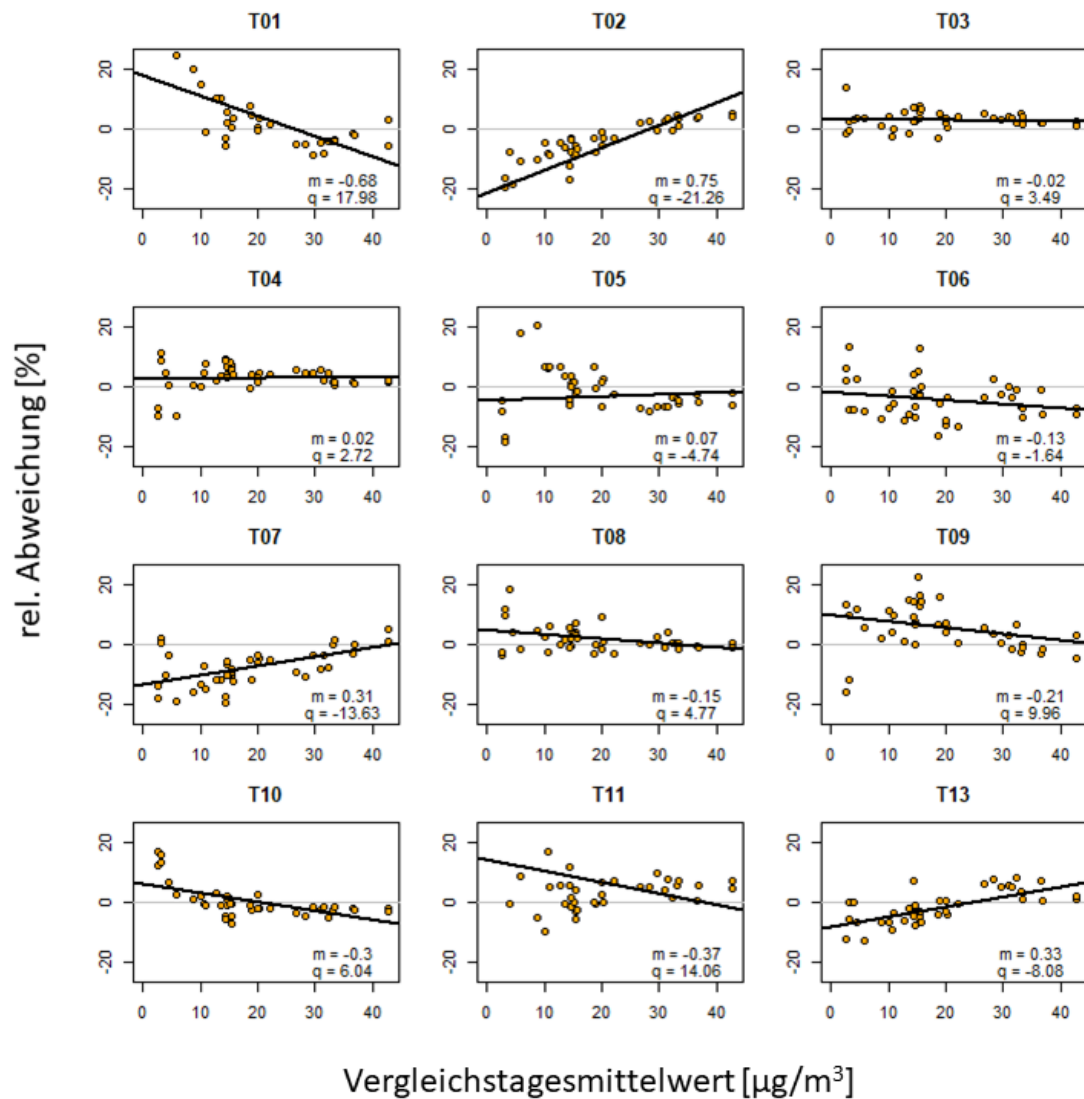


Abbildung 14: Relative Abweichungen $D_{n,\text{rel}}$ der PM10 Messwerte des jeweiligen Teilnehmers vom Vergleichstagesmittelwert. Durch die Datenpunkte die passende Funktionsgerade gelegt. Die dazugehörige Steigung m und der Achsenabschnittswert q ist ebenfalls angegeben und zusätzlich in Tabelle 5 eingetragen.

6.1 Low Volume Sampler

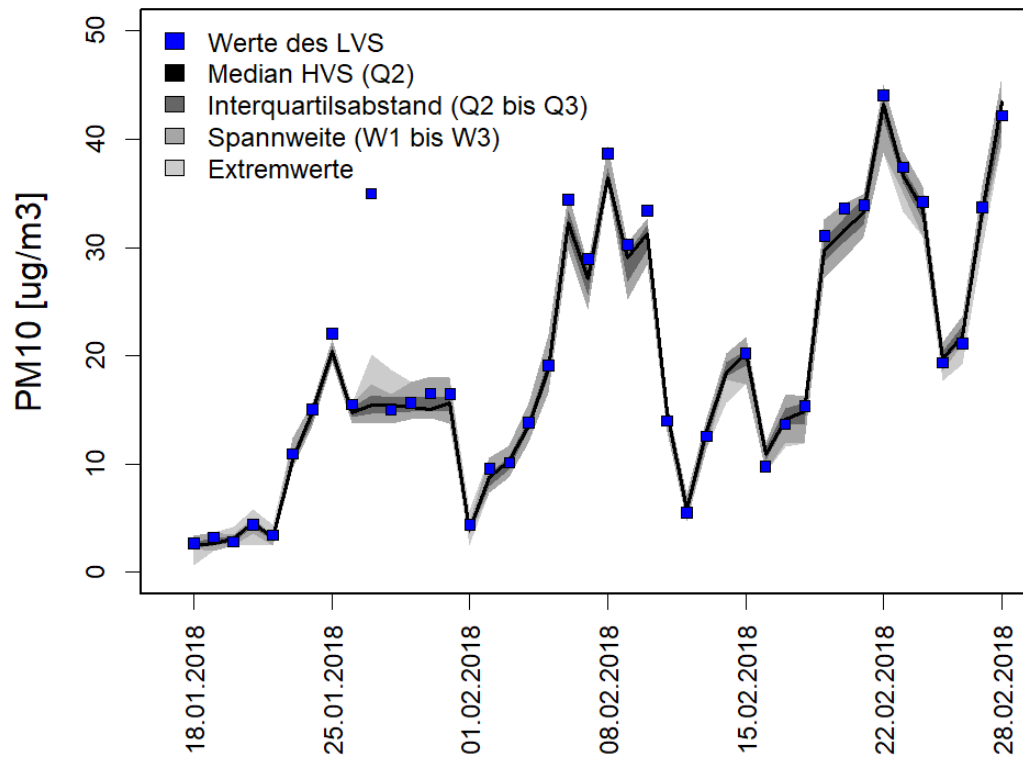


Abbildung 15: PM10 Messwerte des LVS in Blau für PM10 im Vergleich mit den HVS Messungen (grau).

6.2 Fidas

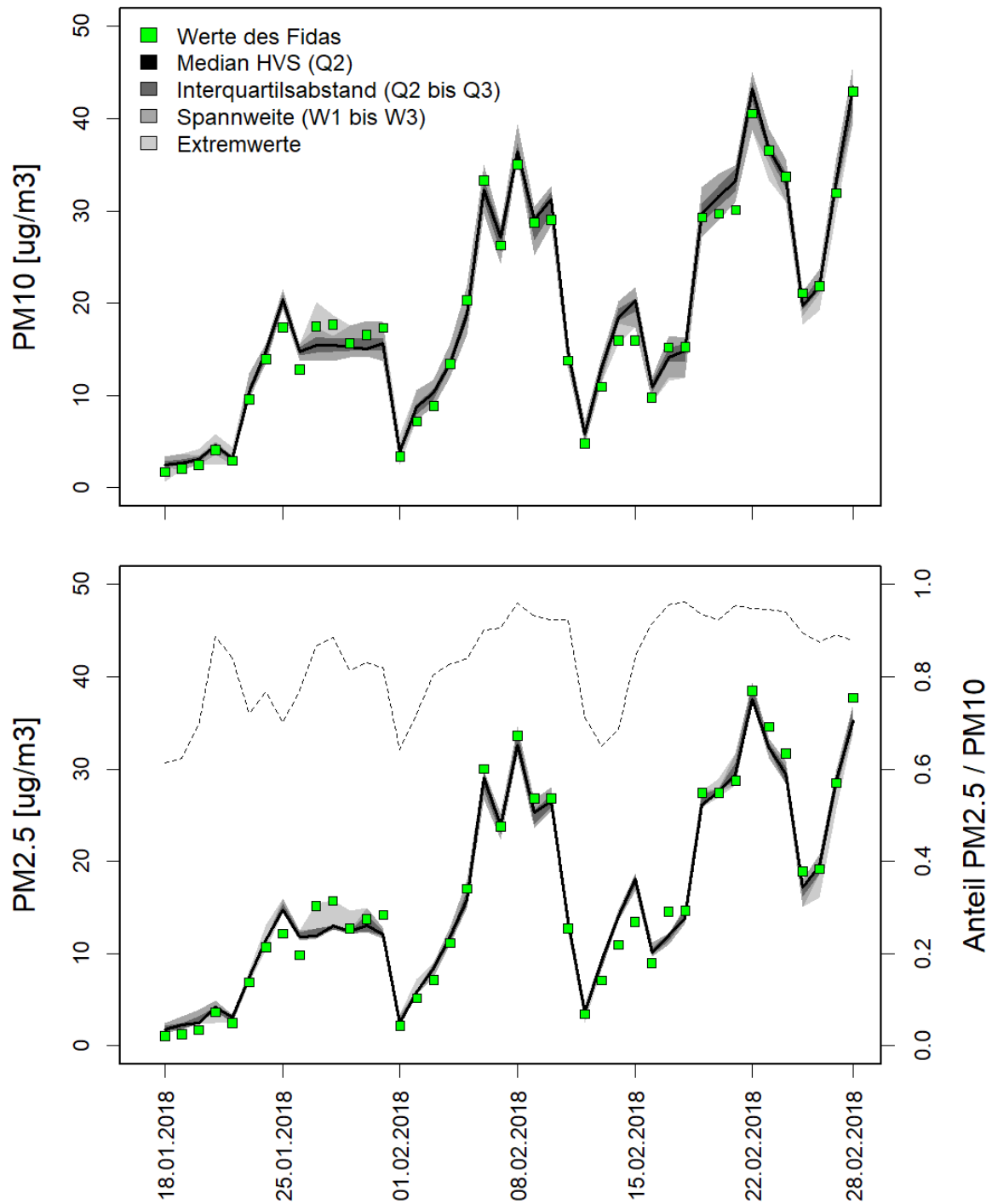


Abbildung 16: Messwerte des Fidas in Grün für PM10 (oben) und PM2.5 (unten) im Vergleich mit den HVS Messungen (grau).

6.3 Abweichungen D_s und $D_{s,rel}$

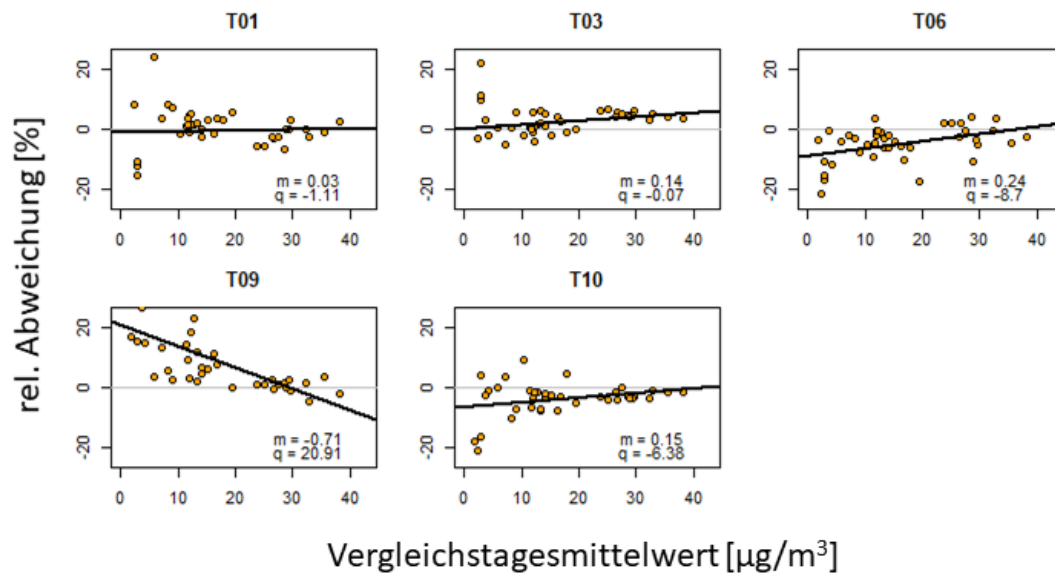


Abbildung 17: Relative Abweichungen der HVS PM2.5 Messwerte des jeweiligen Teilnehmers vom Vergleichstagesmittelwert. Durch die Datenpunkte ist die passende Gerade gelegt. Die dazugehörige Steigung ist mit m angegeben und der Achsenabschnittswert mit q .

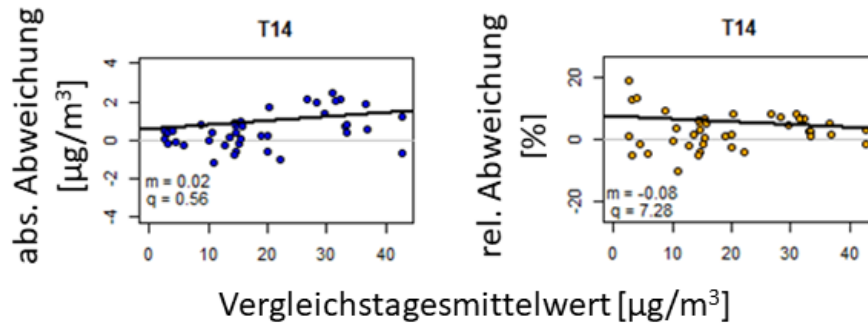
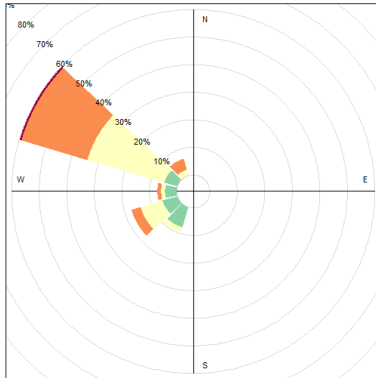


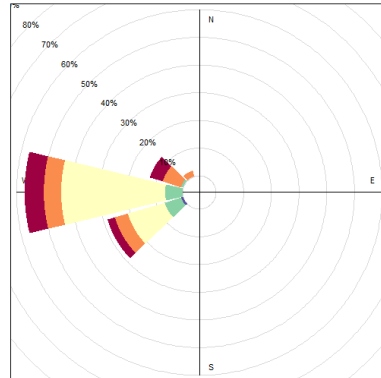
Abbildung 18: Absolute (links) und relative (rechts) Abweichungen der LVS PM10 Messwerte vom Vergleichstagesmittelwert für den Teilnehmer 14. Durch die Datenpunkte ist die passende Gerade gelegt. Die dazugehörige Steigung ist mit m angegeben und der Achsenabschnittswert mit q .

6.4 Tägliche Windrosen

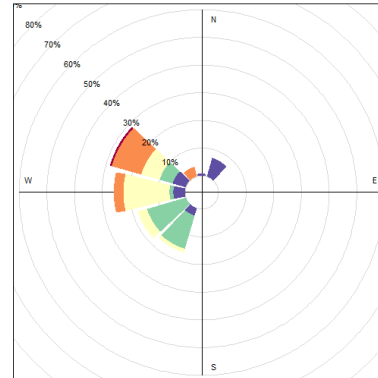
Donnerstag, 18.1.2018



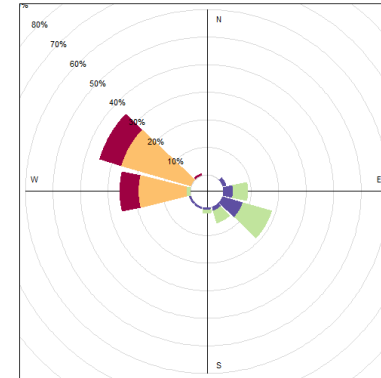
Freitag, 19.1.2018



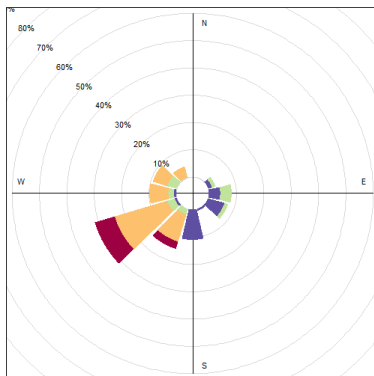
Samstag, 20.1.2018



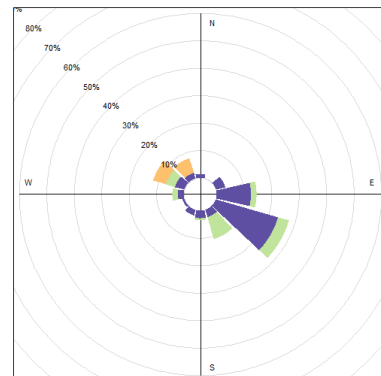
Sonntag, 21.1.2018



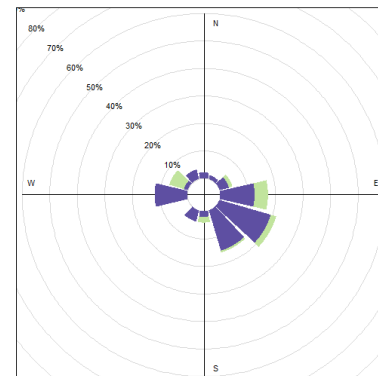
Montag, 22.1.2018



Dienstag, 23.1.2018

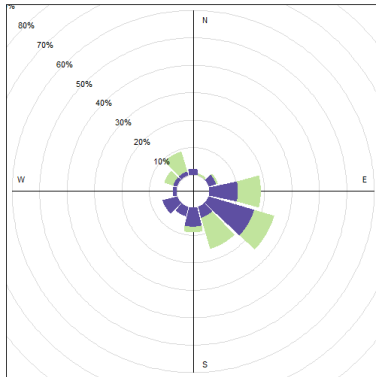


Mittwoch, 24.1.2018

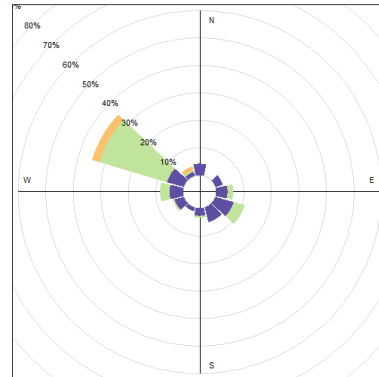


Woche 1

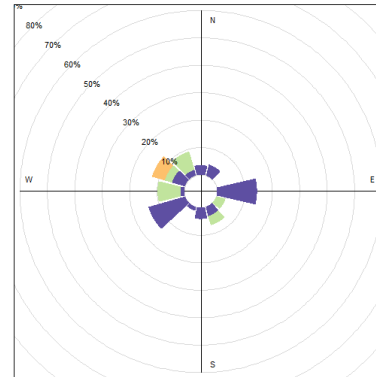
Donnerstag, 25.1.2018



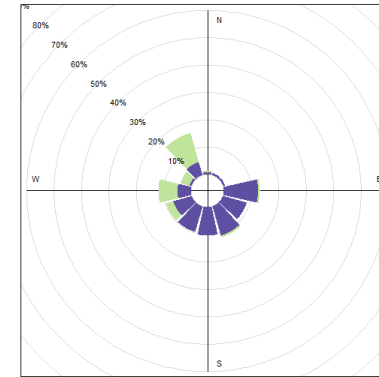
Freitag, 26.1.2018



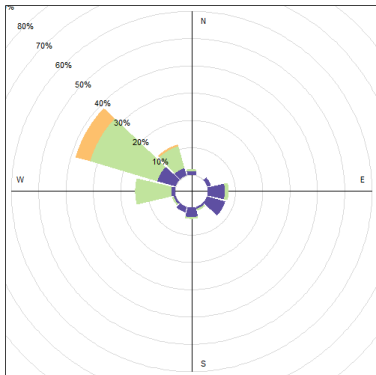
Samstag, 27.1.2018



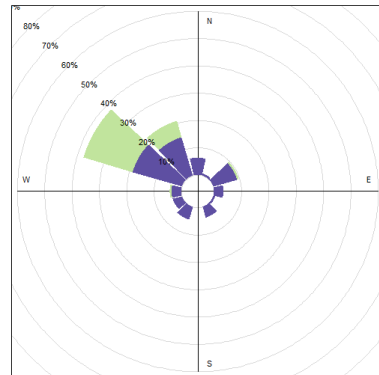
Sonntag, 28.1.2018



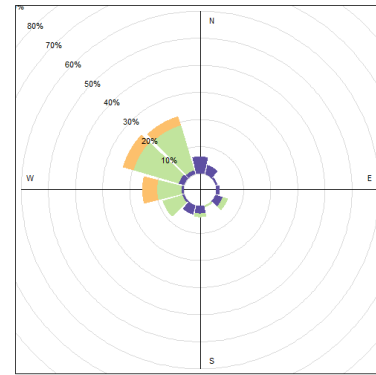
Montag, 29.1.2018



Dienstag, 30.1.2018

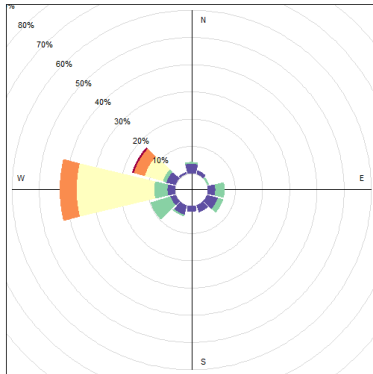


Mittwoch, 31.1.2018

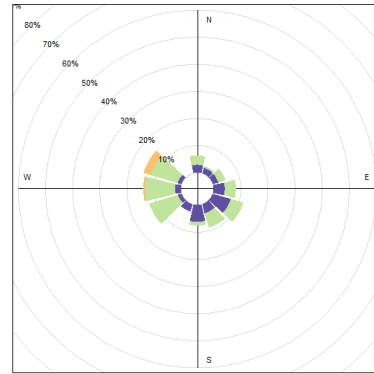


Woche 2

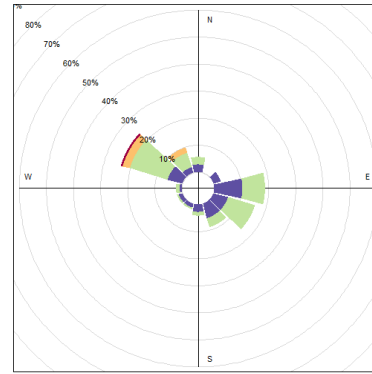
Donnerstag, 1.2.2018



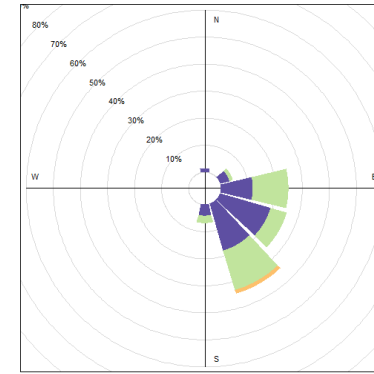
Freitag, 2.2.2018



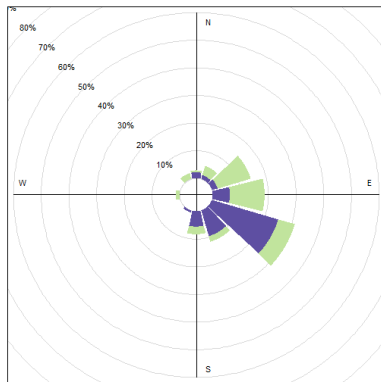
Samstag, 3.2.2018



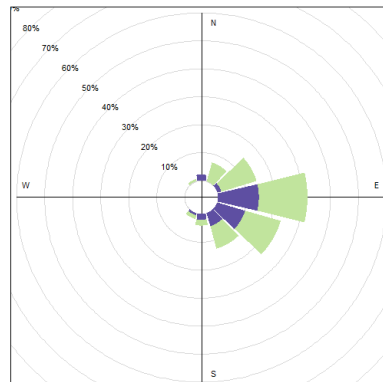
Sonntag, 4.2.2018



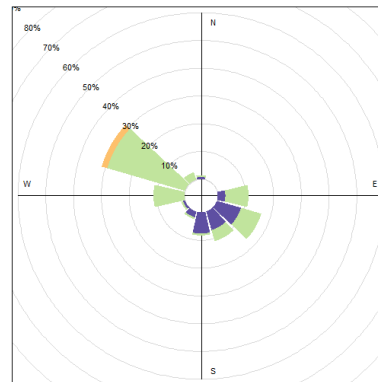
Montag, 5.2.2018



Dienstag, 6.2.2018

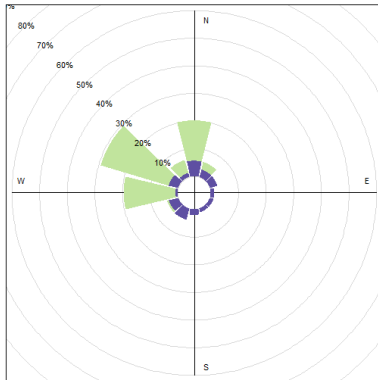


Mittwoch, 7.2.2018

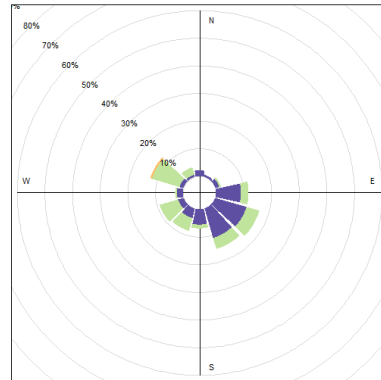


Woche 3

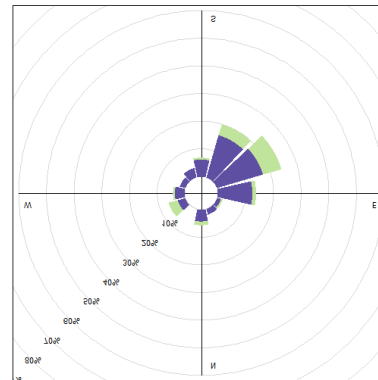
Donnerstag, 8.2.2018



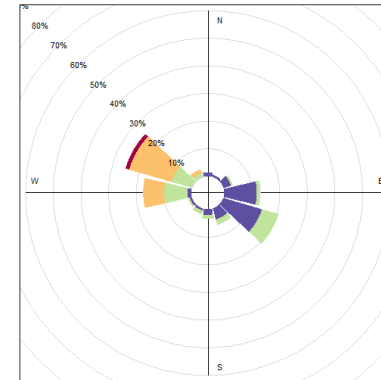
Freitag, 9.2.2018



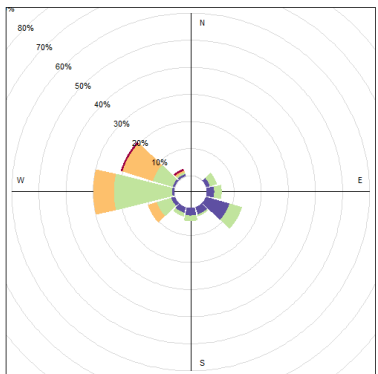
Samstag, 10.2.2018



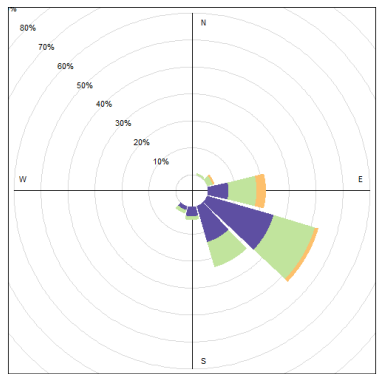
Sonntag, 11.2.2018



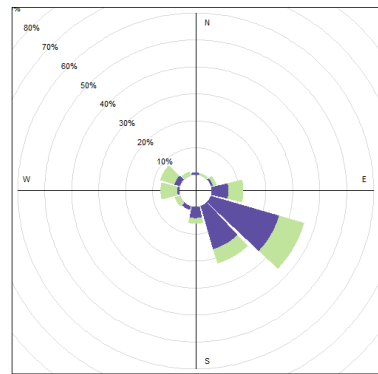
Montag, 12.2.2018



Dienstag, 13.2.2018

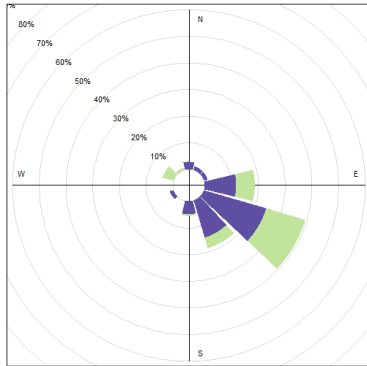


Mittwoch, 14.2.2018

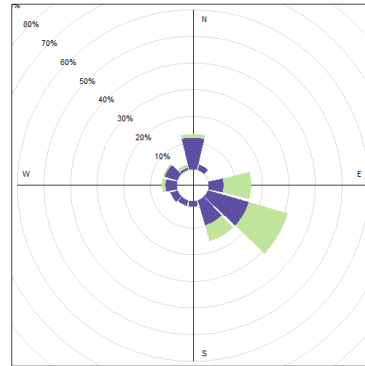


Woche 4

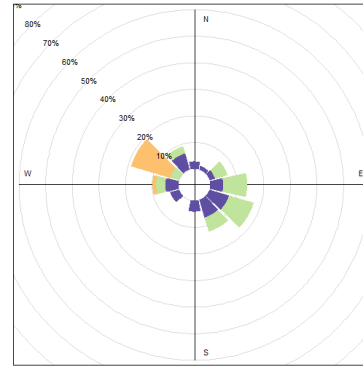
Donnerstag, 15.2.2018



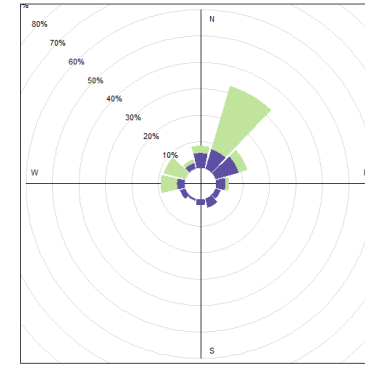
Freitag, 16.2.2018



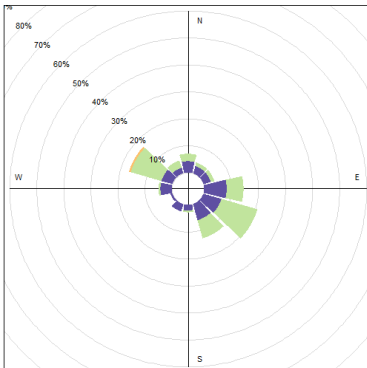
Samstag, 17.2.2018



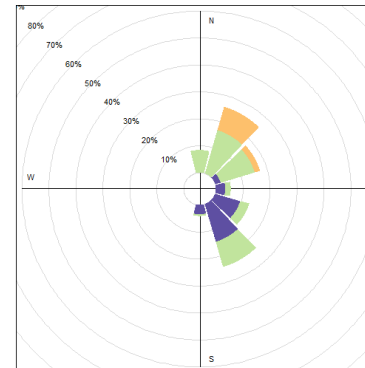
Sonntag, 18.2.2018



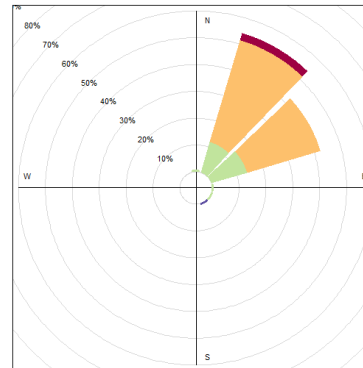
Montag, 19.2.2018



Dienstag, 20.2.2018

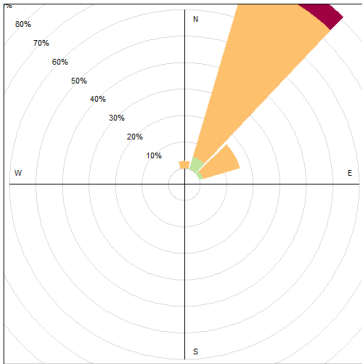


Mittwoch, 21.2.2018

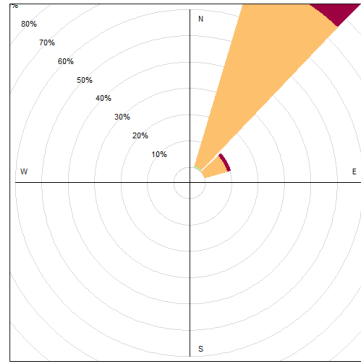


Woche 5

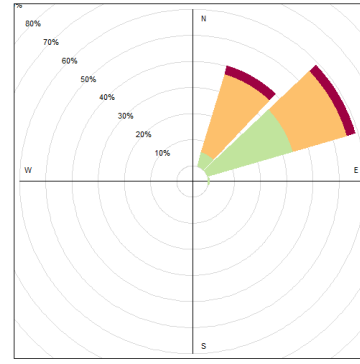
Donnerstag, 22.2.2018



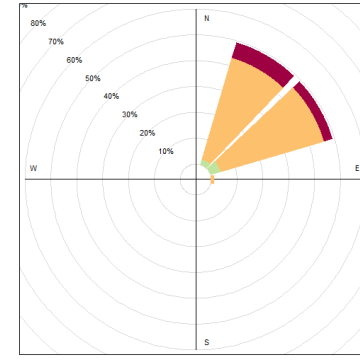
Freitag, 23.2.2018



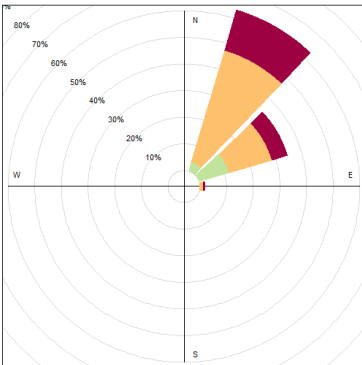
Samstag, 24.2.2018



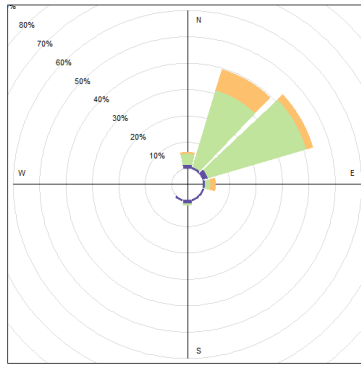
Sonntag, 25.2.2018



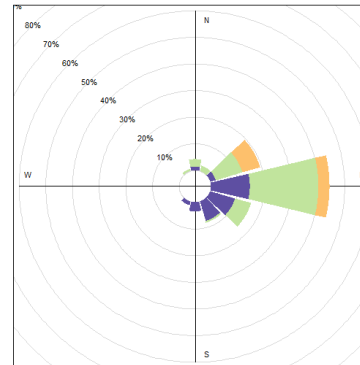
Montag, 26.2.2018



Dienstag, 27.2.2018



Mittwoch, 28.2.2018



Woche 6