

POLYZYKLISCHE AROMATISCHE KOHLENWASSERSTOFFE (PAK) IM ATMOSPHERISCHEN FEINSTAUB (PM10)



Vergleich der Feinstaubuntersuchungen in Muota- thal zwischen den Messkampagne 2009, 2011 und 2018

Version: 05.02.2018

Autoren: Nadine Minder, inNET Monitoring AG
Hannah Wey, inNET Monitoring AG
Dr. Christian Ruckstuhl, inNET Monitoring AG

Zusammenfassung

Untersuchungen in den Jahren 2009 und 2011 in Muotathal haben gezeigt, dass die Luftqualität in den Wintermonaten unter den Emissionen von Holzfeuerungen erheblich leidet. Daher wurden in der Folge Massnahmen verabschiedet mit dem Ziel, die lokale Feinstaubbelastung und den PAK-Anteil im Feinstaub zu senken. Die Erfolgskontrolle dieser Massnahmen fand im **ersten Quartal des Jahres 2018** statt.

METHODE

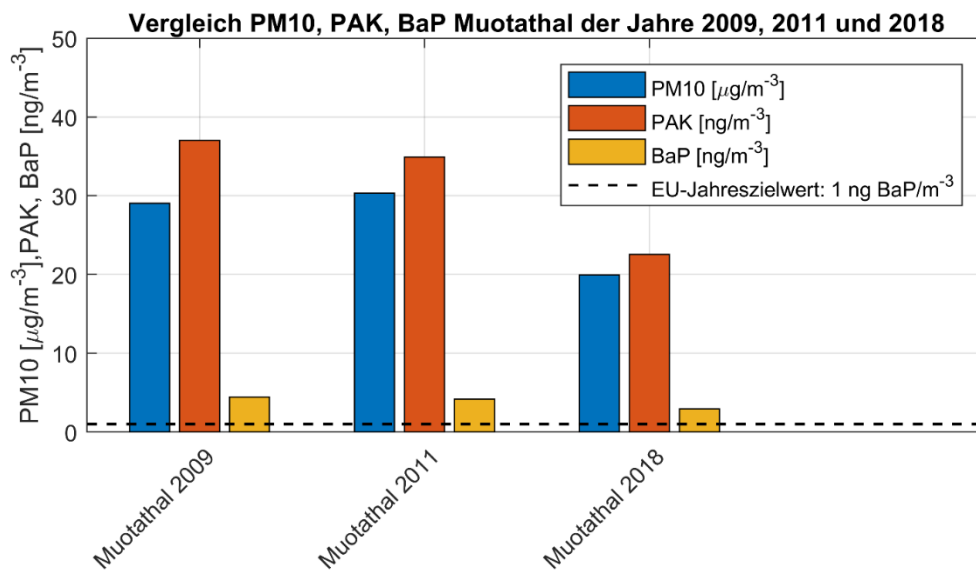
Die Feinstaubkonzentrationen (**PM10**) sowie die darin enthaltenen **PAK** (polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe) wurden untersucht. Ein erwiesenermassen krebserregender Bestandteil der PAK, **Benzo(a)pyren**, erhielt dabei besondere Aufmerksamkeit. Die Inversionen wurden durch das Temperaturprofil in Muotathal erfasst, wobei Inversionslagen bis 956 m ü. M. bestimmt werden konnten.

RESULTATE

Die Witterungsbedingungen haben einen grossen Einfluss auf die Schadstoffbelastung. Während des ersten Quartals 2018 waren die milden Temperaturen und die starken Stürme einerseits für eine gute Durchmischung der verschiedenen Luftmassen verantwortlich, während andererseits starke, teilweise auch hohe **Inversionslagen** die Durchmischung eingeschränkt haben, was sich in der PM10-Konzentration tendenziell widerspiegelte. Der Zusammenhang zwischen Inversionshäufigkeit und Feinstaubkonzentration konnte aufgezeigt werden, wenn die hohen Inversionslagen, welche mit dem vorhandenen Temperaturprofil nicht erfasst wurden, miteinbezogen wurden.

Im Vergleich zu den ersten beiden Messkampagnen sind die absoluten Konzentrationswerte von PM10, PAK und auch Benzo(a)pyren (BaP) zurückgegangen. Während der Messperiode 2018 wiesen die PM10-Konzentrationen an zwei Tagen LRV-Tagesmittelgrenzwertüberschreitungen auf. **Im Vergleich zu den beiden Messreihen in den Jahren 2009 und 2011 mit elf bzw. sieben Tagen mit Grenzwertüberschreitungen ist dies eine deutliche Abnahme und somit eine Verbesserung.** Ein Teil dieses Rückgangs ist jedoch auch meteorologisch bedingt. Der durchschnittliche PM10-Gehalt für diese drei Monate im Jahr 2018 liegt bei $20 \mu\text{g m}^{-3}$ und ist somit ebenfalls tiefer als in den beiden Vergleichsjahren mit 29 bzw. $30 \mu\text{g m}^{-3}$. Die Abnahme der Feinstaubbelastung ist im Muotathal in ähnlicher Grössenordnung wie an Vergleichsstationen.

Für die PAK-Substanzen resultierten im ersten Quartal 2018 ein Mittelwert von 21.8 ng m^{-3} . Die BaP-Konzentration im gleichen Zeitraum beträgt 2.8 ng m^{-3} . Diese absoluten PAK- sowie BaP-Werte sind tiefer als in den beiden Vergleichsjahren 2009 und 2011. Jedoch hat sich der prozentuale Anteil des PAK im PM10 im Vergleich zum Jahre 2011 nicht reduziert.



DISKUSSION

Im Vergleich mit den drei kantonalen und den elf NABEL-Stationen fällt ebenso wie in den Vorjahren auf, dass die Belastung durch PAK in Muotathal im schweizweiten Vergleich 2018 immer noch sehr hoch ist. **Die PAK-Belastung in Muotathal ist doppelt so hoch wie an anderen hoch belasteten Standorten wie San Vittore, Appenzell, Flums und Magadino, welche teilweise auch durch eine ausgeprägte Tallage und Holzfeuerungen charakterisiert sind.**

Zudem blieb der prozentuale Anteil der PAK im Feinstaub gleich gross und ist um Faktoren höher als an Vergleichsstandorten. **Das wiederum heisst, dass sich die Belastung mit den besonders schädlichen Luftschadstoffen noch nicht genügend reduziert hat**, um die erwünschten Verbesserungen zu erreichen, dies trotz der aufgegleisten und teilweise abgeschlossenen Massnahmen.

Der Zielwert des kanzerogenen BaP, welcher bei 1 ng/m^3 im Jahresmittel liegt, wird in den drei Monaten Januar bis März weiterhin deutlich überschritten.

SCHLUSSFOLGERUNG

Die getroffenen Massnahmen scheinen zwar sinnvoll gewählt, sind allerdings nicht ausreichend, um die Luftqualität wesentlich zu verbessern und das Projektziel zu erreichen. Aus diesem Grund müssen die bisher eingeleiteten Massnahmen zwingend beibehalten, verschärft und erweitert werden.

Die Emissionen von Gross- und Kleinfeuerungsanlagen als Emissionsquellen für die Schadstoffe in der Luft müssen weiterhin regelmässig kontrolliert werden. Das Potential des Ausbaus des Fernwärmenetzes anstelle von Kleinfeuerungen ist noch nicht ausgeschöpft und kann neben der fortlaufenden Sensibilisierung bei der Bevölkerung ein wichtiger Faktor für das gemeinsame Ziel einer verbesserten Luftqualität sein.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	- 5 -
2	Messkonzept	- 8 -
2.1	High-Volume-Sampler	- 10 -
2.1.1	PAK-Bestimmung.....	- 11 -
2.2	Meteomessungen.....	- 11 -
2.3	Temperaturprofil.....	- 12 -
2.4	Stickstoffdioxidmessungen (NO ₂).....	- 13 -
2.5	NABEL-Messnetz	- 13 -
2.6	Messkampagne 2009 vom Amt für Umwelt Schwyz.....	- 14 -
2.7	Emissionsdaten vom Amt für Umwelt Schwyz.....	- 14 -
2.8	inLUFT-Referenzstation Schwyz	- 14 -
2.9	Sonnenscheindauer	- 15 -
3	Witterungsverhältnisse	- 16 -
3.1	Niederschlag.....	- 16 -
3.2	Windverhältnisse.....	- 18 -
3.3	Inversionslagen und solare Einstrahlung.....	- 20 -
3.4	Zusammenfassung der Witterungsverhältnisse.....	- 26 -
4	Ergebnisse der Analysen.....	- 27 -
4.1	Feinstaub PM10.....	- 27 -
4.1.1	Zusammenhang mit meteorologischen Umgebungsbedingungen	- 31 -
4.2	Ergebnisse der PAK-Analysen	- 37 -
4.3	Vergleich mit der Messkampagnen 2011.....	- 39 -
4.3.1	Stickstoffdioxid- und PM10-Messungen in Muotathal im Vergleich mit der Referenzstation in Schwyz.....	- 41 -
4.3.2	Abnahme von PM10 in Muotathal im Vergleich zur Abnahme von PAK während der beiden Messkampagnen 2011 und 2018	- 43 -
4.4	Vergleich mit den Messkampagnen 2009 und 2011.....	- 44 -
4.5	Vergleich der Ergebnisse 2018 mit den NABEL-Stationen 2016	- 46 -
4.6	Interpretation PAK/PM10-Verhältnis.....	- 49 -
4.7	Zusammenhang von Emissionen und Immissionen	- 51 -
5	Getroffene Massnahmen aufgrund der Messkampagnen 2009 und 2011.....	- 53 -
6	Schlussfolgerungen.....	- 55 -

7	Anhang	- 56 -
7.1	Messwerte	- 56 -
7.2	Förderbeiträge in der Zentralschweiz für Erneuerbares Heizen	- 59 -
7.3	Informationsblatt der Gemeinde Muotathal	- 61 -

1 Einleitung

Die lokale Luftverschmutzung wird neben der Belastung durch den Verkehr zu einem grossen Teil durch Emissionen von Holzfeuerungen verursacht.^{1,2,3,4,5,6} In besiedelten Berggebieten wird die Luftqualität zusätzlich durch Inversionslagen beeinträchtigt: Die Topografie der Gebirgstäler begünstigt diese, vor allem während der Wintermonate.⁷ Während solcher Inversionslagen werden die Luftmassen schlechter durchmischt, weswegen Schadstoffe in Bodennähe stark akkumulieren können.⁸

Aus diesem Grund wurde im Jahre 2011 während der Monate Januar, Februar und März (JFM) eine Messkampagne in Muotathal lanciert.⁹ Diese untersuchte den Feinstaub (PM₁₀) sowie die Belastung durch die polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffe (PAK). Im Jahre 2018 wurde in denselben Monaten erneut eine Messkampagne durchgeführt. Damit wurde überprüft, ob sich die Immissionsbelastung im Vergleich zum Winter 2011 verändert hat. Die Wirksamkeit der ab dem Jahr 2011 umgesetzten Massnahmen konnte dadurch ebenfalls abgeschätzt werden.

Bei der Verbrennung von organischen Stoffen werden viele gas- und partikelförmige Luftschadstoffe freigesetzt, darunter auch Feinstaub (PM₁₀) und polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK). Bei PM₁₀ handelt es sich um Schwebestaub mit einem kleineren Durchmesser als 10 µm. PAK sind eine Klasse von organischen Verbindungen mit mindestens zwei miteinander verbundenen Benzolringen (Abbildung 1). Sie bilden sich, wenn organische Stoffe (z. B. Kohle, Heizöl, Treibstoff, Holz, Tabak) höheren Temperaturen ausgesetzt sind oder unvollständig verbrannt werden.^{10,11} Nebst den genannten

¹ PAH-Immissionsmessungen in den Kantonen Zürich, Schaffhausen und Luzern (1994/1995), Carbotech AG, Basel, 1995.

² Verursacher von Feinstaub, Teilbericht 1 PSI: Januar, Februar 2006, Teilbericht 2 uwe: Datenanalyse Reiden 2005/06, Umwelt und Energie (uwe), Abteilung Luft, Lärm, Energie und PSI, 2007.

³ Szidat, S., Prévôt, A. S. H., Sandradewi, J., Alfarra, M. R., Synal, H.-A., Wacker, L., and Baltensperger, U.: Dominant impact of residential wood burning on particulate matter in Alpine valleys during winter, *Geophys. Res. Lett.*, 34, L05820, doi:10.1029/2006GL028325, 2007.

⁴ Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) im atmosphärischen Feinstaub (PM₁₀), Rainer Jakoby, AfU SZ, 2010.

⁵ Zotter, P., Ciobanu, V. G., Zhang, Y. L., El-Haddad, I., Macchia, M., Daellenbach, K. R., Salazar, G. A., Huang, R.-J., Wacker, L., Hueglin, C., Piazzalunga, A., Fermo, P., Schwikowski, M., Baltensperger, U., Szidat, S., and Prévôt, A. S. H.: Radiocarbon analysis of elemental and organic carbon in Switzerland during winter-smog episodes from 2008 to 2012 – Part 1: Source apportionment and spatial variability, *Atmos. Chem. Phys.*, 14, 13551-13570, <https://doi.org/10.5194/acp-14-13551-2014>, 2014.

⁶ Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe im PM₁₀ an ausgewählten Stationen des NABEL sowie der Kantone, Messbericht 2016, Andrea Fischer und Christoph Hüglin, EMPA, Dübendorf September 2017.

⁷ Gehrig, R. and Buchmann, B.: Characterising seasonal variations and spatial distribution of ambient PM₁₀ and PM_{2.5} concentrations based on long-term Swiss monitoring data, *Atmos. Environ.*, 37, 2571–2580, doi:10.1016/s1352-2310(03)00221-8, 2003.

⁸ Luftbelastung in der Zentralschweiz: Detaillierte Messdaten 2017, Zentralschweizer Umweltfachstellen, Mai 2018.

⁹ Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) im atmosphärischen Feinstaub (PM₁₀), Feinstaubuntersuchung im Muotathal (Messkampagne 2011), Susanne Bieri, inNET Monitoring AG, Dr. Christian Ruckstuhl, inNET Monitoring AG, 26.01.2012.

¹⁰ WHO Regional Office for Europe (2000). Air quality guidelines for Europe, 2nd edition, Copenhagen; (http://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0005/74732/E71922.pdf).

¹¹ IARC (2010). Some Non-heterocyclic Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Some Related Exposures. Lyon, International Agency for Research on Cancer (IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, Vol. 92; <http://monographs.iarc.fr/ENG/Monographs/vol92/mono92.pdf>).

Prozessen wurden und werden zum Teil immer noch PAK-haltige Stoffe im Baubereich eingesetzt, z. B. teerhaltige Klebstoffe, bituminierte Dichtungs- und Dachbahnen, Asphalt-Fussbodenbeläge, Werkzeug- und Fahrradgriffe, Schuhe, Holzschutzmittel etc.^{12,13}

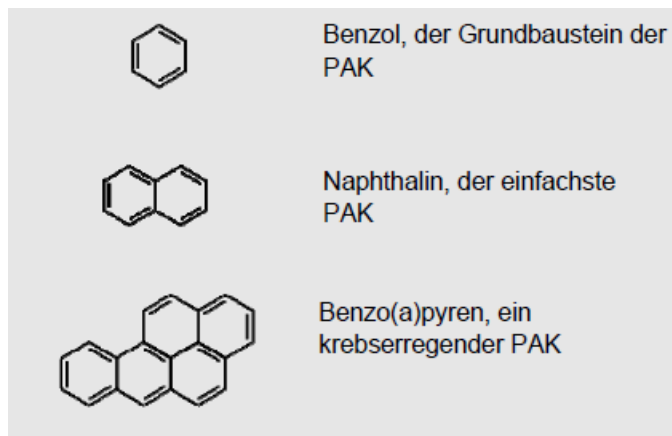


Abbildung 1: Strukturformeln von Benzol, Naphthalin und Benzo(a)pyren.¹⁴

Die amerikanische Bundesumweltbehörde EPA (Environmental Protection Agency) hat 16 dieser PAK-Verbindungen in die Liste der wichtigsten Umweltschadstoffe aufgenommen.^{15,16} Aus diesem Grund wurden seither diese aufgelisteten Schadstoffe stellvertretend für die ganze Stoffgruppe der PAK analysiert.¹⁶ Dieses Vorgehen wurde auch in diesem Bericht so angewendet. Mehrere PAK sind erwiesenermassen oder wahrscheinlich krebserregend oder können eine erbgutschädigende Wirkung haben.^{17,18} Als erwiesenermassen krebserregend gilt Benzo(a)pyren (BaP).¹⁶ Es dient zudem als Leitsubstanz, da sein Anteil relativ konstant 10 Prozent im PAK-Gemisch beträgt.^{14,16}

¹²https://www.lfu.bayern.de/abfall/schadstoffratgeber_gebaeuderueckbau/suchregister/doc/502.pdf, 2004 [Stand: 15.08.2018].

¹³ Polyzyklische Aromatische Kohlenwasserstoffe: Umweltschädlich! Giftig! Unvermeidbar?, Dr. Marc Brandt, Doreen Einhenkel-Arle, Umweltbundesamt Deutschland, 2016.

¹⁴ Factsheet: Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK), Bundesamt für Gesundheit BAG, November 2016.

¹⁵ <https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-09/documents/priority-pollutant-list-epa.pdf>, 2018.

¹⁶ Informationen zu besonders besorgniserregenden Stoffen Benzo(a)pyren, Bayerisches Landesamt für Umwelt, 2017.

¹⁷ WHO Regional Office for Europe (2000). Air quality guidelines for Europe, 2nd edition, Copenhagen; (http://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0005/74732/E71922.pdf).

¹⁸ IARC (2010). Some Non-heterocyclic Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Some Related Exposures. Lyon, International Agency for Research on Cancer (IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, Vol. 92; <http://monographs.iarc.fr/ENG/Monographs/vol92/mono92.pdf>).

Die Substanz wird unter anderem als Weichmacher in der Reifenproduktion verwendet.^{19,20} Der Europäische Zielwert von BaP liegt bei 1 ng m⁻³ für den Gesamtgehalt in PM10 gemittelt über ein ganzes Jahr.²¹

Studien belegen, dass vor allem in ländlichen Gebieten hohe PAK-Konzentrationen in bodennahen Luftschichten bestehen.^{22,23} Wie bereits zu Beginn erwähnt sind dafür die hohe Dichte an Holzfeuerungsanlagen sowie die im Winter und in Berggebieten auftretenden starken Inversionslagen verantwortlich. Auch im Muotathal wurden in der ersten Messkampagne 2011 sehr hohe PAK-Konzentrationen im Feinstaub gemessen. Dabei war die hiesige Luft im ersten Quartal 2011 teilweise deutlich stärker belastet als in verkehrsreichen und dicht besiedelten städtischen Ballungsräumen.²⁴

Die Messkampagne wurde im Jahre 2018 von der inNET Monitoring AG im Auftrag der Zentralschweizer Umweltschutzdirektorenkonferenz (ZUDK) wiederholt und verfolgte diese Ziele und Leitfragen:

- Immissionsbelastung (Feinstaub und PAK) im Vergleich zum Winter 2011 unter Berücksichtigung der meteorologischen Bedingungen (Temperatur, Heizgradtage, Niederschlag, Inversionsstärke, Inversionshöhe, Wind)
- Wie haben sich die Schadstoffverhältnisse von PM10, PAK und BaP im Vergleich zum Winter 2011 verändert?
- Vergleich der Messungen mit Referenzstandorten des NABEL-Messnetzes und mit schweizweitem langfristigen Trend
- Erfolgskontrolle der umgesetzten Massnahmen seit 2011: Sind weitere Massnahmen zur Emissionsreduktion notwendig?²⁵

¹⁹ https://de.wikipedia.org/wiki/Polycyclische_aromatische_Kohlenwasserstoffe, 2018 [Stand: 04.10.2018].

²⁰ Informationen zu besonders besorgniserregenden Stoffen Benzo(a)pyren, Bayerisches Landesamt für Umwelt, 2017.

²¹ Directive 2004/107/EC of the European parliament and of the council of 15 December 2004 relating to arsenic, cadmium, mercury, nickel and polycyclic aromatic hydrocarbons in ambient air. Official Journal of the European Union, L23, 3-16, EU-Commission, 2004.

²² Zotter, P., Ciobanu, V. G., Zhang, Y. L., El-Haddad, I., Macchia, M., Daellenbach, K. R., Salazar, G. A., Huang, R.-J., Wacker, L., Hueglin, C., Piazzalunga, A., Fermo, P., Schwikowski, M., Baltensperger, U., Szidat, S., and Prévôt, A. S. H.: Radiocarbon analysis of elemental and organic carbon in Switzerland during winter-smog episodes from 2008 to 2012 – Part 1: Source apportionment and spatial variability, *Atmos. Chem. Phys.*, 14, 13551-13570, <https://doi.org/10.5194/acp-14-13551-2014>, 2014.

²³ Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe im PM10 an ausgewählten Stationen des NABEL sowie der Kantone, Messbericht 2016, Andrea Fischer und Christoph Hüglin, EMPA, Dübendorf September 2017.

²⁴ Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) im atmosphärischen Feinstaub (PM10), Feinstaubuntersuchung im Muotathal (Messkampagne 2011), Susanne Bieri, inNET Monitoring AG, Dr. Christian Ruckstuhl, inNET Monitoring AG, 26.01.2012.

²⁵ Messkonzept: Nachmessungen zwecks Erfolgskontrolle: Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) im atmosphärischen Feinstaub (PM10) im Muotathal (SZ), Christian Ruckstuhl, inNET Monitoring AG, Melinda Suter, AfU Schwyz, 15.09.2017.

2 Messkonzept

Der Projektvorschlag der inNET Monitoring AG vom 15. September 2017 bildete die Grundlage für die Untersuchungen.²⁶ Darin werden das Messkonzept und die Messmethoden vorgeschlagen, welche im ersten Quartal des Jahres 2018 zur Anwendung kamen. Da die Zeitspanne der Monate Januar bis März der beiden Messkampagnen (1. Messkampagne Januar – März 2011, 2. Messkampagne Januar – März 2018) übereinstimmen, sind die Messungen direkt miteinander vergleichbar.

Die Luftschadstoffe wurden durch die Analyse von Proben des High-Volume-Sampler ermittelt. Meteorologische Daten (Temperatur, Niederschlag, Windgeschwindigkeit und -richtung) wurden von der Meteomesstation erfasst, welche durch die Firma inNET Monitoring AG für den Zeitraum der Messkampagne 2018 in der Nähe von Muotathal aufgestellt worden war. Für die Bestimmung des Temperaturprofils, der Inversionshöhe und der -häufigkeit wurden auf verschiedenen Höhenstufen sieben Sensoren der Firma inNET Monitoring AG aufgestellt.

Tabelle 1 gibt einen Überblick über die einzelnen Messgrössen, welche während der Messkampagne 2018 erfasst wurden. Abbildung 2 zeigt die Messstandorte rund um Muotathal auf. Der Standort der Meteomessungen (M) ist blau, jener der Feinstaubmessung (HVS) gelb eingezeichnet. Die Messpunkte des Temperaturprofils sind auf der Übersichtskarte rot markiert. Die Messmethoden zur Erfassung der Messgrössen werden nachfolgend detailliert beschrieben.

Tabelle 1: Messgrössen

Messgrösse	Messinstrument	Zeitliche Auflösung
Feinstaub PM10	Digital HVS mit Quarzfaserfilter, Gravimetrie durch Kantonales Labor in Aarau	Tagesmittel
PAK	Filteranalyse (16 PAK gemäss EPA) durch Niutec	Wochenmittel
Temperatur	WS300-UMB	10 min
Wind (Geschwindigkeit und Richtung)	WS200-UMB	60 min
Niederschlag	HyQuest TB3	10 min
Temperaturprofil	LoRa Temperatur- und Feuchtesensoren	10 min

²⁶ Messkonzept: Nachmessungen zwecks Erfolgskontrolle: Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) im atmosphärischen Feinstaub (PM10) im Muotathal (SZ), Christian Ruckstuhl, inNET Monitoring AG, Melinda Suter, AfU Schwyz, 15.09.2017.

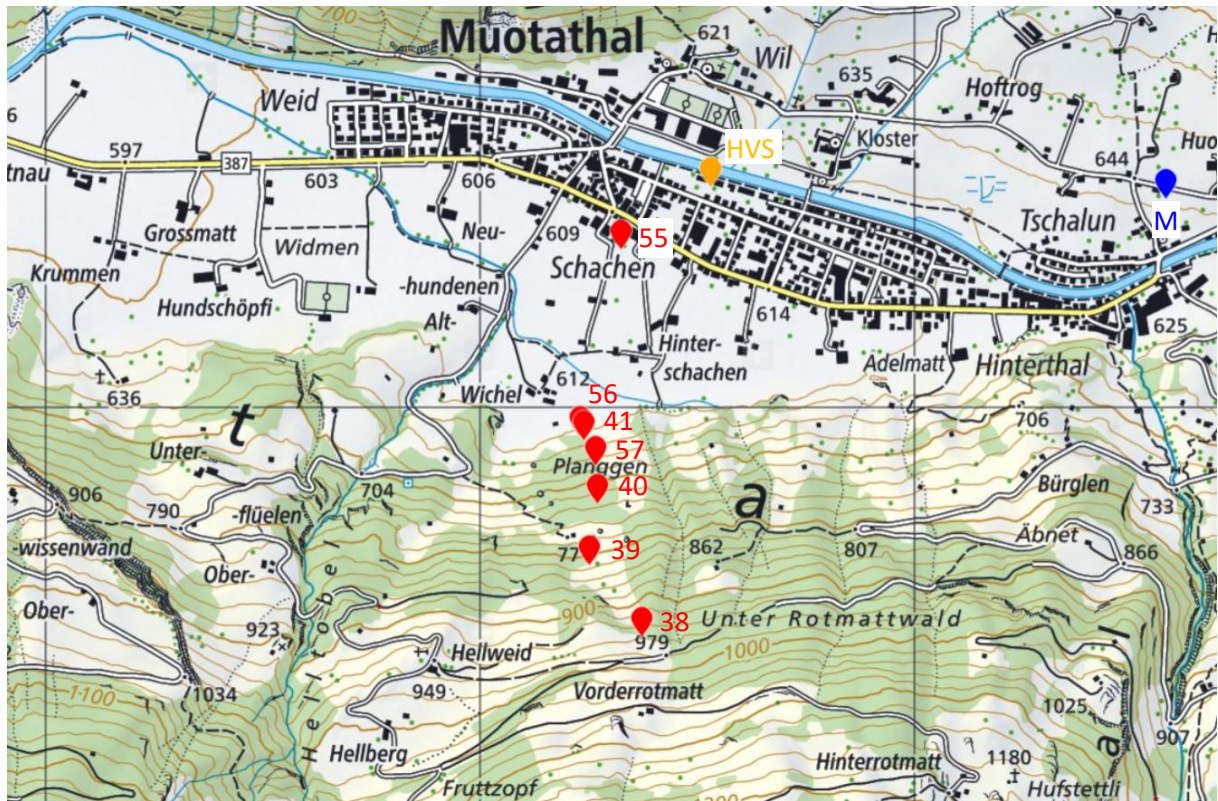


Abbildung 2: Übersicht der Meteo- (M) und Feinstaubmessung (HVS) sowie der Messpunkte des Temperaturprofils (STA 11555, 11556, 11541, 11557, 11540, 11539, 11538).²⁷

²⁷ © swisstopo, public.geo.admin.ch, 2018 [Stand: 04.08.2018].

2.1 High-Volume-Sampler

Die Messungen der Luftschadstoffe wurden mit einem Digital-High-Volume-Sampler (HVS) mit einem Quarzfaserfilter durchgeführt. Mit diesem Filter wird die tägliche Belastung durch Feinstaub ermittelt. Die Proben werden für die Messungen sowohl von Feinstaub (PM10) als auch PAK verwendet, da verschiedene Partikelgrößen detektiert werden können.

Der HVS wurde auf einem Privatgrundstück nahe dem Zentrum von Muotathal installiert (Abbildung 2 und Abbildung 3). Der Standort der Messkampagne 2018 stimmt mit jenem der ersten Messkampagne im Jahre 2011 überein, somit können die Messungen der Luftschadstoffe der beiden Jahre verglichen werden. Bei den erstmaligen Feinstaubmessungen in Muotathal im Jahre 2009 durch das Amt für Umwelt Schwyz²⁸ unterscheidet sich der Standort im Vergleich zu den beiden Messkampagnen im Jahre



Abbildung 3: Standort High-Volume-Sampler während der Messperiode 2018.

2011 und 2018 jedoch (Abbildung 4). Der Standort der Messung 2011 liegt einige Meter von der Messstelle von 2009 entfernt (Abbildung 4). Die Nähe zum Haus und insbesondere zum Kamin am Standort von 2009 könnte die Feinstaubmessungen während der Messkampagne geringfügig beeinflusst haben. Deshalb wurde ein freistehender Standort für die Messperiode 2011 gewählt, welcher für die Messperiode 2018 übernommen wurde.

²⁸ Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) im atmosphärischen Feinstaub (PM10), Rainer Jakoby, AfU SZ, 2010.



(a)



(b)

Abbildung 4: Standort High-Volume-Sampler während Messperiode 2009 (a) und Messperiode 2011 und 2018 (b)

Die PM₁₀-Tagesmittelwerte wurden durch das Kantonale Labor in Aarau mittels gravimetrischer Massenbestimmung anhand der Probenahmen des HVS erhoben.

2.1.1 PAK-Bestimmung

Die amerikanische Bundesumweltbehörde EPA hat 16 PAK in die Liste der wichtigsten Umweltschadstoffe aufgenommen. Diese 16 PAK im Feinstaub wurden durch die Firma Niutec ausgewertet. Die Analyse wurde als Wochenmittel durchgeführt. Durch diese kontinuierliche Variante konnten die Substanzen direkt mit den Messungen des ersten Quartals 2011 verglichen werden.

2.2 Meteomessungen

Die Witterungsverhältnisse haben sowohl auf die Feinstaubemissionen als auch auf die -immissionen einen entscheidenden Einfluss. Anhand lokaler Meteomessungen kann der Zusammenhang zwischen Wetterparametern (Temperatur, Heizgradtagen, Inversionslagen und -höhe, Niederschlag) und Luftqualitätsparametern (PM₁₀ und PAK) aufgezeigt werden. Die Meteostation der inNET Monitoring AG befindet sich östlich von Muotathal (Abbildung 2; X-Koordinate: 2'701'578, Y-Koordinate: 1'203'478).

Abbildung 5 gibt einen Überblick der einzelnen Messinstrumente für die Meteomessungen. Mit a) ist die Niederschlagsmessung gekennzeichnet, welche auf der Höhe von 1.5 m vorgenommen wurde. Im Jahre 2011 war nur das Messinstrument beheizt, was bei starkem Schneefall zu Messungenauigkeiten führte, da der Einlass unbeheizt war. Bei der Niederschlagsmessung während der Messkampagne 2018 sind der Innenraum, die Auffangöffnung und der Trichter des Messinstruments beheizt. Das verhindert bei tiefen Temperaturen den Verlust der Niederschlagsdaten durch Einfrierung des Messinstruments und ermöglicht das Erfassen des Wasseräquivalents bei Schneefall. Die Beschriftung b) entspricht der Temperatur- und Feuchtemessung, welche auf einer Höhe von 2 m installiert war und ebenfalls über einen ventilierten Strahlenschutz verfügte. Auf einer Höhe von 9 m wurden die Windgeschwindigkeit und -richtung gemessen (Beschriftung c).

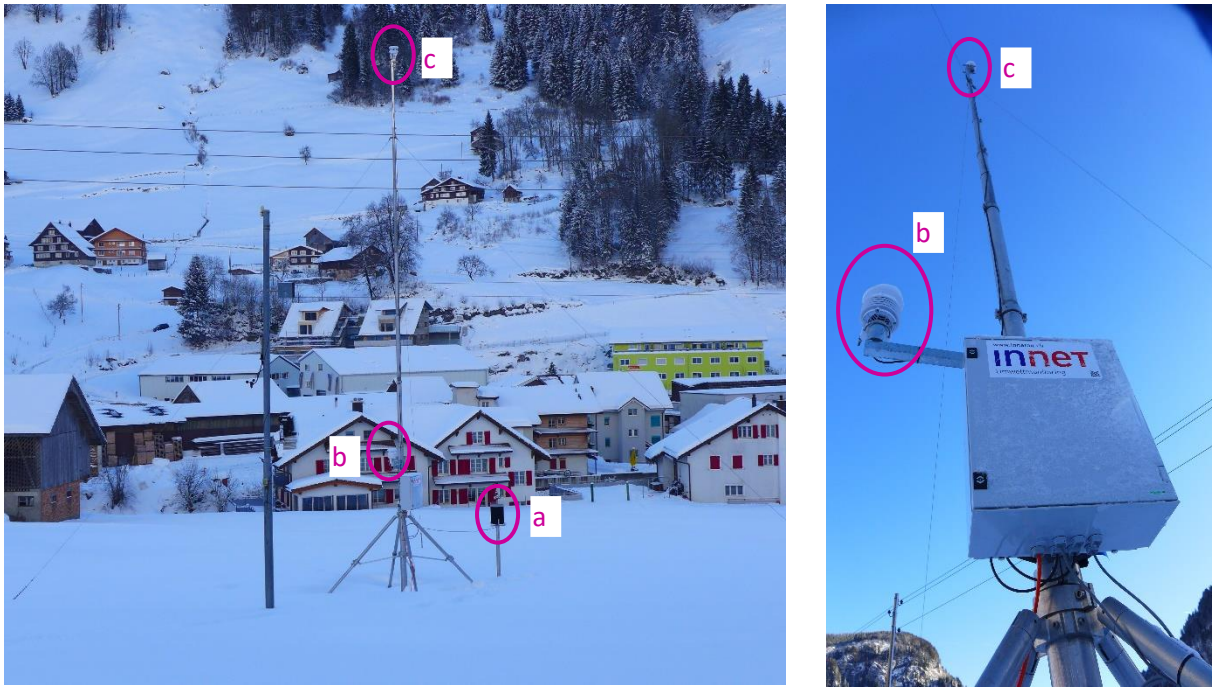


Abbildung 5: Meteostation in Muotathal mit einer Regenmessung (a), Temperatur- und Feuchtemessung (b) und einer Messung der Windrichtung und -geschwindigkeit (c).

2.3 Temperaturprofil

Um die Inversionshöhe, –häufigkeit und –stärke zu bestimmen, wurde ein Temperaturprofil gemessen. Tabelle 2 liefert eine Übersicht der sieben installierten Sensoren. Dabei wird ersichtlich, wo und auf welcher Höhe sich die einzelnen Temperaturmesspunkte befinden.

Tabelle 2: Informationen bezüglich des Temperaturprofils.

Sensor	Höhe (m ü. M.)	X-Koordinate	Y-Koordinate	Sensor-ID
1	611	2'700'325	1'203'362	11555
2	628	2'700'230	1'202'935	11556
3	637	2'700'238	1'202'922	11541
4	676	2'700'264	1'202'864	11557
5	734	2'700'270	1'202'777	11540
6	817	2'700'251	1'202'635	11539
7	956	2'700'372	1'202'471	11538

Vorgängig zur Messkampagne wurden die Temperatursensoren einer Parallelmessung unterzogen. Die minimalen Abweichungen der Sensoren wurden korrigiert. Das Temperaturprofil wurde im Nordhang südlich von Muotathal und grösstenteils im Wald erstellt (Abbildung 2). Die Temperatursensoren wurden jeweils an einer Stange befestigt (Abbildung 6). Dieses Verfahren ermöglichte eine einheitliche Temperaturmessung an den sieben Standorten.



Abbildung 6: Sensor 4 des Temperaturprofils

2.4 Stickstoffdioxidmessungen (NO₂)

Stickstoffdioxide (NO₂) werden mit sogenannten Passivsammelstellen im Rahmen des inLUFT-Projekts erhoben. Die Luft wird nicht aktiv angesogen. Die Messungen basieren vielmehr auf passivem Luftdurchfluss. Diese bereits vorhandenen Daten wurden für Schwyz (Herrengasse) und Muotathal verwendet, um deren Belastung im Vergleich zu PM₁₀ zu analysieren. Die NO₂-Daten sind als Monatsmittelwert für beide Messstandorte der Jahre 2011 und 2018 verfügbar. Analyse der gesammelten Messungen wurden durch die Forschungsstelle für Umweltbeobachtung AG (FUB) in Rapperswil durchgeführt.

2.5 NABEL-Messnetz

Das NABEL-Messnetz ist ein nationales Beobachtungsnetz für Luftfremdstoffe. Der aktuellste NABEL-Bericht wurde durch die EMPA verfasst, stammt aus dem Jahre 2017 und beschreibt unter anderem die PAK in PM₁₀ von ausgewählten kantonalen und NABEL-Stationen.²⁹ Die Daten stammen aus dem Jahre 2016 und werden in diesem Bericht mit den Messdaten von Muotathal verglichen. Die Daten stammen zwar nicht aus den gleichen Jahren, aber lassen trotzdem eine grobe Einschätzung der Situation in Muotathal im Vergleich mit schweizweit betriebenen Stationen zu. Die PM₁₀- und PAK-Kon-

²⁹ Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe im PM₁₀ an ausgewählten Stationen des NABEL sowie der Kantone, Messbericht 2016, Andrea Fischer und Christoph Hüglin, EMPA, Dübendorf September 2017.

zentrationen wurden quartalsweise für 11 NABEL-Stationen und drei kantonale Stationen erfasst. Neben der Erfassung von PM10 wurden die zehn relevantesten PAK ermittelt, welche auch in Muotathal gemessen wurden.

2.6 Messkampagne 2009 vom Amt für Umwelt Schwyz

Aufgrund der Vorkenntnisse über eine erhöhte Feinstaubbelastung in einem Gebirgstal während der Wintermonate fand im ersten Quartal des Jahres 2009 in Muotathal bereits eine erste Messkampagne durch das Amt für Umwelt (AfU) Schwyz statt.³⁰

Die im Bericht 2009 publizierten PM10-Konzentrationen sind im Vergleich zu den PAK-Werten korrekt wiedergegeben. Die PAK-Werte jedoch sind im Bericht der Messkampagne 2009 aufgrund einer falschen Berechnung der Filterfläche um 15 % zu hoch.

Die hier publizierten Werte der Messkampagne 2009 sind die neu korrekt berechneten Werte und werden zum Vergleich mit den beiden Messkampagnen 2011 und 2018 verwendet. Um die Vergleichbarkeit zu gewährleisten wurde die Summe PAK analog zu 2009 berechnet. Während dieser Messreihe 2009 wurden die zehn relevantesten PAK summiert, damit eine Vergleichbarkeit mit dem Bericht der PAK im PM10 der NABEL-Stationen des EMPAs gewährleistet war. Dieses Vorgehen wurde im Jahre 2011 analog angewendet. Somit besteht auch im Jahre 2018 die Summe PAK aus den zehn relevantesten PAK.

2.7 Emissionsdaten vom Amt für Umwelt Schwyz

Die Emissionsdaten von Feinstaub zu den grösseren Holzfeuerungsanlagen (>70 kW) stammten vom Amt für Umwelt (AfU) Schwyz. Neben den Informationen zum Feinstaub wurden auch Daten zur Leistung der grossen Holzfeuerungsanlagen sowie zur Anzahl der Kleinf Feuerungen zur Verfügung gestellt. Bei den Daten handelte es sich um einen Datenauszug des aktuellen Berichtjahres bis zum 09.08.2018.

2.8 inLUFT-Referenzstation Schwyz

Die inLUFT-Messstation in Schwyz diente als Referenzstation für Muotathal. Die gemachten PM10- und NO₂- Messungen aus der gleichen Zeitperiode konnten miteinander verglichen werden. In Schwyz gibt es kontinuierliche PM10-Messungen, welche mit viertägigen HVS-Messungen validiert wurden. Es gibt aber keine täglichen PM10-Messungen mit dem HVS in Schwyz. Aus diesem Grund wurden die kontinuierlichen Messungen, welche während eines Tages gemittelt wurden, mit den HVS-Daten verifiziert und, wenn nötig, angepasst. Für das erste Quartal 2018 wurde der Korrekturfaktor aus dem Jahre 2017 auf die Daten angewendet, da die Daten jeweils jährlich angepasst werden. Diese Korrektur lieferte vergleichbare Messdaten aus der gleichen Zeitspanne für Schwyz und Muotathal.

³⁰ Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) im atmosphärischen Feinstaub (PM10), Rainer Jakoby, AfU SZ, 2010.

2.9 Sonnenscheindauer

Die durchschnittliche potentielle Sonnenscheindauer in Muotathal während des ersten Quartals 2018 stammen von der Webseite www.suntag.ch und wurden für die Interpretation von Inversionen verwendet. Diese monatlichen Daten beschreiben die theoretische mögliche Sonnenscheindauer, da von der Annahme eines klaren Himmels ausgegangen wird.

3 Witterungsverhältnisse

Feinstaubimmissionen werden durch lokale Witterungsverhältnisse beeinflusst. Tabelle 3 zeigt die Zusammenfassung der meteorologischen Daten während der Messperiode von Anfang Januar 2018 bis Ende März 2018. Das erste Quartal 2018 war auf der Alpennordseite in den Tieflagen durch warme Temperaturen charakterisiert, wobei vor allem der sehr milde Januar mit landesweit höheren Temperaturen im Vergleich zur Norm 1981-2010 und der kurze Kälteeinbruch im Februar zu erwähnen ist.³¹ Während der Monate JFM war es sehr niederschlagsreich und die Sonnenscheindauer war unterdurchschnittlich tief, vor allem im Februar.³² Der Januar war zusätzlich geprägt durch den starken Wintersturm Burglind (01.01.2018 bis 05.01.2018) und die intensive Sturmperiode durch eine anhaltende stürmische Nordwest- und Westlage (16.01.2018 bis 22.01.2018).³³

Tabelle 3: Zusammenfassung der meteorologischen Daten während der Messperiode 2018

Meteorologische Grösse		Januar	Februar	März
Temperatur	Temperaturdurchschnitt [°C]	3.1	-2.2	3.1
Niederschlag	Monatssumme [mm]	262.2	65.2	142.4
Inversion	Mittlere Inversionshäufigkeit [%]	80.4	51.3	60.4

Tabelle 4 zeigt als Vergleich die vorherrschenden Witterungsverhältnisse für das Jahr 2011. Das erste Quartal von 2011 war auf der Alpennordseite sonniger und milder als normal und geprägt von ausserordentlicher Trockenheit.³⁴

Tabelle 4: Zusammenfassung der meteorologischen Daten während der Messperiode 2011

Meteorologische Grösse		Januar	Februar	März
Temperatur	Temperaturdurchschnitt [°C]	-1.2	0.5	5.0
Niederschlag	Monatssumme [mm]	47.6	57.6	50.4
Inversion	Mittlere Inversionshäufigkeit [%]	74.3	65.4	45.2

3.1 Niederschlag

Abbildung 7 zeigt die Niederschlagstagesummen an der Meteostation in Muotathal. Während der Messperiode 2018 kam es zu vermehrten Niederschlagsereignissen. Die zwei Niederschlagsextreme im Januar korrespondieren mit den zeitgleich stattfindenden Winterstürmen zu Monatsanfang und Monatsmitte. Der Februar ist der niederschlagsärmste Monat in Muotathal und im März gibt es ein

³¹ Klimabulletin Januar 2018, Februar 2018, März 2018, MeteoSchweiz.

³² Klimabulletin Winter 2017/2018, Februar 2018, MeteoSchweiz.

³³ Klimabulletin Januar 2018, MeteoSchweiz.

³⁴ Witterungsbericht Januar 2011, Februar 2011, März 2011, MeteoSchweiz.

weiteres Niederschlagsmaximum, welches mit der wechselhaften Witterung und den damit verbundenen häufigen Schauern auf der Alpennordseite einhergeht.³⁵ Die Niederschlagsmessungen 2018 waren mit komplett beheizten Messinstrumenten durchgeführt worden, was Messungenauigkeiten zum Vergleichsjahr 2011 minimiert hatte. Im Vergleich zum Jahre 2011, wo die Niederschlagsmessungen von der Meteomedia Messstation³⁶ stammen, gab es rund 200 % mehr Niederschlag als im Jahre 2018. Da die Daten der Meteomedia Messstation von einem Pluviometer mit unbeheiztem Einlass stammen, wurden die Abweichungen zur Norm 1981-2010 mit der WMO-konformen MeteoSchweiz-Station in Altdorf verglichen. Im Jahre 2018 beträgt die Niederschlagssumme der Monate Januar bis März 140 bis 180 % der langjährigen Norm.³⁷ Im Vergleich dazu lag die Niederschlagssumme der Monate des ersten Quartals des Jahres 2011 bei 40 % der langjährigen Norm.³⁸

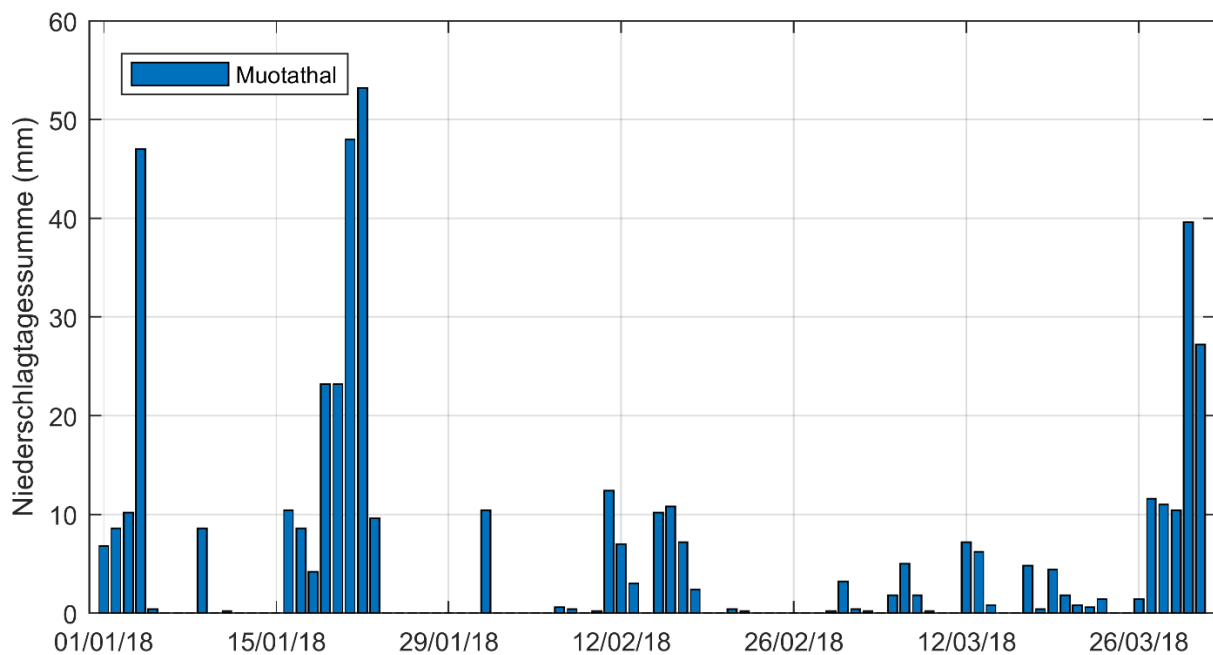


Abbildung 7: Niederschlagstagesummen an der Messstation Muotathal während der Messperiode 2018.

³⁵ Klimabulletin März 2018, MeteoSchweiz.

³⁶ Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) im atmosphärischen Feinstaub (PM10), Feinstaubuntersuchung im Muotathal (Messkampagne 2011), Susanne Bieri, inNET Monitoring AG, Dr. Christian Ruckstuhl, inNET Monitoring AG, 26.01.2012.

³⁷<https://www.meteoschweiz.admin.ch/home/klima/schweizer-klima-im-detail/monats-und-jahresgitterkarten.html> [Stand: 20.08.2018].

³⁸ http://www.meteoschweiz.admin.ch/web/de/klima/klima_schweiz/tabellen.html [Stand: 20.07.2011].

3.2 Windverhältnisse

Abbildung 8 zeigt die Windrose am Messstandort Muotathal. Dabei ist eine klare Häufung der Windrichtungen längst der Talrichtung ersichtlich (das heisst West- und Ostwind). Betrachtet man die Windverhältnisse in Muotathal nach Tag und Nacht getrennt, ist dies noch ausgeprägter zu erkennen.

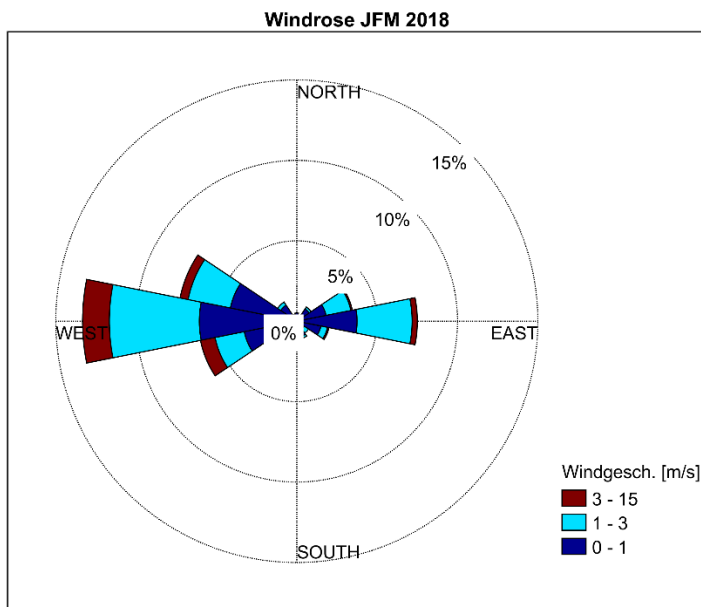


Abbildung 8: Windrose Muotathal: Die Länge der Sektoren entspricht der prozentualen Häufigkeit, mit welcher der Wind aus dem entsprechenden Sektor weht hat. Die Farben stehen für die Windstärken, wobei blau für 0 – 1 m/s, hellblau für 1 – 3 m/s und rot für 3 – 15 m/s steht.

Abbildung 9 visualisiert die Windverhältnisse während des Tages (Abbildung 9 a) und der Nacht (Abbildung 9 b). Dabei ist ein Tagesgang der Windrichtung festzustellen. Während des Tages weht der Wind talaufwärts, das heisst es herrschen Westwindverhältnisse vor. Während der Nacht herrschen sowohl West- wie auch Ostwindverhältnisse vor, das heisst talab- wie aufwärtsgerichtete Winde werden etwa gleichermassen beobachtet.

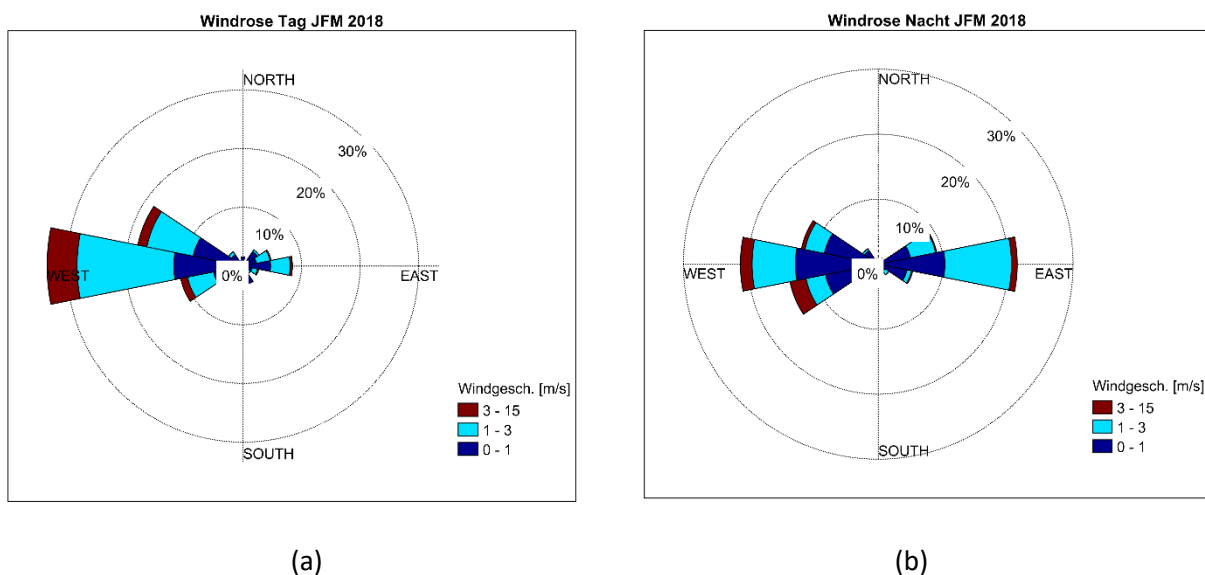


Abbildung 9: Windrose (a) während des Tages (08:00 - 17:00 Uhr) und (b) während der Nacht (17:00 - 08:00 Uhr)

Die Häufung des Talwindes während des Tages ist typisch für Alpentäler und ist thermisch bedingt. Die mittlere Windgeschwindigkeit während des ersten Quartals des Jahres 2018 beträgt 1.24 m/s. Die Messstation Sedel in Ebikon weist über dieselbe Zeitspanne eine mittlere Windgeschwindigkeit von 2.05 m/s auf, die Station Altdorf Gartenmatt 2.8 m/s. Somit sind die Windgeschwindigkeiten in Muotathal im Vergleich zu den beiden anderen Messstationen geringer. Im Vergleich zum Jahre 2011 ($v_m = 0.43 \text{ m/s}^{39}$) ist die mittlere Windgeschwindigkeit jedoch deutlich höher. Die erhöhte Sturmaktivität vor allem im Januar 2018 ist eine wesentliche Ursache für das erhöhte Mittel der Windgeschwindigkeit.

Die saisonale Veränderung des Windes ist exemplarisch für die Monate Januar und März in Abbildung 10 aufgezeigt. Winde aus westlicher Richtung sind im Frühjahrsmonat März deutlich ausgeprägter als im Wintermonat Januar. Dies kann mit der verstärkten Thermik im Frühlingsmonat erklärt werden. Die Bedeutung dieses Windregimes für die Schadstoffbelastung in Muotathal wird in Kapitel 4.6 erläutert.

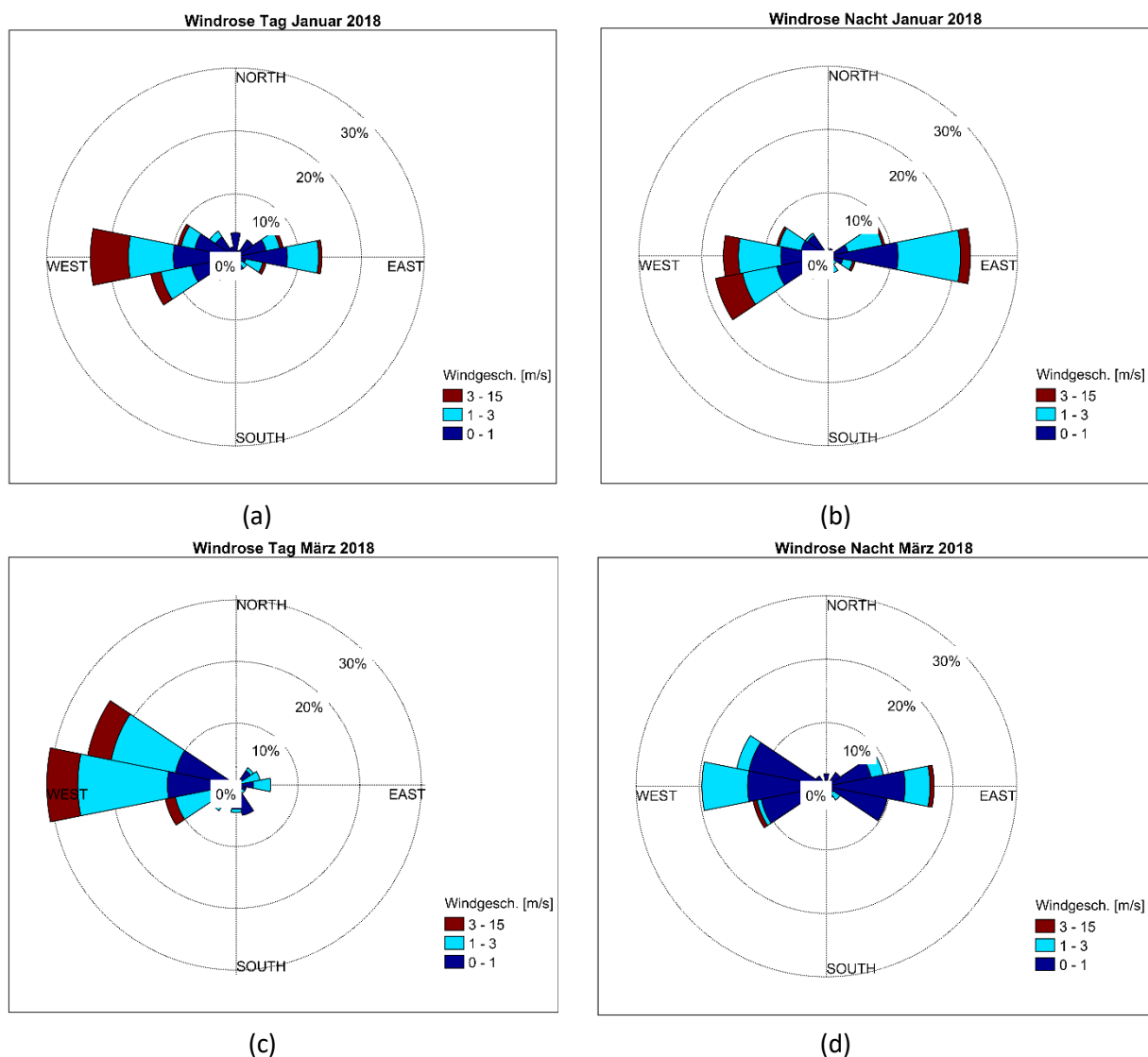


Abbildung 10: Windrosen während des Tages (08:00 - 17:00 Uhr) der Monate Januar (a) und (c) März und während der Nacht (17:00 - 08:00 Uhr) der Monate Januar (b) und März (d).

³⁹ Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) im atmosphärischen Feinstaub (PM10), Feinstaubuntersuchung im Muotathal (Messkampagne 2011), Susanne Bieri, inNET Monitoring AG, Dr. Christian Ruckstuhl, inNET Monitoring AG, 26.01.2012.

3.3 Inversionslagen und solare Einstrahlung

Auf sieben Höhenlagen über Muotathal wurde eine Temperaturmessung durchgeführt (Abbildung 2). Dadurch ist es möglich, ein Temperaturhöhenprofil zu erstellen und sowohl die Inversionshöhe wie auch die -stärke zu berechnen. Inversionen sind stabile Luftschichtungen, welche eine Umkehrung der normalen Temperaturverhältnisse aufzeigen.^{40,41} Bei einer Inversionslage nimmt die Temperatur somit nicht wie normalerweise mit der Höhe ab, sondern zu. Als Folge davon ist nur eine verminderte Luftdurchmischung möglich, was zu erhöhten Immissionen von Luftschadstoffen führen kann. Dieses Phänomen tritt vermehrt an Orten auf, welche über eine sehr enge Tallage aufweisen, wie das zum Beispiel in Muotathal der Fall ist. In beiden Messkampagnen wurde eine Inversion als ein positiver Temperaturgradient von $>1^{\circ} \text{C}/100 \text{ m}$ definiert.

Abbildung 11 zeigt den mittleren Tagesgang der Inversionshäufigkeiten während der Monate des ersten Quartals von 2018. Dabei wird aufgezeigt, wie häufig Inversionen in den verschiedenen Höhenlagen der Temperaturprofilmessung auftreten. Deutlich ersichtlich ist dabei die erhöhte Inversionshäufigkeit summiert über die verschiedenen Höhenlagen in den Morgen- und Abendstunden. Dieser Tagesgang kommt durch die Sonneneinstrahlung zustande. Bei der engen Tallage in Muotathal erreicht die Sonne erst spät am Vormittag den Talboden. Durch die Sonneneinstrahlung wird im Talboden Thermik generiert, welche die stabile Schichtung aufzulösen vermag. Die Inversionsschicht stellt sich bei Sonnenuntergang wieder ein und bleibt über die Nacht bestehen. In Abbildung 11 ist zusätzlich eine erhöhte Inversion in bodennahen Schichten zu erkennen. Dabei sind die Inversionshäufigkeiten in der Höhe von 628 m und teilweise auch in 637 m am grössten. Je tiefer die Inversionsschicht liegt, desto kleiner ist das Luftvolumen, in welchem die emittierten Schadstoffe akkumuliert werden.^{42,43} Das führt zu einer erhöhten Feinstaubbelastung in tiefen Inversionslagen.⁴⁴

⁴⁰<https://www.meteoschweiz.admin.ch/home/wetter/wetterbegriffe/nebel-hochnebel/inversionen-und-schadstoffbelastung.html> [Stand: 20.08.2018].

⁴¹Inversionswetterlagen und ihr Einfluss auf Luftschadstoffe im Kanton Uri, InNet Monitoring AG, Amt für Umweltschutz (Hrsg.), September 2018.

⁴²<https://www.meteoschweiz.admin.ch/home/wetter/wetterbegriffe/nebel-hochnebel/inversionen-und-schadstoffbelastung.html> [Stand: 20.08.2018].

⁴³ Luftbelastung in der Zentralschweiz: Detaillierte Messdaten 2017, Zentralschweizer Umweltfachstellen, Mai 2018.

⁴⁴ Inversionswetterlagen und ihr Einfluss auf Luftschadstoffe im Kanton Uri, InNet Monitoring AG, Amt für Umweltschutz (Hrsg.), September 2018.

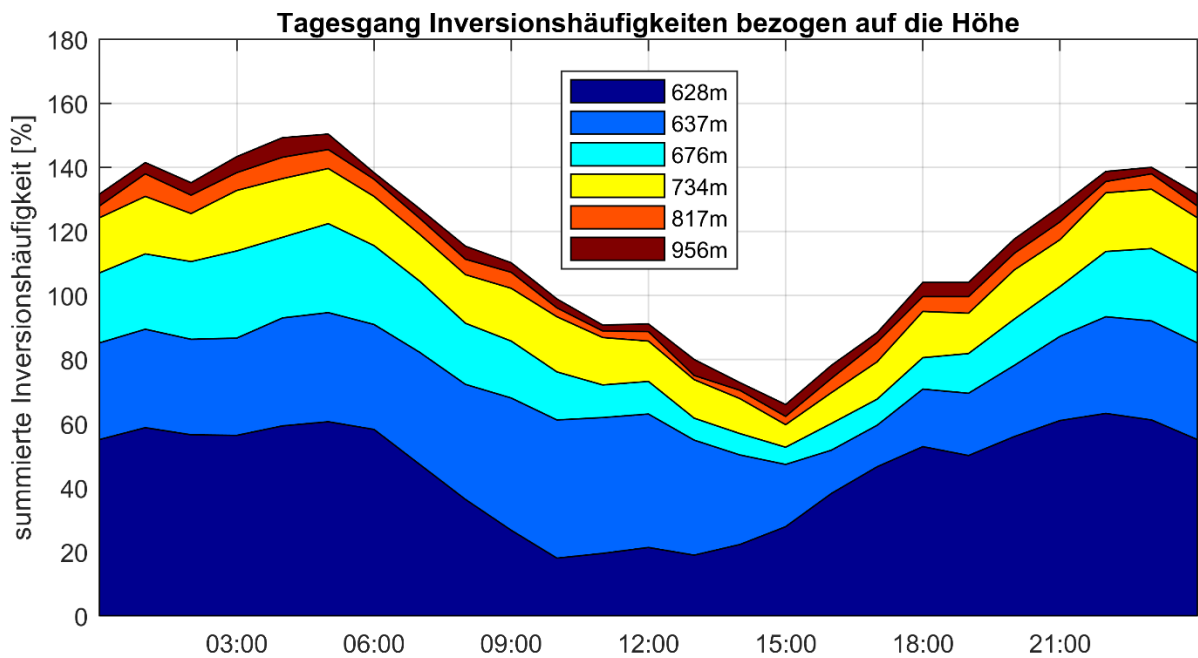


Abbildung 11: Mittlerer Tagesgang der Inversionshäufigkeiten bezogen auf die Höhe

In Abbildung 12 ist der Tagesgang der kumulierten Inversionshäufigkeiten der beiden Jahre 2011 und 2018 ersichtlich. Dabei wurden die Inversionshäufigkeiten der verschiedenen Inversionsschichten addiert. Es fällt auf, dass in beiden Jahren das lokale Minimum Mitte Nachmittag und das lokale Maximum jeweils in den frühen Morgenstunden vorzufinden ist. Im Jahre 2018 sind die Inversionshäufigkeiten im Tagesverlauf betrachtet zu jedem Zeitpunkt kleiner als im Vergleichsjahr 2011. Das widerspiegelt sich auch im maximalen Häufigkeitswert, welcher im Jahre 2011 ein Wert von 211 % (06:00 Uhr) erreicht und im Jahre 2018 mit 150 % (05:00 Uhr) deutlich tiefer ausfällt.

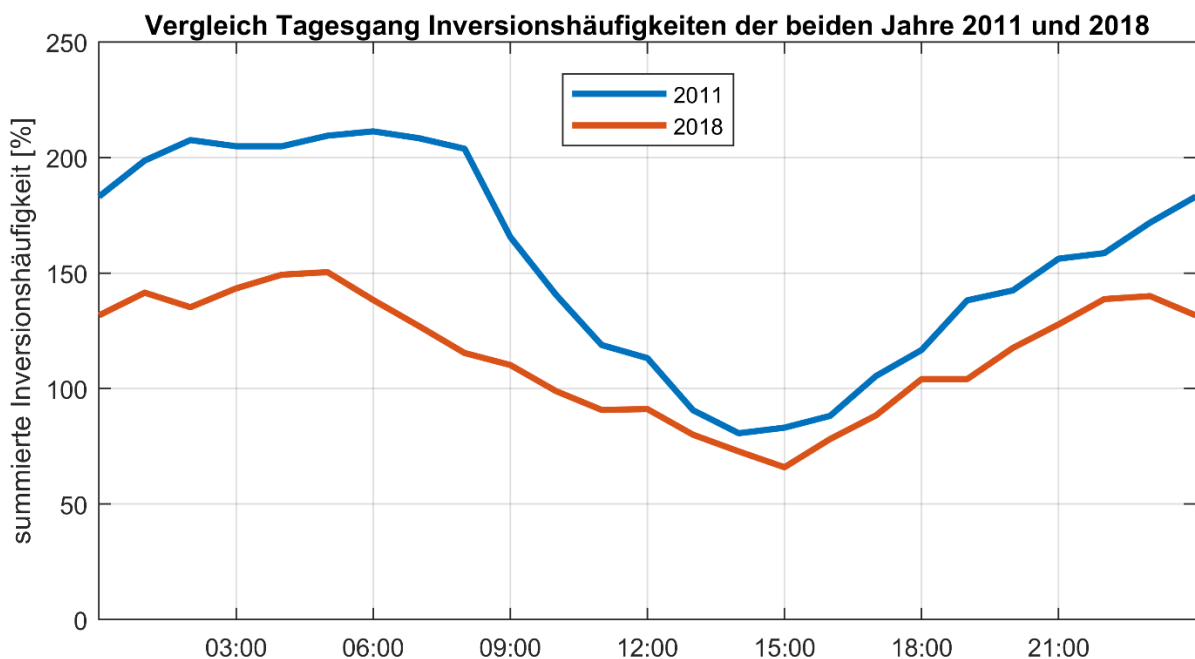


Abbildung 12: Vergleich des mittleren Tagesganges der kumulierten Inversionshäufigkeiten aller Inversionsschichten der beiden Jahre 2011 und 2018.

In Tabelle 5 ist der Vergleich der Inversionshäufigkeiten in der jeweiligen Inversionsschicht mit der entsprechenden Obergrenze der beiden Jahre 2011 und 2018 visualisiert (Abbildung 11). Dabei wurde der Mittelwert des Tagesganges jeder Inversionsschicht beider Jahre ermittelt, um die Inversionshäufigkeiten zu vergleichen. Es fällt auf, dass 2011 im Vergleich zu 2018 die Inversionshäufigkeit in allen Inversionsschichten bis auf die oberste deutlich höher war. Allerdings sind die Obergrenzen der Inversionsschichten nicht immer genau gleich hoch.

Tabelle 5: Vergleich Inversionshäufigkeiten der verschiedenen Inversionsschichten (in %) mit den jeweiligen Obergrenzen der beiden Jahre 2011 und 2018.

Obergrenze der verschiedenen Inversionsschichten beider Jahre (2011 / 2018)	Gemittelte Inversionshäufigkeiten in [%] im Jahr 2011	Gemittelte Inversionshäufigkeiten in [%] im Jahr 2018
628 m / 628 m	52	45
657 m / 637 m	39	30
700 m / 676 m	25	17
747 m / 734 m	23	15
800 m / 817 m	16	5
959 m / 956 m	1	4

In Abbildung 13 ist die Obergrenze der tiefsten Inversionsschicht über die gesamte Messperiode (X-Achse: 01.01.2018 bis 31.03.2018) mit dem entsprechenden Tagesgang (Y-Achse: 00:00 Uhr bis 24:00 Uhr) abgebildet. Die einzelnen Farben entsprechen der Inversionshöhe, wobei weisse Werte bedeuten, dass im installierten Temperaturprofil keine Inversion festgestellt wurde. Es ist aber möglich, dass sich oberhalb von 960 m eine Inversionslage bildete und durch das aufgestellte Temperaturprofil nicht erfasst wurde.

Inversionen treten mehrheitlich in Höhen um 650 bis 700 m ü. M. auf. Das sind typische bodennahe Inversionen. In Abbildung 13 ist aber neben der Inversionshöhe auch der Tagesgang der Inversionen ersichtlich, welche vermehrt in den Morgen- und Abendstunden auftreten. Mit zunehmender Sonneneinstrahlung gegen Ende der Messperiode (März 2018) wird das Zeitfenster ohne Inversion (weisse Punkte) während der Mittagsstunden immer breiter. Die längere Sonnenscheindauer fördert die Thermik in der engen Tallage und sorgt für eine verbesserte Durchmischung der verschiedenen Luftmassen. Weiter fällt auf, dass es mehrere Perioden ohne Inversion gibt, z. B. Ende Februar bis Anfang März 2018. Es kann aber wiederum sein, dass sich eine Höheninversion bildete, welche durch das Temperaturprofil einfach nicht erfasst wurde. Dies wird ausführlicher in Tabelle 6 eruiert und in Abbildung 15 visualisiert.

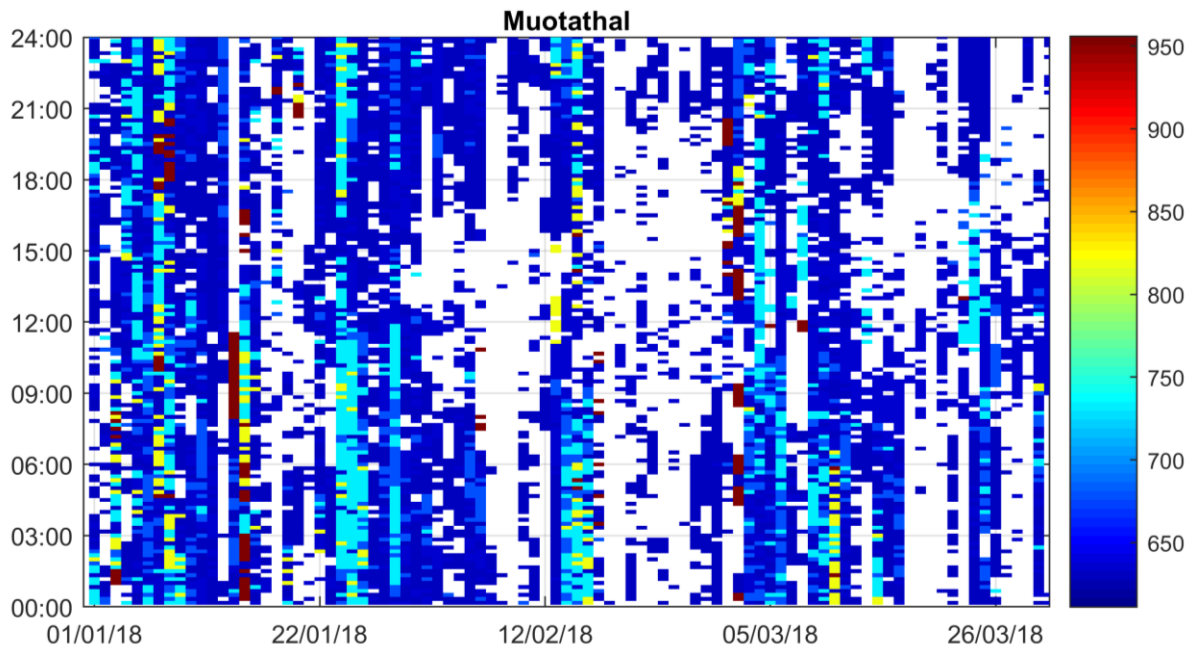


Abbildung 13: Obergrenze (in m) der Inversionsschichten (weiss = keine gemessene Inversion).

Abbildung 14 zeigt, analog zur Abbildung 13, die Inversionsstärke in $^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ über die gesamte Inversionsschicht. Das ganze erste Quartal 2018 ist geprägt durch starke ganztägige Inversionen. Zudem treten am Anfang und am Ende des ersten Quartals häufig starke Inversionslagen auf. Im Verlaufe des Quartals gibt es vereinzelt Fälle von keiner oder schwacher Inversion um die Mittagsstunden.

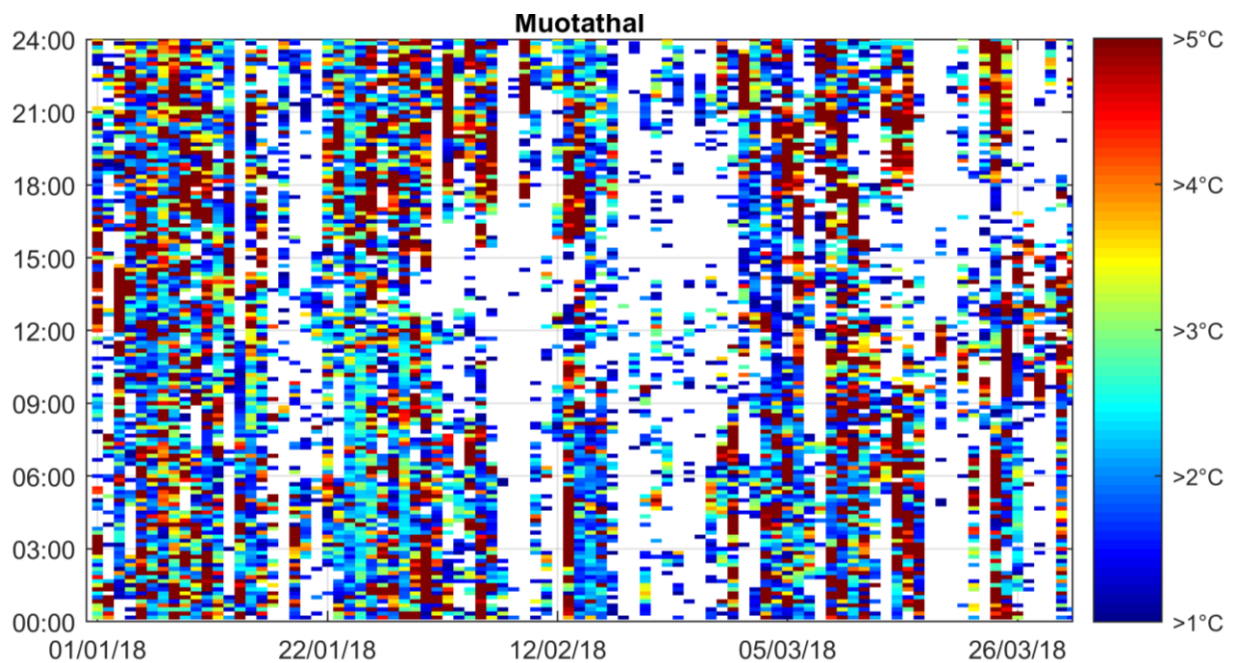


Abbildung 14: Inversionsstärke (in $^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$) über die gesamte Inversionsschicht

Der höchstgelegene Temperatursensor des Höhenprofils war auf 956 m ü. M. positioniert. Aus diesem Grund wurden einige höhere Inversionslagen mit dem installierten Temperaturprofil nicht erfasst. Anhand der Klimabulletins⁴⁵ und der Inversionsprognosen⁴⁶ der MeteoSchweiz und mithilfe von Webcambildern⁴⁷ wurden 15 Tage mit hohen Feinstaubkonzentrationen eruiert, während denen starke Inversionen auftraten, welche aber nicht mithilfe des Temperaturprofils gemessen werden konnten. In Tabelle 6 sind diese 15 Tage mit der vorherrschenden Wetterlage beschrieben. Dabei fallen vor allem vier Zeitperioden während des ersten Quartals des Jahres 2018 auf. Mitte Januar (14./15.01.2018) ist die Wetterlage dominiert durch Kaltluftseen mit einer Obergrenze von bis zu 1200 m ü. M. Im Februar gibt es zwei Zeiträume (07. bis 09. 02. und 18. bis 26.02.2018), welche durch Hochnebel geprägt waren. Insbesondere die zweite Zeitperiode war zusätzlich durch eine langanhaltende Bisenlage charakterisiert. Mitte März (18. bis 20.03.2018) ist die Wetterlage ebenfalls durch Bise und Hochnebel geprägt. Abbildung 15 zeigt die in Tabelle 6 eruierten Tage mit hohen Inversionslagen in den beiden Grafiken zur Obergrenze der Inversionsschichten und der entsprechenden Inversionsstärke (Abbildung 13 und Abbildung 14). Dabei sind oftmals die Tage ohne gemessene Inversion (weiss) betroffen. Das heisst, dass es tatsächlich Höheninversionen gab, die nicht durch das Temperaturprofil erfasst wurden. Diese Höheninversionen hatten lokal eine verminderte Luftdurchmischung zur Folge, wodurch die Akkumulation von Luftschadstoffen auch an diesen Tagen begünstigt wurde.

Tabelle 6: Tage mit hohen Inversionen

Datum	Inversionshäufigkeit	Wetterlage gemäss der Witterungsberichte
14.01.2018	49 %	Bisenlage, Kaltluftsee, Obergrenze 1200 m ü. M.
15.01.2018	93 %	Kaltluftsee, Obergrenze 1000 m ü. M. (Hochnebelbildung im Verlaufe des Tages)
07.02.2018	11 %	Bisenlage, Hochnebel, Obergrenze 1400 m ü. M.
08.02.2018	4 %	Bisenlage, lokal Hochnebel, Obergrenze 1200 – 1400 m ü. M.
09.02.2018	4 %	Hochnebel, Obergrenze 1400 m ü. M. (tagsüber zeitweise Aufhellungen und teilweise Auflösung des Hochnebels)
18.02.2018	3 %	Bisenlage, Hochnebel, auf rund 2000 m ü. M.
21.02.2018	35 %	Bisenlage, Hochnebel, Obergrenze 2500 m ü. M.
22.02.2018	26 %	Bisenlage, Hochnebel, Obergrenze 2400 m ü. M.
23.02.2018	22 %	Bisenlage, Hochnebel, Obergrenze 2000 m ü. M.
24.02.2018	12 %	Bisenlage, Hochnebel, Obergrenze 1500 m ü. M.
25.02.2018	13 %	Bisenlage, Hochnebel, Obergrenze 1800 m ü. M.
26.02.2018	31 %	Bisenlage, Hochnebel, Obergrenze 1700 m ü. M. (wechselhaft Hochnebelsituation mit zeitweisen Aufhellungen)
18.03.2018	3 %	Bisenlage, Hochnebel, Obergrenze 1000 m ü. M.
19.03.2018	20 %	Bisenlage, Hochnebel, Obergrenze 2400 m ü. M.
20.03.2018	9 %	Bisenlage, Hochnebel, Obergrenze 1600 m ü. M.

⁴⁵ Klimabulletin Januar 2018, Februar 2018, März 2018, MeteoSchweiz.

⁴⁶ Inversionswetterbericht für die Zentral- und Ostschweiz, 01.01. bis 31.03 2018, MeteoSchweiz.

⁴⁷ <http://www.muotathal-webcam.ch>.

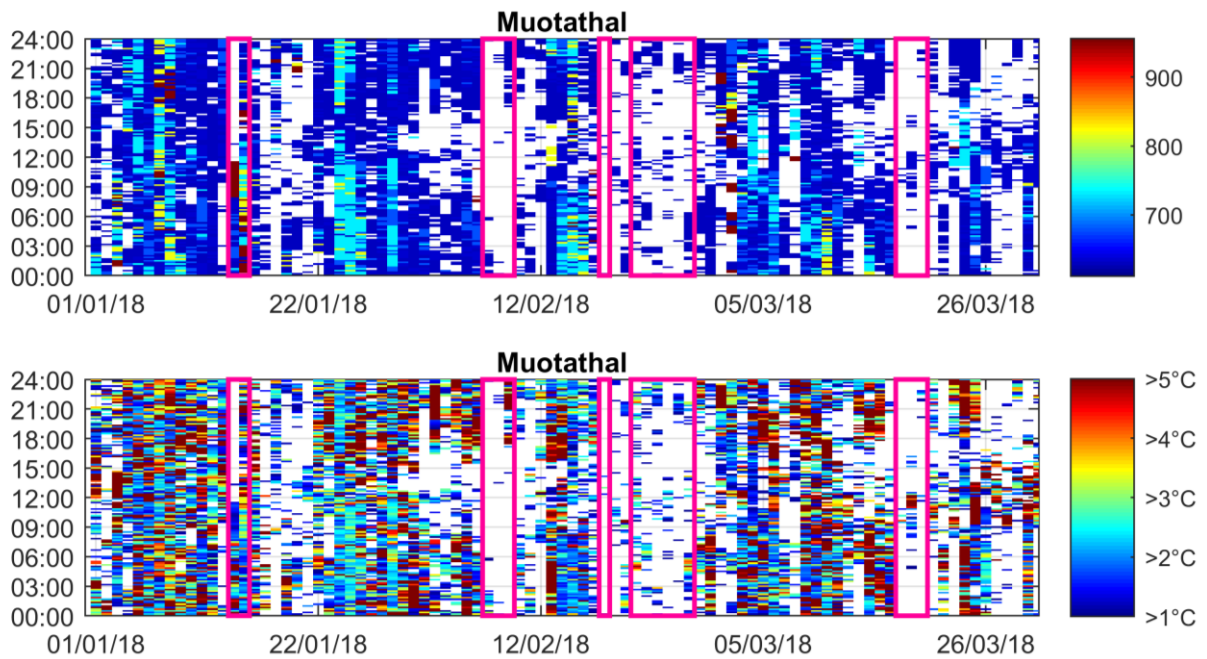


Abbildung 15: Obergrenze (in m) der Inversionsschichten (oben) und Inversionsstärke (in °C/100 m) über die gesamte Inversionsschicht (unten), keine Inversion (weiss), Tage mit hohen Inversionen gemäss Tabelle 6 (pink umrandet).

Das verminderte Auftreten von Inversionen in den Mittagsstunden im März hat seinen Ursprung in der verstärkten Sonneneinstrahlung. Diese verursacht eine thermische Durchmischung der Luftmassen. Die Sonneneinstrahlung muss allerdings genügend stark sein, um eine stabile Inversionsschicht auflösen zu können. Abbildung 16 zeigt die durchschnittliche potentielle Sonnenscheindauer pro Tag für den Standort des HVS in Muotathal. Dabei wird die Annahme eines wolkenlosen Himmels getroffen.⁴⁸

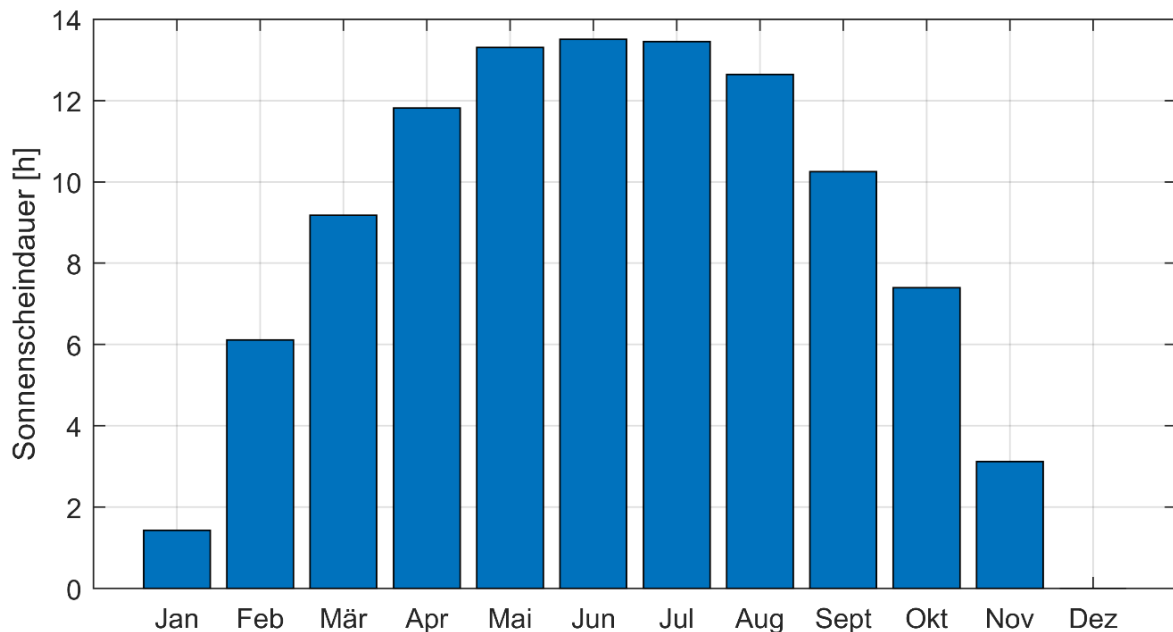


Abbildung 16: Durchschnittliche potentielle Sonnenscheindauer pro Monat (Annahme: klarer Himmel).

⁴⁸ <http://suntag.ch/index.php> [Stand: 05.07.2018].

Während der Wintermonate Dezember und Januar ist durchschnittlich keine oder nur eine geringe solare Einstrahlung zu verzeichnen.

Erst Mitte Januar erreicht die Sonne einen genügend hohen Stand, damit die Strahlung wieder auf den Talboden gelangt. Dies erklärt auch das vermehrte Auftreten der Inversionslagen über den gesamten Tag hinweg zu Beginn des ersten Quartals 2018 sowie das vergrösserte Zeitfenster ohne Inversion während der Mittagsstunden gegen Ende des ersten Quartals 2018.

Die effektive Sonnenscheindauer war im ersten Quartal 2018 unterdurchschnittlich tief, weshalb für das Jahr 2018 grössere Abweichungen von der potentiellen Sonnenscheindauer zu verzeichnen sind.

3.4 Zusammenfassung der Witterungsverhältnisse

Insgesamt zeigten die Witterungsverhältnisse in Muotathal während der Messperiode 2018 klare Charakteristiken auf:

- Deutliche Talwindzirkulation und geringe bis mittlere durchschnittliche Windgeschwindigkeit
- Viele Niederschlagsereignisse mit teilweise grossen Tagessummen
- Milde Temperaturen
- Deutlicher Tagesgang sowie saisonaler Gang der Inversionshäufigkeit
- Abhängigkeit der Inversion von der Sonnenscheindauer
- Häufiges Auftreten von bodennahen Inversionen

4 Ergebnisse der Analysen

4.1 Feinstaub PM10

Tabelle 7 zeigt die Zusammenfassung der PM10-Messungen über die gesamte Messperiode des Jahres 2018 im Vergleich zur Messkampagne 2011. Neben den Monatsmittelwerten für PM10 sind auch die Anzahl Tage, an welchen der gesetzliche Grenzwert überschritten wurde, aufgeführt. Der Grenzwert für den Tagesmittelwert für PM10 beträgt gemäss LRV (Luftreinhalteverordnung) $50 \mu\text{g m}^{-3}$. Dieser wurde im 1. Quartal 2018 insgesamt zweimal überschritten, während dies im Jahre 2011 an sieben Tagen der Fall war. Der Vergleich mit der Messkampagne 2011 ist grafisch detailliert in Kapitel 4.4 erläutert.

Tabelle 7: Zusammenfassung der PM10-Messungen der beiden Messkampagnen im Jahre 2011 und 2018

Monat	1. Quartal 2011			1. Quartal 2018		
	Jan	Feb	März	Jan	Feb	März
Monatsmittelwert PM10 [$\mu\text{g m}^{-3}$]	30.9	32.3	28.1	17.1	24.0	18.8
Höchster Wert PM10 [$\mu\text{g m}^{-3}$]	57.2	46.5	61.0	33.3	49.9	63.1
Niedrigster Wert PM10 [$\mu\text{g m}^{-3}$]	12.5	10.4	7.9	3.8	6.3	3.6
Anzahl Tage > LRV-Grenzwert ($50 \mu\text{g m}^{-3}$)	3	0	4	0	0	2
Mittlere Temperatur [$^{\circ}\text{C}$]	-1.2	0.5	5.0	3.1	-2.2	3.1

Die PM10-Konzentration, der Temperatur- und Niederschlagsverlauf während der Messperiode 2018 ist in Abbildung 17 dargestellt. Über die ganze Messperiode betrachtet ist der Temperaturverlauf geprägt durch den deutlich milden Januar, den kühlen Februar mit einem kurzanhaltenden Kälteeinbruch (27./28.02.2018) und den Temperaturanstieg im März. Teilweise ist zu beobachten, dass Niederschlagsereignisse dazu führen, dass in den darauffolgenden Tagen die PM10-Konzentrationen niedriger sind, beispielsweise um den 21.03.2018. Der Verlauf der der PM10-Konzentration ist weniger stark ausgeprägt mit vereinzelt Höchstwerten im Februar und im März. Allgemein betrachtet kann man nach einer Temperaturabnahme mit ein paar Stunden Verzögerung eine PM10-Zunahme feststellen, was im Zusammenhang mit vermehrter Heizaktivität stehen könnte. Der Zusammenhang von niedrigen PM10-Werten mit gleichzeitigem Auftreten von erhöhten Temperaturen und Niederschlagsereignissen ist nicht so deutlich stark ausgeprägt wie im Jahre 2011.⁴⁹

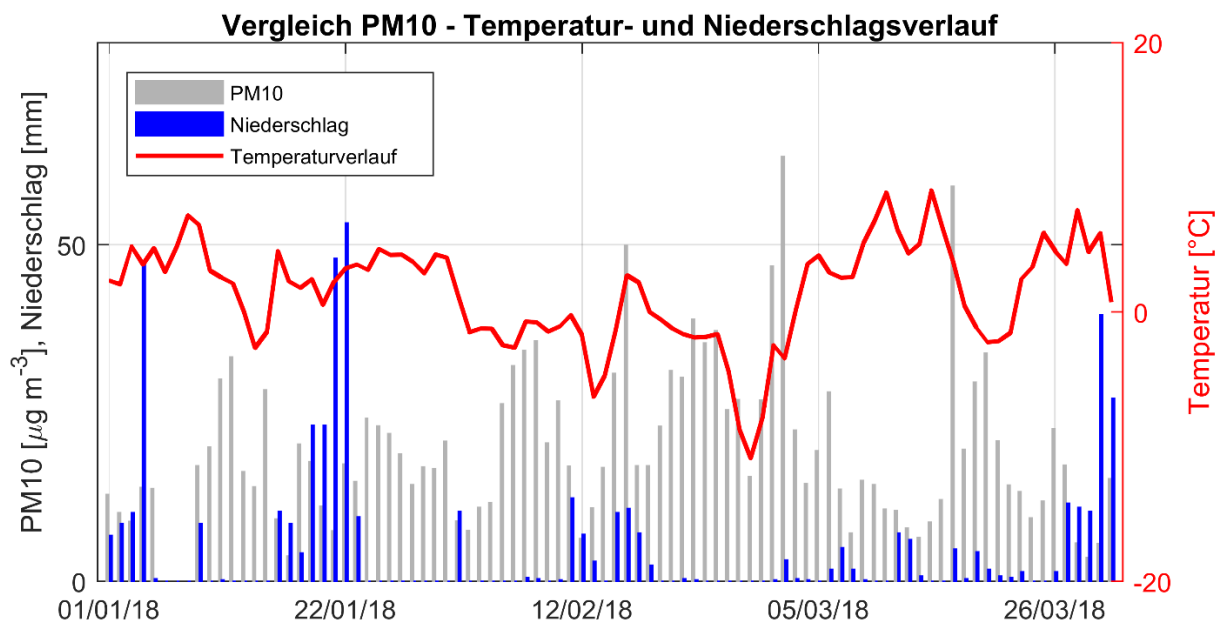


Abbildung 17: Temperatur- und Niederschlagsverlauf sowie Entwicklung der PM10-Konzentrationen während der Messperiode 2018. Bei der PM10 Lücke (06.01.2018 bis 08.01.2018) handelt es sich um ein Zeitfenster ohne Datenerhebung infolge eines technischen Defekts am HVS.

⁴⁹ Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) im atmosphärischen Feinstaub (PM10), Feinstaubuntersuchung im Muotathal (Messkampagne 2011), Susanne Bieri, inNET Monitoring AG, Dr. Christian Ruckstuhl, inNET Monitoring AG, 26.01.2012.

Abbildung 18 zeigt die PM10-Konzentrationen während der Messperiode 2018 an den Stationen Muotathal und der Referenzstation in Schwyz. Die Station Schwyz liegt nahe der Kantonsstrasse und ist der in-LUFT-Kategorie 4 zugeordnet (Städte/Regionalzentren). Ab dem zweiten Monatsdrittel Januar zeigen die zwei Standorte einen ähnlichen Verlauf der PM10-Konzentrationen. Dies verdeutlicht, dass Grosswetterlagen einen entscheidenden Einfluss auf die Feinstaubbelastung haben. Das Phänomen der höheren Feinstaubbelastung in Muotathal als in Schwyz wurde auch während der ersten Hälfte des Jahres im Jahr 2011 und 2009 in ausgeprägterer Form beobachtet.^{50,51} Dies dürfte damit zu erklären sein, dass am Standort des HVS in Muotathal bis zum 20.01.2018 keine Sonneneinstrahlung vorhanden ist und somit die lokalen Inversionslagen ganztätig bestehen bleiben.

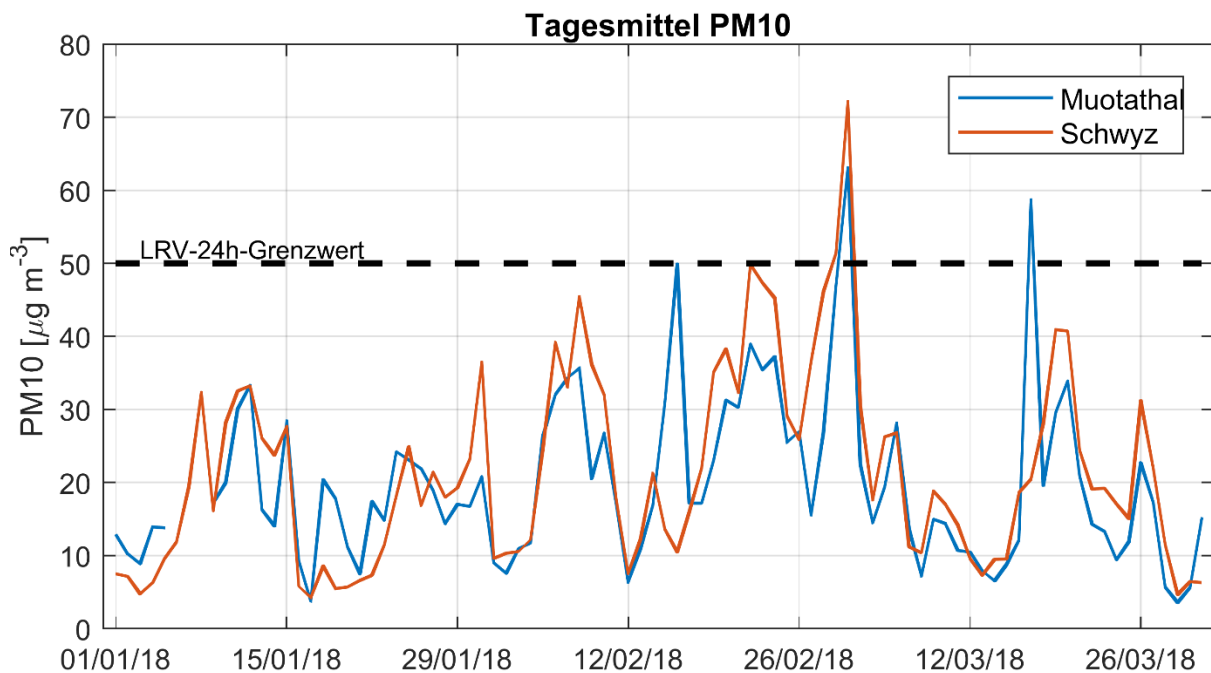


Abbildung 18: Zeitreihe der Tagesmittelwerte PM10 in Muotathal (blau) im Vergleich mit Schwyz (rot) während der gesamten Messperiode 2018.

Abbildung 19 zeigt den gemittelten Wochengang der PM10-Konzentrationen der Stationen Muotathal und Schwyz für 2018. Die exakten Zahlen der Wochengänge für die beiden Stationen Muotathal und Schwyz im Jahre 2018 sind in Tabelle 8 ersichtlich. Der Unterschied zwischen der durchschnittlichen PM10-Konzentration von Montag bis Freitag und am Wochenende beträgt in Muotathal 11 %. Die Station Schwyz weist eine Differenz von gut 16 % auf. Der Wochengang mit höheren PM10-Konzentrationen werktags und tieferen PM10-Konzentrationen am Wochenende ist bei der Station in Schwyz also etwas stärker erkennbar als in Muotathal. Dieser Wochengang kommt hauptsächlich aufgrund der höheren Verkehrsbelastung und den damit verbundenen höheren Emissionen in Schwyz zustande. Nebst

⁵⁰ Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) im atmosphärischen Feinstaub (PM10), Rainer Jakoby, AfU SZ, 2010.

⁵¹ Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) im atmosphärischen Feinstaub (PM10), Feinstaubuntersuchung im Muotathal (Messkampagne 2011), Susanne Bieri, inNET Monitoring AG, Dr. Christian Ruckstuhl, inNET Monitoring AG, 26.01.2012.

dem Verkehr haben in Muotathal vermutlich auch Gross- und Kleinemittenten von z.B. Holzfeuerungsanlagen einen Einfluss auf den Wochengang der PM10-Konzentrationen.

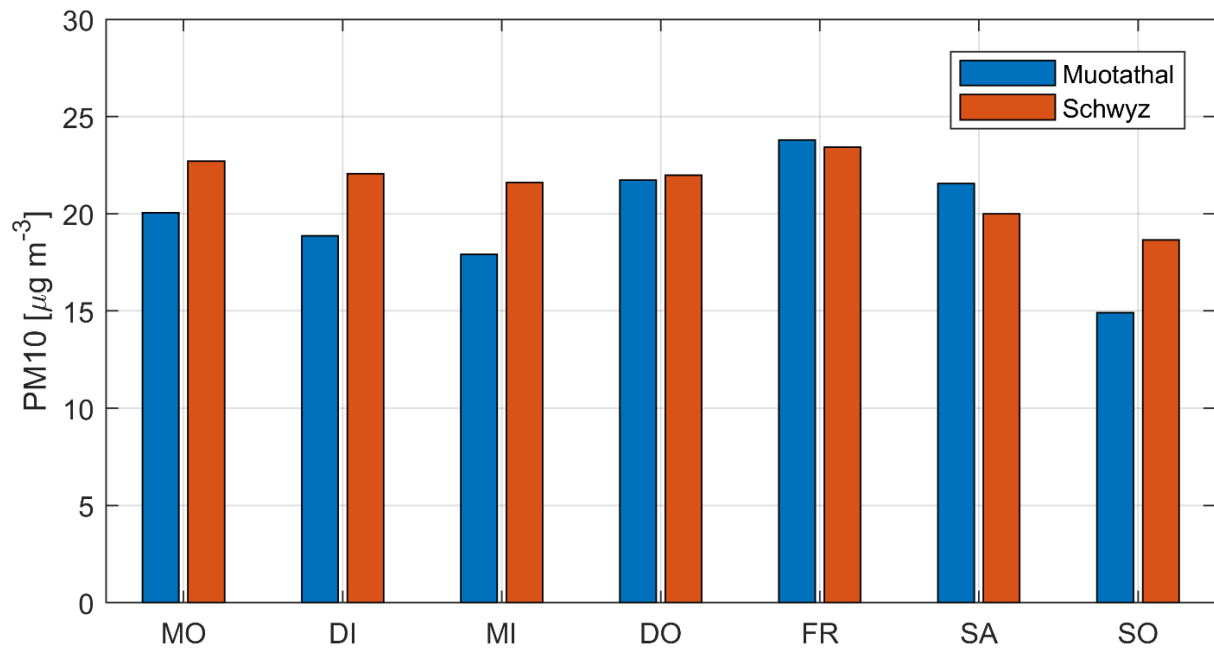


Abbildung 19: Wochengang der PM10-Konzentrationen in Muotathal und Schwyz im Jahre 2018.

Tabelle 8: Durchschnittliche PM10-Konzentration (µg m⁻³), aufgeteilt nach Wochentag (Montag bis Freitag und Samstag/Sonntag), sowie prozentuale Differenzen aus dem Jahre 2018 für die beiden Stationen Muotathal und Schwyz.

Station	MO – FR	SA und SO	Differenz
Muotathal	20.5 µg m ⁻³	18.4 µg m ⁻³	11.4 %
Schwyz	22.4 µg m ⁻³	19.4 µg m ⁻³	15.6 %

In Tabelle 9 sind die Vergleichsdaten beider Stationen aus dem Jahre 2011 ersichtlich. Der Unterschied zwischen der durchschnittlichen PM10-Konzentration von Montag bis Freitag und am Wochenende beträgt in Muotathal 14 %. Die Station Schwyz zeigt jedoch eine Differenz von 22 %. Damit sind die Differenzen zwischen Wochenende und Werktagen zwischen den beiden Untersuchungen der Jahre 2011 und 2018 an beiden Stationen gesunken.

Tabelle 9: Durchschnittliche PM10-Konzentration (µg m⁻³), aufgeteilt nach Wochentag (Montag bis Freitag und Samstag/Sonntag), sowie prozentuale Differenzen aus dem Jahre 2011 für die beiden Stationen Muotathal und Schwyz.

Station	MO – FR	SA und SO	Differenz
Muotathal	31.0 µg m ⁻³	27.1 µg m ⁻³	14.4 %
Schwyz	30.3 µg m ⁻³	24.8 µg m ⁻³	22.2 %

4.1.1 Zusammenhang mit meteorologischen Umgebungsbedingungen

Die Witterungsverhältnisse haben einen grossen Einfluss auf die Feinstaubimmissionen. Deshalb wurde der Zusammenhang zwischen der PM10-Konzentration und den meteorologischen Umgebungsbedingungen wie dem Tagestemperaturminimum, der Gradtagzahl und der Inversionshäufigkeit und -stärke untersucht.

Die Korrelation mit dem Temperaturminimum und der PM10-Konzentration ist sehr gering. Ebenfalls eine deutlich geringe Korrelation ist zwischen der Gradtagzahl und der PM10-Konzentration ($R^2 = 0.13$) zu finden (Abbildung 20). Die Gradtagzahl (GTZ) ist eine heiztechnische Kenngrösse, mit welcher der Zusammenhang zwischen Aussenlufttemperatur und der Raumtemperatur beschrieben wird. Dabei wird die Differenz der Raumtemperatur (hier: 20°C) und der Tagesmitteltemperatur berechnet, falls ein gewisser Heizgrenzschwellenwert (hier: 10°C) erreicht wird. Diese Kenngrössen wurden analog zur Messperiode 2011 übernommen, um die Vergleichbarkeit zu gewährleisten.⁵²

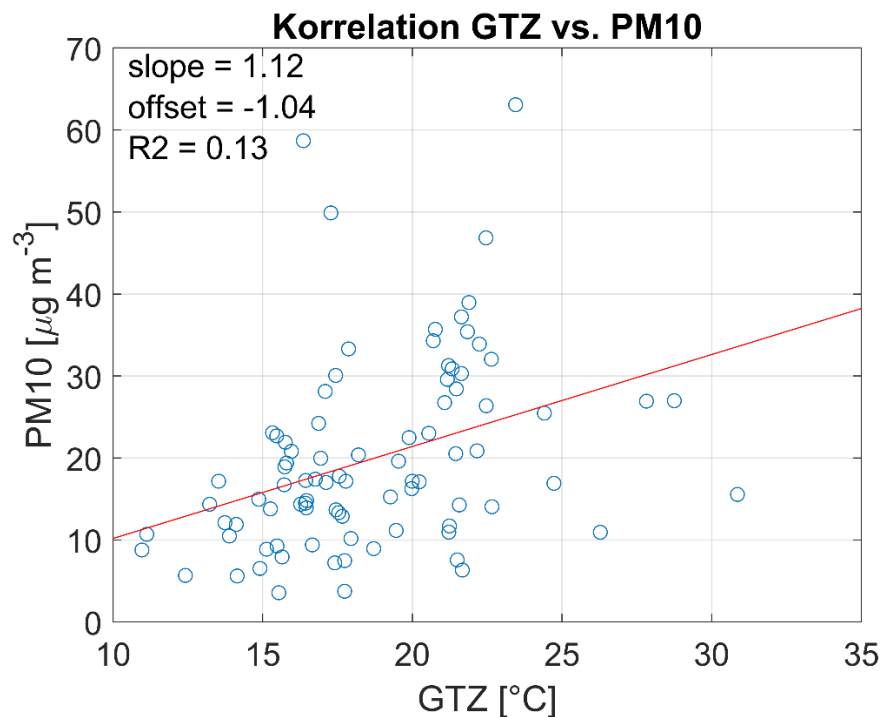


Abbildung 20: Korrelation zwischen der Gradtagzahl und der PM10-Konzentration an der Station Muotathal.

Inversionslagen beeinträchtigen den Luftaustausch, was zu einer erhöhten Akkumulation durch Feinstaub in der Luft führen kann. Aus diesem Grund wurden die Feinstaubimmissionsmessungen im Zusammenhang mit der Inversionshäufigkeit betrachtet. Abbildung 21 zeigt die Inversionshöhe, den Verlauf der PM10-Konzentrationen, der Niederschlagstagesummen und die Inversionsstärke.

⁵² Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) im atmosphärischen Feinstaub (PM10), Feinstaubuntersuchung im Muotathal (Messkampagne 2011), Susanne Bieri, inNET Monitoring AG, Dr. Christian Ruckstuhl, inNET Monitoring AG, 26.01.2012.

Der Beginn des Monats Januar war durch den Sturm Burglind (01. bis 05.01.2018) geprägt, während Mitte Januar die anhaltende stürmische Nordwest- und Westlage (16.01.2018 bis 22.01.2018) dominierend war. Aus diesem Grund bildeten sich in dieser Zeit weniger ganztägige starke Inversionslagen aus als im Vergleichsjahr 2011. Einzig um den 11./12.01.2018 gibt es ganztägige starken Inversionslagen, welche durch eine erhöhte Feinstaubbelastung charakterisiert sind. Zwischen dem 05.01.2018 und dem 08.01.2018 gibt es ebenfalls ganztägige Inversionen, bei welchen die dazugehörige Feinstaubbelastung aufgrund eines technischen Defekts am HVS nicht erhoben wurde.

Im Verlaufe von Mitte Februar bis Anfang März 2018 gibt es zwei lokale Maxima der PM10-Konzentrationen (Abbildung 21, pink eingekreiste Werte). Die erhöhten Werte stehen im Zusammenhang mit einer fast ganztägigen starken Inversionslage. In der Zeitspanne dazwischen gibt es fast keine gemessenen Inversionslagen bis 950 m. Das liefert ein Indiz für eine höher gelegene Inversion, was durch weit verbreitete Hochnebefelder und einer allgemeinen Bisenlage bestätigt wurde (Tabelle 6). Auch die erhöhte Feinstaubbelastung vom 07. bis 09.02., wie auch am 18. bis 20.03. 2018 sind nicht im Inversionsbild zu sehen (Abbildung 21, grün eingekreiste Werte). Diese Zeit ist ebenfalls durch die Bise und den damit verbundenen Hochnebefeldern geprägt. Da diese hohen Inversionen über dem gemessenen Temperaturprofil lagen, wurden sie nicht erfasst und sind dementsprechend in der Grafik als «keine Inversion» (weiss) deklariert. Generell gilt es zu beachten, dass die PM10-Messungen als Tagesmittelwerte erhoben werden. Das heisst, dass es bei morgendlichen Inversionslagen bereits zu einer hohen Akkumulation von Schadstoffen kommen kann, welche ausschlaggebend für die tägliche Feinstaubbelastung ist. Der Zeitpunkt der höchsten Schadstoffbelastung während des Tages kann demnach nicht eruiert werden.

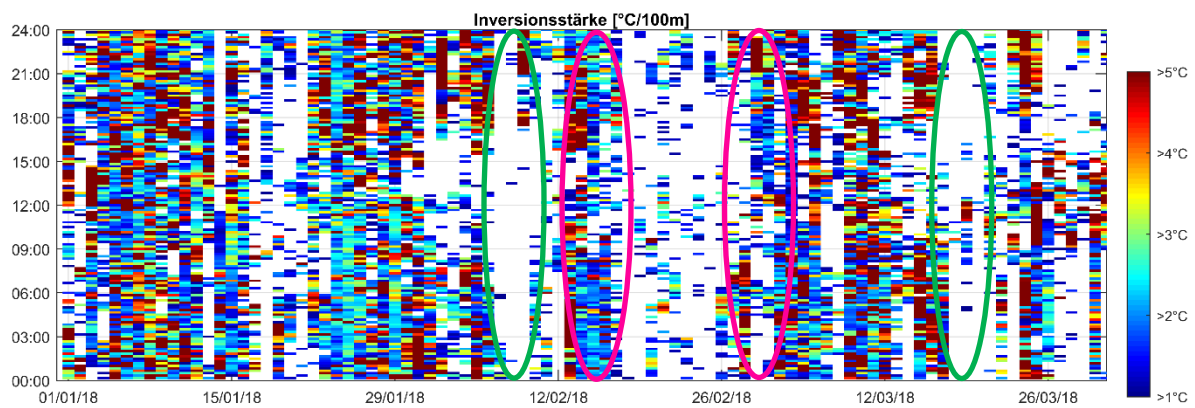
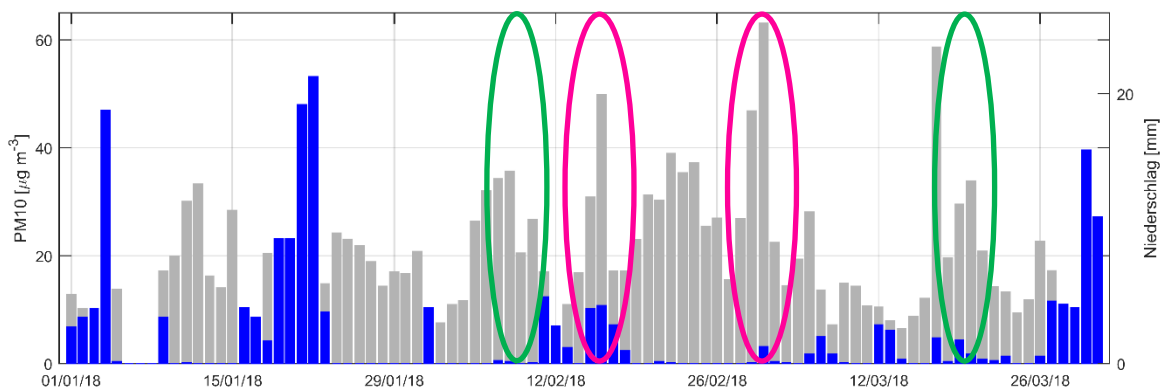
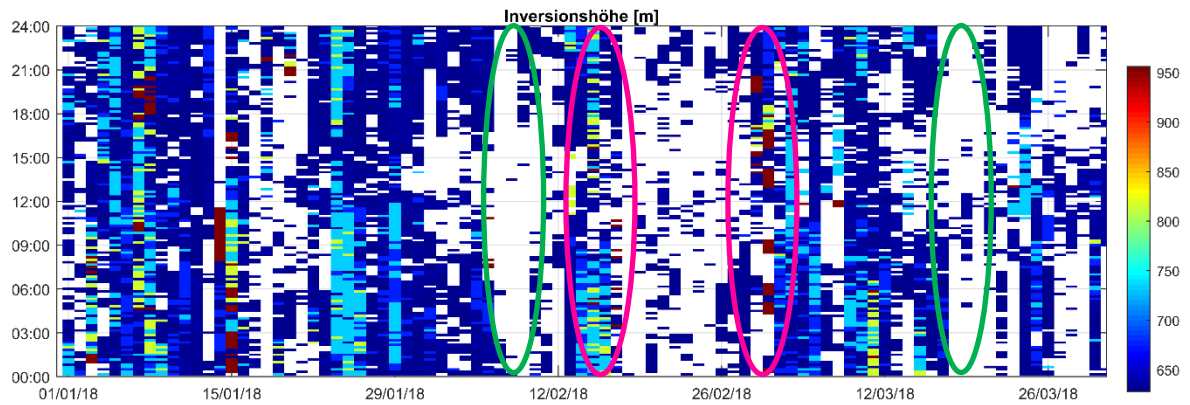


Abbildung 21: Obergrenze (m) der Inversion, der dazugehörige PM10- und Niederschlagsverlauf und die Stärke ($^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$) der Inversion, hohe PM10-Konzentration im Zusammenhang mit starker Inversion (pink eingezeichnet). Bei der Lücke (06.01.2018 bis 08.01.2018) handelt es sich um ein Zeitfenster, wo keine Daten erhoben wurden infolge eines technischen Defekts am HVS.

Die nachfolgenden Abbildungen dieses Unterkapitels zeigen allesamt Boxplots. Die rote Querlinie in einem Boxplot zeigt den Median. Die blauen Boxen entsprechen 50 % aller Tagesmittel. Die schwarzen Balken ausserhalb der blauen Boxen beschreiben das Tagesmittel ohne Ausreisser, während die roten Kreuze die statistischen Ausreisser beschreiben. Neben der Messlücke der PM10-Werte (06.01.2018 bis 08.01.2018) aufgrund eines technischen Defekts am HVS wurden auch die entsprechenden Inversionshäufigkeiten nicht betrachtet.

Abbildung 22 zeigt Boxplots für die Tagesmittel der PM10-Konzentration im Bezug zu deren Inversionshäufigkeit. Dabei wurde zwischen Inversionshäufigkeit über und unter 50 % und deren entsprechenden PM10-Werte unterschieden. Zur Berechnung der Inversionshäufigkeit wurde das Tagesmittel aller Datenpunkte der gesamten Messkampagne des ersten Quartals berechnet. Der Boxplot zeigt, dass bei erhöhter Inversionshäufigkeit (> 50 %) die durchschnittliche PM10-Konzentration vergleichbar oder ein wenig kleiner ist als bei geringer Inversionshäufigkeit (< 50 %). Diese Erkenntnis ist vermutlich damit zu erklären, dass es vermehrte hohe Inversionslagen gegeben hat, die vom Temperaturprofil nicht als Inversionen erfasst wurden (Tabelle 6), die aber lokal zu hohen PM10-Werten geführt haben.

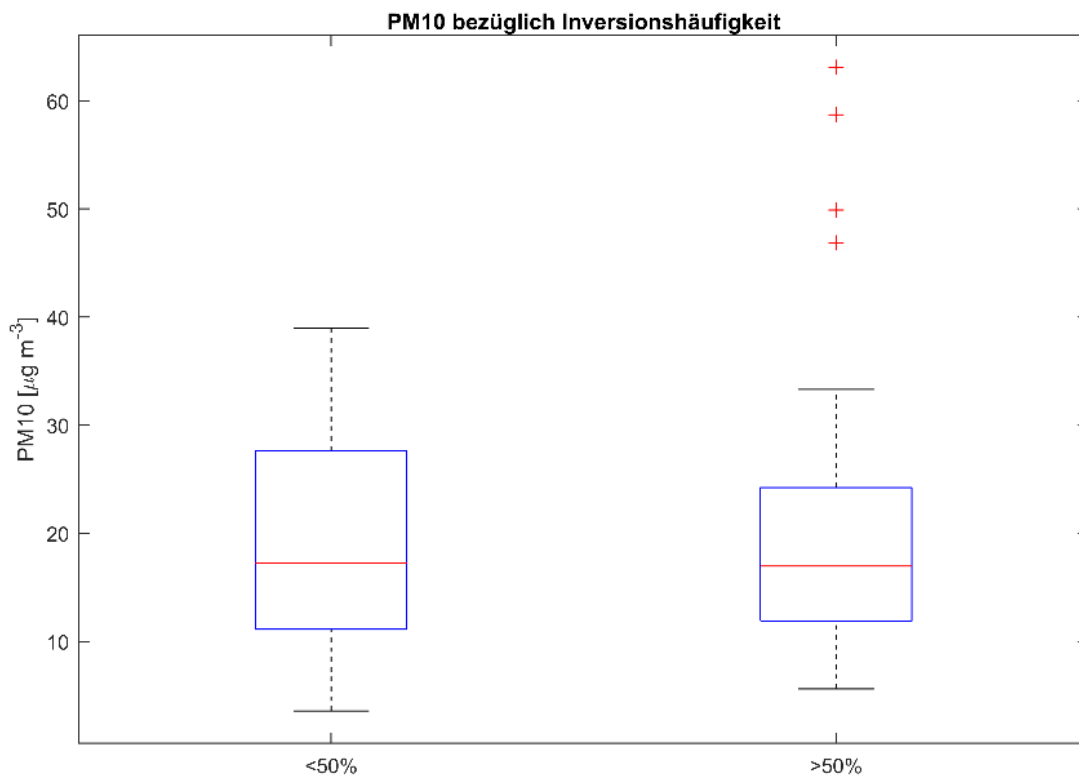


Abbildung 22: Boxplots der PM10-Konzentration bei geringer Inversionshäufigkeit (< 50%) und erhöhter Inversionshäufigkeit (> 50%).

Wegen dieser nicht gemessenen Höheninversionen wurde in Abbildung 23 und Abbildung 24 der Wert der Inversionshäufigkeit bei den ganztägigen hohen Inversionslagen auf 100 % gesetzt. Dies betrifft die 15 in Tabelle 6 aufgeführten Tage. So wird dem Umstand der hohen Inversionslagen Rechnung getragen und der Zusammenhang zwischen PM10-Konzentration und Inversionshäufigkeit kann besser betrachtet werden.

Abbildung 23 (a) zeigt analog zu Abbildung 22 die Boxplots der PM10-Konzentrationen bei geringerer Inversionshäufigkeit (<50 %) im Vergleich zu hoher Inversionshäufigkeit (>50 %). Mit Einbezug der Höheninversionen bei der Betrachtung der Inversionshäufigkeit ist der Zusammenhang zwischen hohen PM10-Konzentrationen bei erhöhter Inversionshäufigkeit deutlicher erkennbar als in Abbildung 22. Der gleiche Sachverhalt wurde auch für die PM10-Werte bezüglich der Inversionshäufigkeit zu den Hauptemissionszeiten von 5 bis 9 Uhr und von 16 bis 20 Uhr angeschaut (Abbildung 23 b). Der Zusammenhang zwischen PM10-Konzentration und Inversionshäufigkeit ist auf den geringeren Luftaustausch während einer Inversionslage zurückzuführen. Dies ist sowohl für die Bestimmung der Inversionshäufigkeit über den ganzen Tag (Abbildung 23 a) als auch für die Bestimmung der Inversionshäufigkeit zu Zeiten mit erhöhten Emissionen der Fall (Abbildung 23 b).

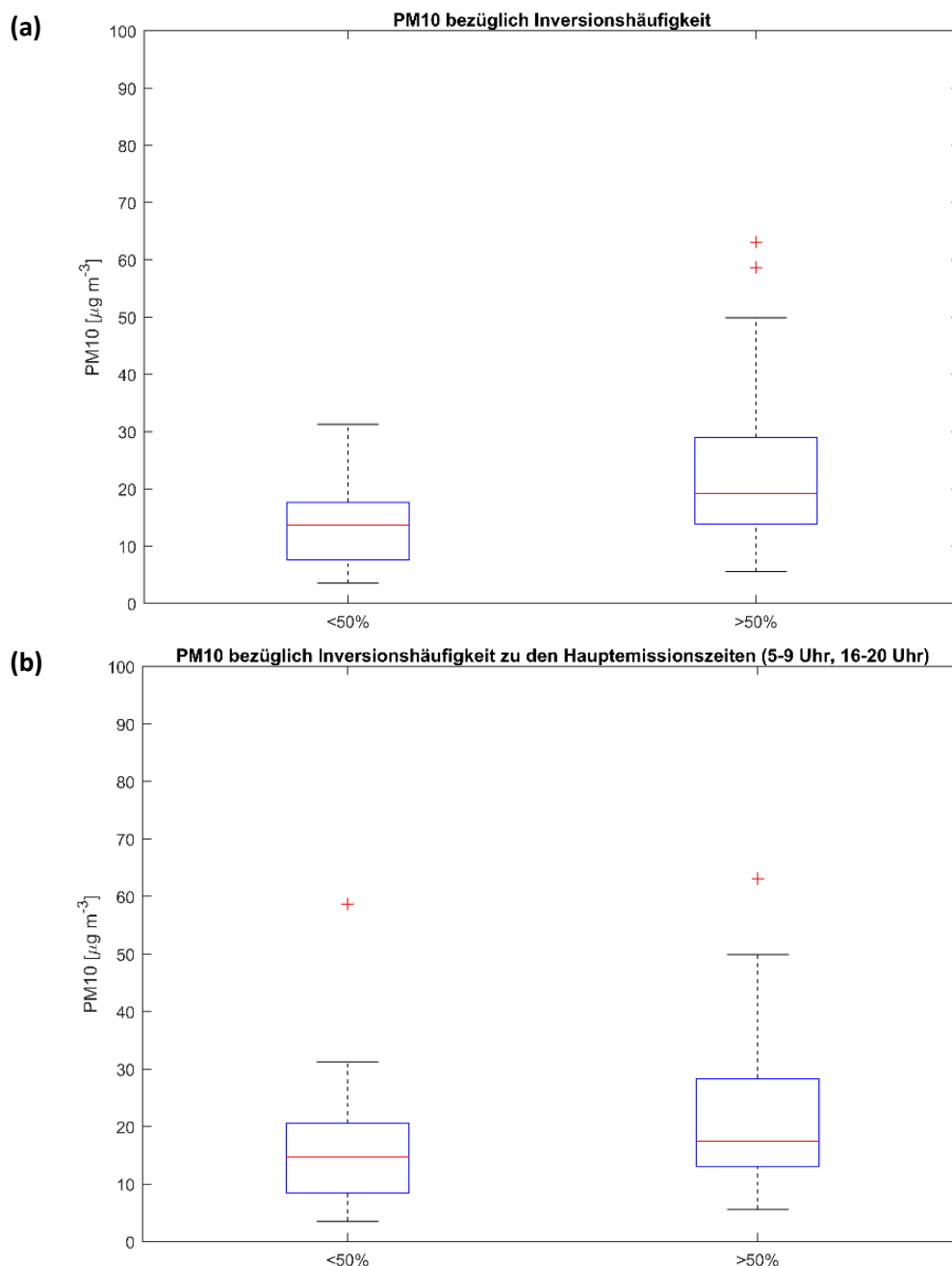


Abbildung 23: Boxplots der PM10-Konzentration bei gegebener Inversionshäufigkeit (a) und bei gegebener Inversionshäufigkeit während der Hauptemissionszeiten von 5 - 9 Uhr und 16 - 20 Uhr (b). In diesen Grafiken wurden die Inversionshäufigkeiten an den 15 Tagen mit hohen Inversionslagen (Tabelle 6) mit dem Wert von 100 % ersetzt.

In Abbildung 24 (a) sind die Feinstaubkonzentrationen der zehn Tage mit den höchsten und der zehn Tage mit den tiefsten PM10-Konzentrationen dargestellt. Die mittlere PM10-Konzentration der betrachteten zehn Tage beträgt $43.4 \mu\text{g m}^{-3}$ beziehungsweise $6.2 \mu\text{g m}^{-3}$. In Abbildung 24 (b) ist die Verteilung der zu diesen Tagen gehörenden Inversionshäufigkeit visualisiert. Die mittlere Inversionshäufigkeit liegt bei den zehn am stärksten belasteten Tagen bei 84.9 % und bei den zehn am geringsten belasteten Tagen bei 39.5 %. Bei der Unterteilung nach den Extremtagen kommt der Zusammenhang zwischen PM10-Belastung und Inversionshäufigkeit somit gut zur Geltung.

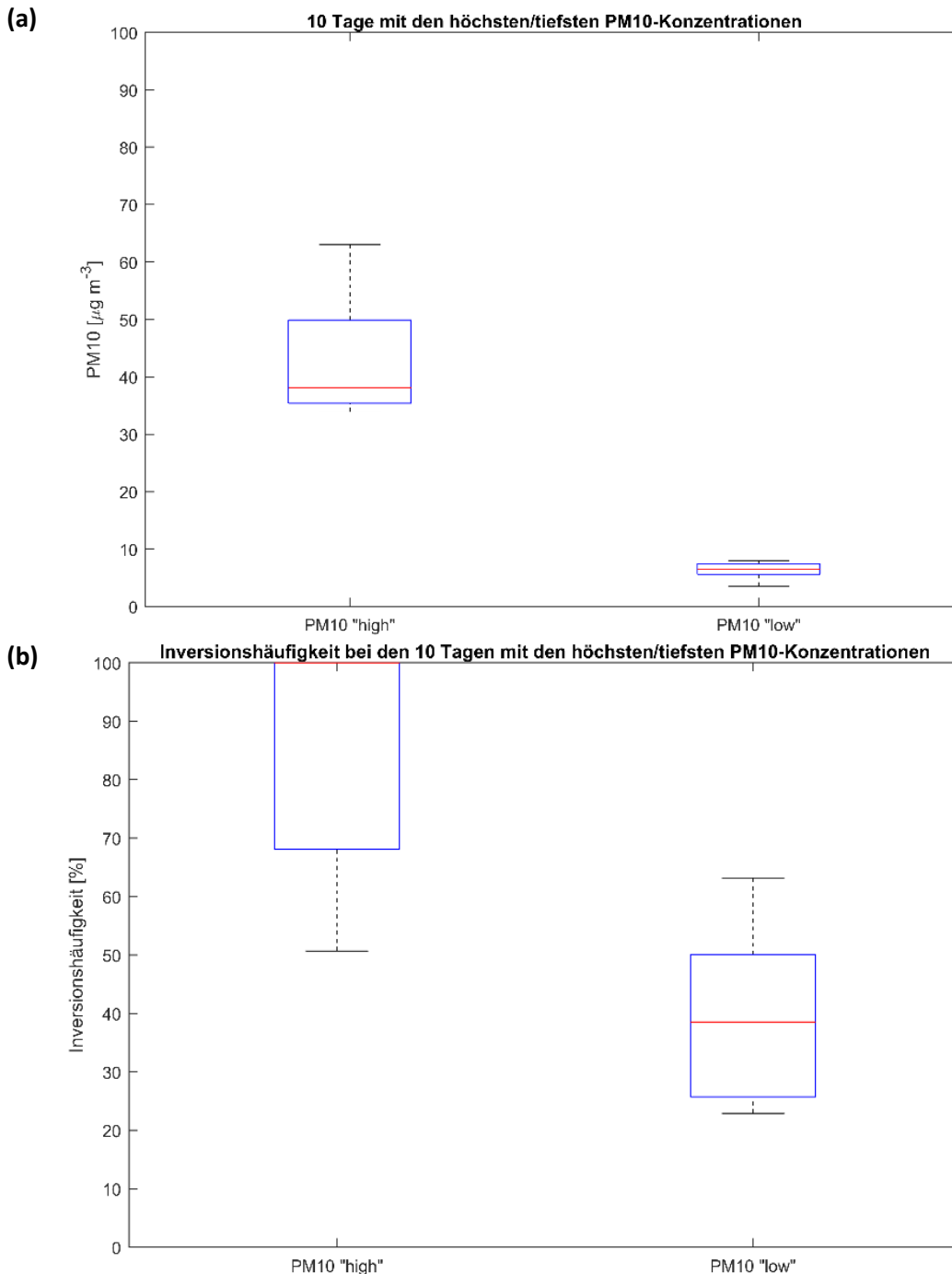


Abbildung 24: Boxplots der PM10-Konzentration der 10 Tage mit der höchsten Feinstaubkonzentration (PM10 „high“) und der 10 Tage mit der tiefsten PM10-Konzentration (PM10 „low“) (a). Boxplots der Inversionshäufigkeit während derselben Tage (b). In diesen Grafiken wurden die Inversionshäufigkeiten an den 15 Tagen mit hohen Inversionslagen (Tabelle 6) ersetzt mit dem Wert von 100 %. Von dieser Anpassung sind sechs Tage betroffen.

4.2 Ergebnisse der PAK-Analysen

Die von der EPA in der Liste für die wichtigsten Umweltschadstoffe festgelegten 16 PAK wurden in der Messkampagne 2018 in Muotathal ausgewertet. Für den Vergleich mit dem NABEL-Bericht wurden die zehn relevantesten PAK summiert.⁵³ Als toxikologischer Leitparameter kann Benzo(a)pyren (BaP) verwendet werden.⁵⁴

Der europäische Jahreszielwert von BaP liegt bei 1 ng m^{-3} für den Gesamtgehalt im PM10.⁵⁵ Der Mittelwert von BaP über die gesamte Messperiode 2018 in Muotathal beträgt 2.76 ng m^{-3} . Im Vergleichsjahr 2011 resultierte ebenfalls für Muotathal ein höherer BaP-Mittelwert von 3.87 ng m^{-3} . Somit liegt der BaP-Mittelwert in der Vierteljahresperiode in beiden Messkampagnen deutlich über dem europäischen Jahresmittelzielwert.

Abbildung 25 zeigt die Wochenmittel für PM10, die Summe der 16 PAK und den ermittelten Wert für BaP während der entsprechenden Kalenderwochen (KW) des ersten Quartals im Jahre 2018 an der Messstation Muotathal. Die Beschriftung der Zeitachse repräsentiert jeweils das Anfangsdatum einer Kalenderwoche.

Die PM10-Konzentration entspricht während der Messkampagne keinem deutlichen Rückgang, sondern ist von einer vergleichsweise geringen PM10-Konzentration im Monat Januar, von den höchsten vorkommenden PM10-Konzentrationen im Februar und einer Abnahme der Feinstaubbelastung im

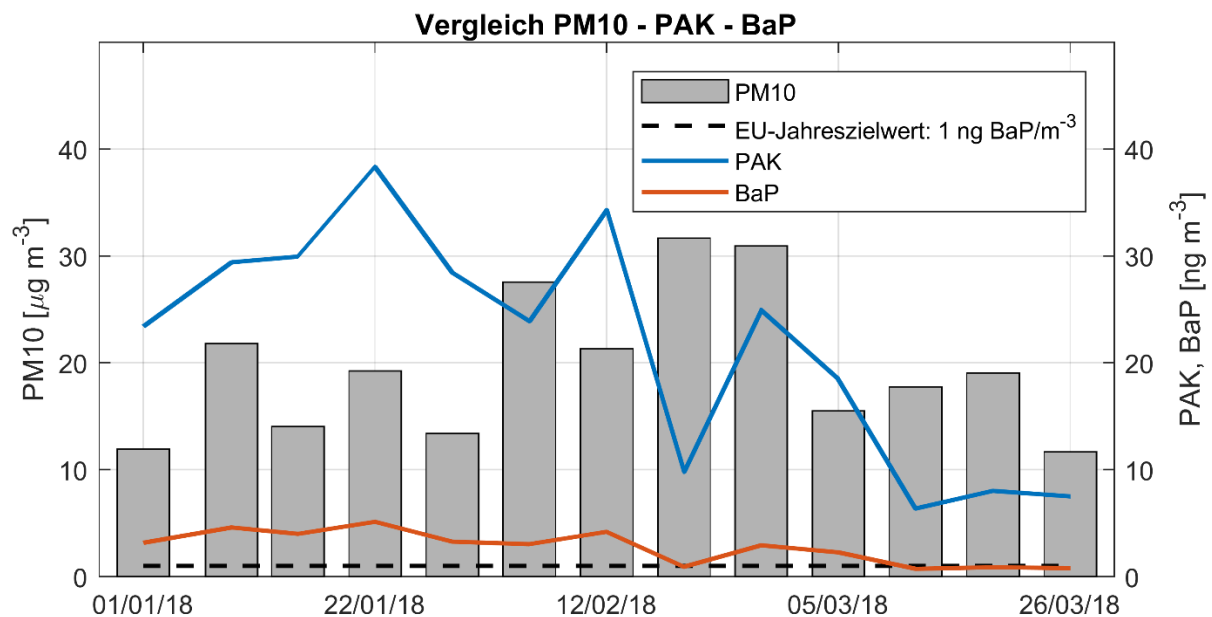


Abbildung 25: Verlauf PM10 im Vergleich mit den 16 PAK- und BaP-Gehalten.

⁵³ Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe im PM10 an ausgewählten Stationen des NABEL sowie der Kantone, Messbericht 2016, Andrea Fischer und Christoph Hüglin, EMPA, Dübendorf September 2017.

⁵⁴ Factsheet: Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) Bundesamt für Gesundheit BAG, November 2016.

⁵⁵ Directive 2004/107/EC of the European parliament and of the council of 15 December 2004 relating to arsenic, cadmium, mercury, nickel and polycyclic aromatic hydrocarbons in ambient air. Official Journal of the European Union L23, 3-16, EU-Commission, 2004.

Frühlingsmonat März geprägt. Die PAK-Konzentrationen hingegen zeigen während der Messperiode eine deutliche Abnahme. Bei der BaP-Konzentration ist ebenfalls eine Abnahme im Verlauf der Monate des ersten Quartals erkennbar.

Im Vergleich der PAK- und PM10-Werte ist auffällig, dass der Rückgang der PAK nicht im Zusammenhang mit den PM10-Konzentrationen steht. Dementsprechend ist zwischen PM10 und PAK keine Korrelation zu finden. Es gibt Kalenderwochen (zum Beispiel KW8 vom 19.02.2018 bis 25.02.2018), in welchen trotz sehr hohen PM10-Konzentrationen die PAK-Konzentration gering ist. Dieser Zusammenhang kann mit unterschiedlicher Quellzuordnung von PM10 interpretiert werden. Die Wetterlage der Kalenderwoche 8 (19. bis 25.02.2018) war geprägt durch eine langanhaltende Bisenlage^{56,57} mit gemeinsam auftretendem Hochnebel. Die PM10-Konzentrationen während dieser Zeit können auch aus akkumulierten Emissionen der weiteren Umgebung stammen. Vor allem gegen Ende der Messperiode nahmen die PAK-Konzentrationen immer mehr ab, wobei die PM10-Konzentrationen auf einem ähnlichen Niveau verblieben wie zu Beginn des Quartals 2018. Diese zeitliche Veränderung des Verhältnisses von PAK zu PM10 ist ausführlich in Kapitel 4.6 beschrieben.

Vergleicht man die Mittelwerte der 16 PAK und des BaPs der drei Jahre (2009, 2011 und 2018), in welchen es eine Messkampagne in Muotathal gegeben hat, fällt auf, dass sowohl die PAK-Werte wie auch die BaP-Werte während der Jahre 2009 und 2011 vergleichbar sind und im Jahre 2018 eine Abnahme zu verzeichnen ist (Tabelle 10). Der Verlauf der PAK- und BaP-Werte der drei Jahre, sowie der schweizweite Vergleich mit dem Vergleichsjahr 2018 ist detailliert in den Kapiteln 4.4 und 4.5 beschrieben.

Tabelle 10: Vergleich Mittelwerte der 16 PAK und des BaPs im ersten Quartal der drei Jahre 2009, 2011 und 2018.

Jahr	2009	2011	2018
PAK Mittelwert JFM [ng m^{-3}]	39.5	32.8	21.8
BaP Mittelwert JFM [ng m^{-3}]	4.4	3.9	2.8

⁵⁶ Klimabulletin Februar 2018, MeteoSchweiz.

⁵⁷ Inversionswetterbericht für die Zentral- und Ostschweiz, 01.01. bis 31.03 2018, MeteoSchweiz.

4.3 Vergleich mit der Messkampagnen 2011

Abbildung 26 zeigt den Temperaturverlauf und die PM10-Konzentrationen der beiden Messkampagnen 2011 und 2018 im Vergleich. Es ist zu bemerken, dass die Temperaturen im Januar beider Jahre aussergewöhnlich hoch waren. Die Januartemperaturen im Jahre 2018 waren sogar noch etwas höher als im Jahre 2011. Im Februar 2011 und 2018 gibt es eine kontinuierliche Temperaturzunahme, mit zwei vereinzelt Kälteeinbrüchen im Februar 2018. Die beiden Monate Februar und März waren in etwa vergleichbar, mit einer kurzzeitigen Kälteperiode Ende Februar 2018. Insgesamt waren die Temperaturen etwas höher im Jahre 2011, was auch der Tabelle 3 zu entnehmen ist.

Allgemein unterscheiden sich die PM10-Konzentrationen relativ stark zwischen den beiden Jahren 2011 und 2018. Abgesehen von 18 Tagen (06.02.-11.02., 16.02., 21.02.-02.03.) sind die PM10-Werte während des Jahres 2018 tiefer als 2011. Diese erhöhten Feinstaubwerte im Februar 2018 korrespondieren mit tieferen Temperaturen und einer kurzzeitigen Kälteperiode Ende Februar.⁵⁸

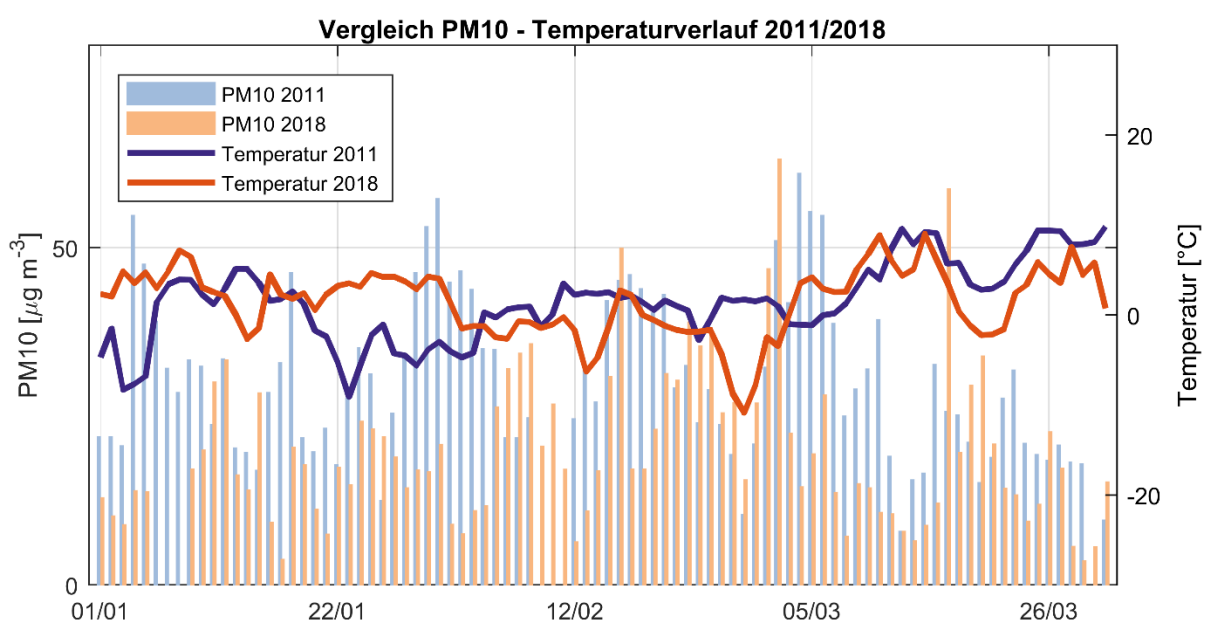


Abbildung 26: Vergleich PM10 und Temperatur in Muotathal der beiden Jahre 2011 und 2018

Betrachtet man den zeitlichen Verlauf der Wochenmittel der PM10-, PAK und BaP-Konzentrationen der beiden Messkampagnen, sieht man in beiden Jahren einen deutlichen Rückgang der PAK-Konzentration gegen die Frühlingsmonate hin (Abbildung 27). Während der ersten sechs Wochen im Jahre 2018 waren die PAK-Werte deutlich tiefer als 2011. Ab KW7 (14.02.2018) verläuft die Abnahme der PAK-Werte ähnlich wie im Jahre 2011.

Die Belastung durch BaP verläuft in beiden Jahren relativ ähnlich und erfährt ebenfalls eine Abnahme im Verlauf der Monate des ersten Quartals. Einzig in der ersten Kalenderwoche ist die BaP-Konzentration 2011 höher als 2018.

⁵⁸ Klimabulletin Winter 2017/2018, Februar 2018, MeteoSchweiz.

Der Verlauf der Feinstaubkonzentrationen beider Jahre ist unterschiedlich. Vor allem im Monat Januar gibt es grosse Unterschiede, wobei die PM10-Werte des Jahres 2011 deutlich höher sind als 2018. Nur in KW6 ist die PM10-Konzentration im Jahre 2018 leicht höher als im Vergleichsjahr. Während der drei Monate im Jahre 2018 fällt eine Bipolarität der PM10-Konzentrationen auf. Es gibt vergleichbare Konzentrationen von PM10 während der beiden Monate Januar und März, wobei im Kontrast eine erhöhte Feinstaubbelastung im Monat Februar zu beobachten ist (vgl. zusätzlich auch den Zusammenhang PM10 und PAK 2018 im Kapitel 4.6). Dies ist während der Messkampagne im Jahre 2011 nicht ganz so deutlich zu erkennen.

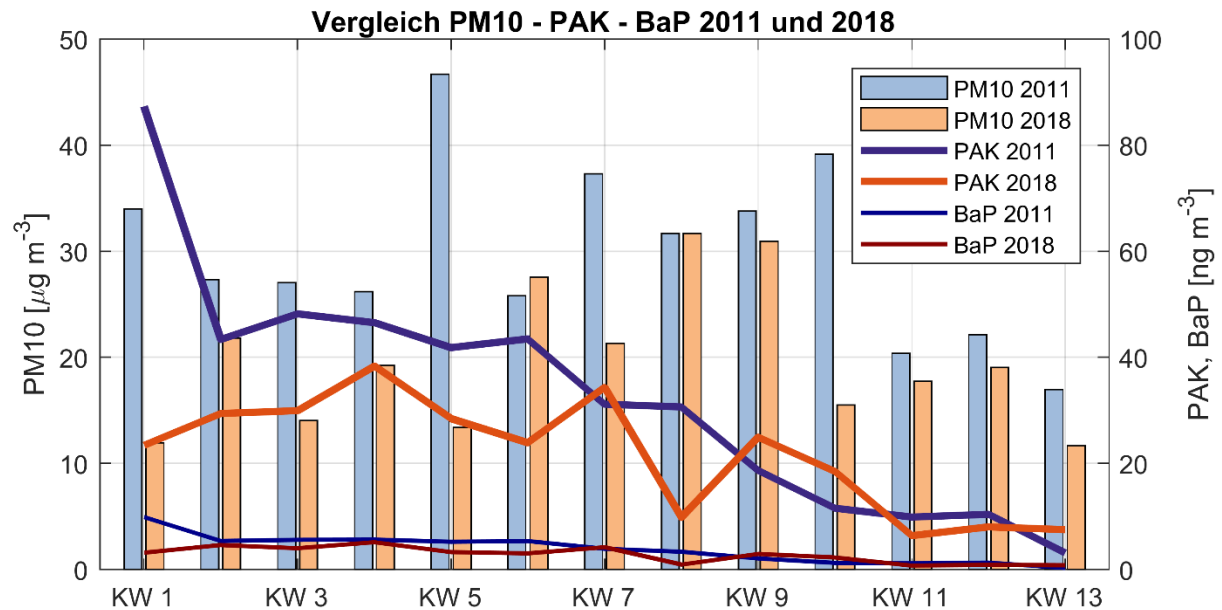


Abbildung 27: Vergleich PM10, PAK und BaP der ersten und zweiten Messkampagne 2011 und 2018 in Muotathal.

Erstaunlich sind vor allem die erhöhten PM10-Konzentrationen während der KW6, KW8 und KW9 im Jahre 2018. Hier zeigt sich deutlich der starke Einfluss der meteorologischen Bedingungen. Eine kältere Periode (Bisenlage) während dieser drei Kalenderwochen im Februar 2018 begleitet von hohen lokalen Inversionslagen (Hochnebel) führte zu der erhöhten Feinstaubbelastung (Tabelle 6).

Tabelle 11 liefert einen Überblick über die Anteile der PAK-Werte (16 PAK gemäss EPA aufsummiert) und der BaP-Werte im Vergleich zum PM10 der beiden Jahre 2011 und 2018. Dabei wurden die Mittelwerte aller drei verschiedenen Messgrössen (PM10, PAK und BaP) des ersten Quartals des jeweiligen Jahres betrachtet und in die gleiche Einheit $\mu\text{g m}^{-3}$ umgewandelt. Es fällt auf, dass der prozentuale Anteil der PAK (aufsummiert) und BaP im PM10 in beiden Jahren sehr ähnlich ist. Dabei beträgt der Anteil des PAK im PM10 rund 0.1 %. Der Anteil des BaP in PM10 macht also mit 0.01 % rund 10 Prozent des gesamten PAK aus.

Tabelle 11: Anteil der Summe PAK im PM10 und des BaP im PM10 der beiden Jahre 2011 und 2018.

Jahr	Anteil Summe PAK im PM10 [%]	Anteil BaP im PM10 [%]
2011	0.106	0.013
2018	0.109	0.014

4.3.1 Stickstoffdioxid- und PM10-Messungen in Muotathal im Vergleich mit der Referenzstation in Schwyz

Stickstoffdioxid (NO₂) und Feinstaub (PM10) sind im Winterhalbjahr die dominierenden Schadstoffe.⁵⁹ Zudem ist NO₂ im schweizerischen Mittelland während des Winters einer der wichtigsten Vorläufer für PM10.⁶⁰ Aus diesem Grund werden einerseits die PM10-Tagesmittelwerte der beiden Stationen Muotathal und Schwyz der beiden Jahre 2011 und 2018 verglichen. Andererseits wird dies auch für NO₂ angewendet, wobei man aber anstelle von Tages- Monatsmittelwerte verwendet.

In Abbildung 28 sind die Tagesmittelwerte der PM10-Konzentrationen der beiden Messstandorte Muotathal und Schwyz aufgeführt. Es fällt an beiden Standorten auf, dass der Verlauf der Feinstaubbelastung des jeweilig gleichen Jahres ähnlich verläuft. Eine weitere Gemeinsamkeit ist die Abnahme der Belastung durch Feinstaub im Jahre 2018 an beiden Standorten im Vergleich zum Jahre 2011. Der Grenzwert für den Tagesmittelwert für PM10 von 50 µg m⁻³ wird im Jahre 2018 in Muotathal und in Schwyz zwei- respektive einmal überschritten. Im Vergleichsjahr 2011 waren die Überschreitungen in Muotathal und in Schwyz mit sieben- respektive neunmal deutlich höher. Dieser Zusammenhang wurde für Muotathal schon in der Tabelle 7 erfasst.

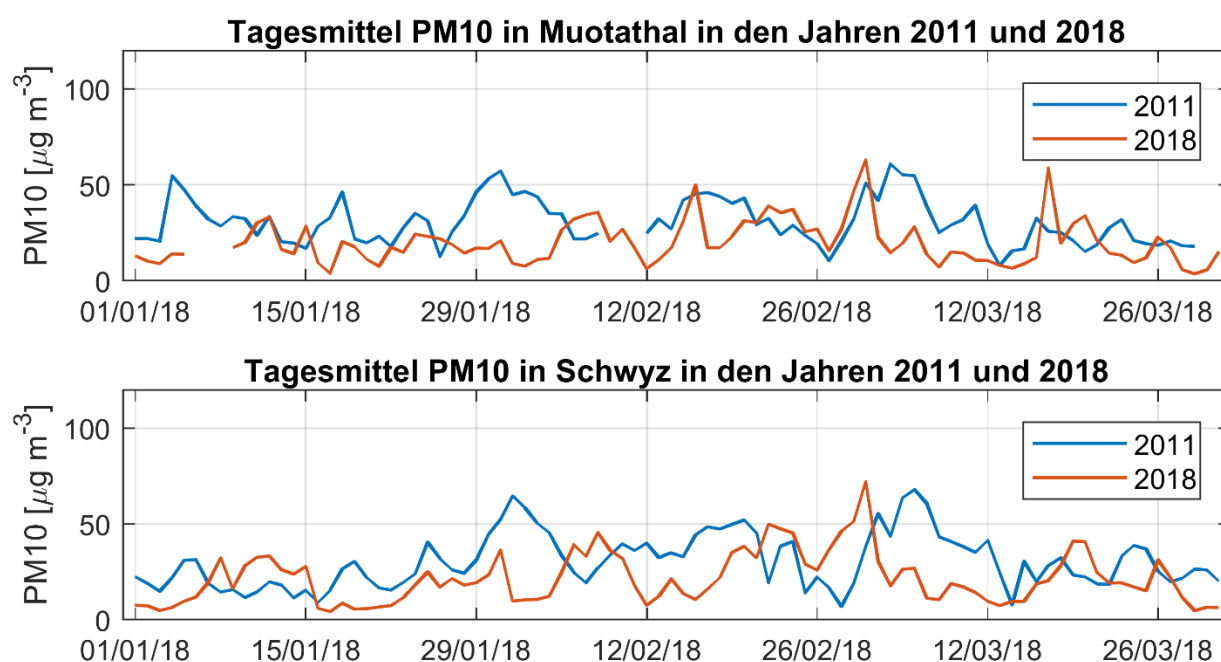


Abbildung 28: Vergleich PM10-Tagesmittel der Messstation Muotathal mit der Referenzstation Schwyz während der beiden Messkampagnen 2011 und 2018.

Abbildung 29 zeigt die Entwicklung der Monatsmittelwerte für Stickstoffdioxid der beiden Standorte in Muotathal und in Schwyz während der beiden Jahren 2011 und 2018. Dabei fällt auf, dass an beiden

⁵⁹ Luftbelastung in der Zentralschweiz: Detaillierte Messdaten 2017, Zentralschweizer Umweltfachstellen, Mai 2018.

⁶⁰ Verursacher von Feinstaub, Teilbericht 1 PSI: Januar, Februar 2006, Teilbericht 2 uwe: Datenanalyse Reiden 2005/06. Prévôt A. u. a., 2006.

Standorten die Belastung durch NO₂ 2018 tiefer ist als 2011. Ein saisonaler Gang ist für alle Jahre erkennbar, indem die NO₂-Konzentrationen im Verlaufe des ersten Quartals für beide Jahre und Standorte abgenommen haben. Die NO₂-Werte sind in beiden Jahre 2011 und 2018 deutlich tiefer in Muotathal als in Schwyz. Da eine rasche Abnahme der NO₂-Belastung mit zunehmender Distanz zur Emissionsquelle resultiert, sind die höheren Werte in Schwyz aufgrund der stärkeren Verkehrsbelastung an diesem Standort im Vergleich zu Muotathal zu erklären.⁶¹

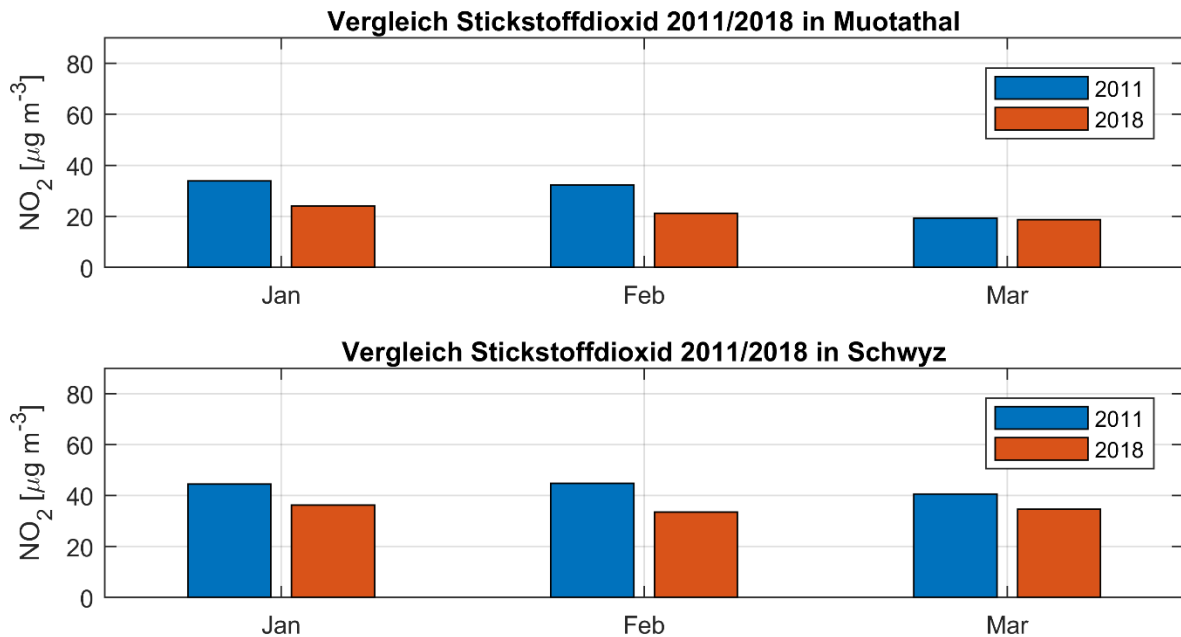


Abbildung 29: Vergleich NO₂- Monatsmittel der Messstation Muotathal mit der Referenzstation Schwyz während der beiden Messkampagnen 2011 und 2018.

tathal als in Schwyz. Da eine rasche Abnahme der NO₂-Belastung mit zunehmender Distanz zur Emissionsquelle resultiert, sind die höheren Werte in Schwyz aufgrund der stärkeren Verkehrsbelastung an diesem Standort im Vergleich zu Muotathal zu erklären.⁶¹

In Tabelle 12 sind die absolute und die relative Differenz der PM10 und NO₂ Messungen der beiden Messstandorte Muotathal und Schwyz der Jahre 2011 und 2018 beschrieben. Alle Messwerte beider Standorte im Jahre 2018 sind im Vergleich zum Jahre 2011 im Bereich von 20 bis 35 % kleiner. Dabei ist zu in Muotathal eine grössere relative Differenz der beiden Messgrössen PM10 und NO₂ zu verzeichnen.

Tabelle 12: Absolute und relative Differenz der Mittelwerte der PM10 und NO₂ Messungen der Jahre 2018 und 2011 des Messstandorts Muotathal im Vergleich zur Referenzstation in Schwyz.

Messstandort und Messgrösse	Absolute Differenz der Jahre 2018 und 2011 [$\mu\text{g m}^{-3}$]	Relative Differenz der Jahre 2018 und 2011 [%]
PM10 Muotathal	-10.4	-34.3
PM10 Schwyz	-9.0	-29.5
NO ₂ Muotathal	-7.2	-25.1
NO ₂ Schwyz	-8.5	-19.6

⁶¹ Luftbelastung in der Zentralschweiz: Detaillierte Messdaten 2017, Zentralschweizer Umweltfachstellen, Mai 2018.

4.3.2 Abnahme von PM10 in Muotathal im Vergleich zur Abnahme von PAK während der beiden Messkampagnen 2011 und 2018

Vergleicht man nun die relative Abnahme der beiden Messkampagnen 2011 und 2018 der beiden Messgrößen PM10 und PAK, liefert diese Erkenntnis einen Rückschluss auf die im Jahre 2011 getroffenen Massnahmen. In Tabelle 13 sind jeweils die absolute und die relative Differenz der Jahre 2018 und 2011 der beiden Messgrößen PM10 und PAK aufgeführt. Daraus ist ersichtlich, dass es eine absolute Abnahme des Feinstaubes von $10.4 \mu\text{g m}^{-3}$ gegeben hat, was einer relativen Abnahme von 34.3 % entspricht. Wenn man die gleiche Betrachtung für die PAK-Werte macht, resultiert eine absolute Abnahme von 11 ng m^{-3} . Dies entspricht einer relativen Abnahme von 33.6 %.

Da nun die Abnahme von PM10 im Vergleich zu PAK vergleichbar ist, hat sich die Gesamtsituation trotz der getroffenen PAK Massnahmen nicht wesentlich verbessert. Es hat zwischen 2011 und 2018 keine Verbesserung der PAK-Belastung im Verhältnis zum Feinstaub (PM10) gegeben. Aus diesem Grund sollten die im Jahre 2011 getroffenen Massnahmen weiterhin verfolgt und intensiviert werden, damit eine eindeutige Verbesserung der Schadstoffbelastung durch die PAK im Vergleich zur PM10-Belastung hervorgeht.

Tabelle 13: Absolute und relative Differenz der Mittelwerte der PM10 und PAK Messungen der Jahre 2018 und 2011 des Messstandorts Muotathal.

Messgrösse	Absolute Differenz	Relative Differenz [%]
PM10	$-10.4 \mu\text{g m}^{-3}$	-34.3
PAK	-11.0 ng m^{-3}	-33.6

Die PM10-Konzentrationen können stark durch das lokale Wettergeschehen beeinflusst werden.⁶² Diese Einflüsse können statistisch berücksichtigt werden, indem eine meteorologische Normalisation angewendet wird.⁶³ Solche meteorologisch normalisierten Trends für PM10 wurden für die Zeitperiode 1997 bis 2016 erstellt.⁶³ Unter der Annahme, dass Muotathal zum ländlichen Gebiet gezählt werden kann, und die Entwicklung der jährlichen Abnahme der normalisierten PM10-Konzentrationen auch bis zum Jahre 2018 konstant bleibt, kommt man auf eine Meteorologie bereinigte PM10-Abnahme von rund 20 %.

⁶² Wise, E. K. and Comrie, A. C.: Extending the Kolmogorov–Zurbenko Filter: Application to Ozone, Particulate Matter, and Meteorological Trends, *J. Air Waste Manage.*, 55, 1208–1216, <https://doi.org/10.1080/10473289.2005.10464718>, 2005.

⁶³ Grange, S. K., Carslaw, D. C., Lewis, A. C., Boleti, E., and Hueglin, C.: Random forest meteorological normalisation models for Swiss PM₁₀ trend analysis, *Atmos. Chem. Phys.*, 18, 6223–6239, 2018.

4.4 Vergleich mit den Messkampagnen 2009 und 2011

Neben dem Vergleich der aktuellen Messkampagne 2018 mit jener von 2011 ist es zusätzlich möglich die beiden Jahre mit der Messreihe aus dem Jahre 2009 zu vergleichen. In Abbildung 30 sind die Monatsmittelwerte der PM10-Konzentrationen des ersten Quartals der drei Jahre 2009, 2011 und 2018 aufgezeigt. Die Linien entsprechen der Spannweite der PM10-Werte, das heisst dem jeweiligen monatlichen Maximal- und Minimalwert. Die PM10-Konzentrationen des ersten Quartals des Jahres 2018 sind vor allem in den Monaten Januar und Februar im Vergleich zu den Jahren 2009 und 2011 deutlich tiefer. Die Feinstaubbelastung im März 2009 und 2018 ist ähnlich hoch, während die PM10-Konzentrationen im Jahre 2011 deutlich grösser waren.

Zusammenfassend kann man beobachten, dass die höchsten PM-Werte während der Messkampagnen 2009 und 2011 gemessen wurden und zwar während den Monaten Januar 2009, Februar 2011 und März 2011. 2018 sind die Belastung durch PM10 im ersten Quartal kleiner als 2009 und 2011. Die Anzahl Überschreitungen des LRV-Grenzwerts von $50 \mu\text{g m}^{-3}$ zeigt eine Abnahme im Verlaufe der drei Jahre. Während es im Jahre 2009 an 11 Tagen zu einer Überschreitung kam⁶⁴, war dies in den Jahren 2011 und 2018 and sieben respektive an zwei Tagen der Fall (Tabelle 7).

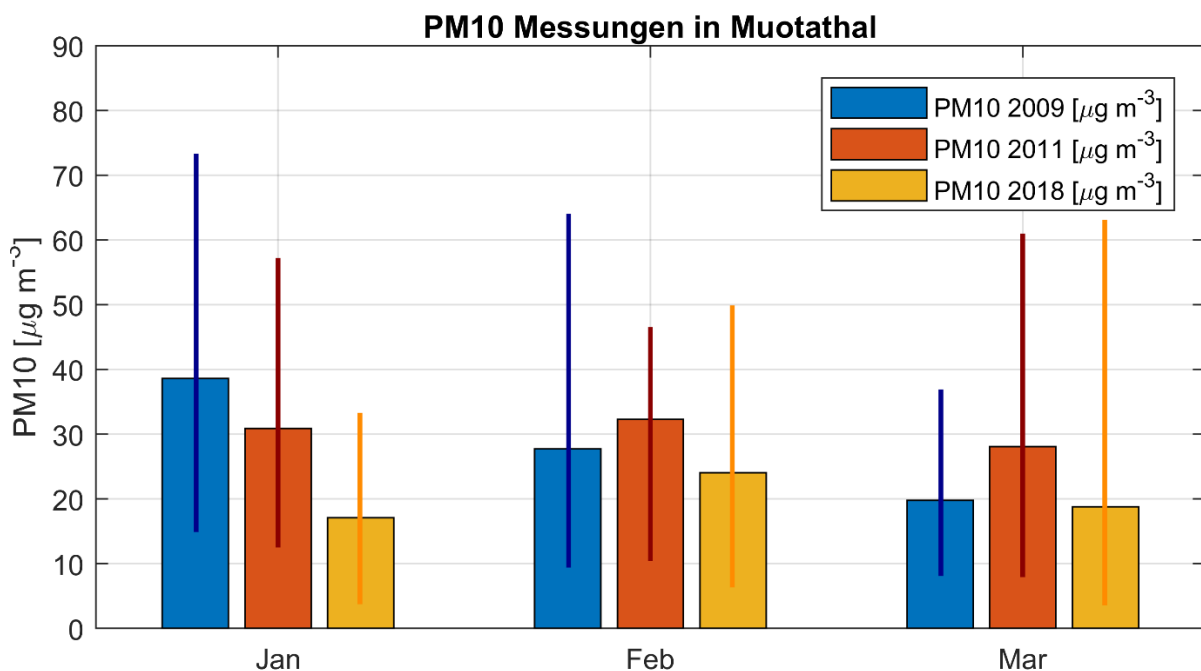


Abbildung 30: Vergleich der PM10-Konzentrationen (Monatsmittel) gemessen während der Messkampagnen 2009, 2011 und 2018 in Muotathal. Die Linien entsprechen der Spannweite mit dem jeweiligen Maximal- und Minimal-Tagesmittel.

⁶⁴ Polzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) im atmosphärischen Feinstaub (PM10), Rainer Jakoby, AfU SZ, 2010.

Im Abbildung 31 werden die Quartalsmittel der PM10-, PAK- und BaP-Konzentrationen visualisiert. Dabei werden die drei Messreihen 2009, 2011 und 2018 miteinander verglichen. Die PM10-Werte sind in dieser Grafik in $\mu\text{g m}^{-3}$ angegeben, die PAK- und BaP-Werte in ng m^{-3} . Die gestrichelte Linie gibt den EU-Jahreszielwert der BaP-Konzentration von 1 ng m^{-3} an. Die PAK-Werte bestehen aus der Summe der zehn relevantesten PAK, wie es auch bei den Auswertungen für die PAK im PM10 an den verschiedenen NABEL-Stationen gehandhabt wurde.⁶⁵ Dieses Vorgehen wurde während aller drei Messkampagnen angewendet, was die Vergleichbarkeit der einzelnen Jahre gewährleistet. Es fällt auf, dass die PM10-, PAK- und die BaP-Quartalsmittelwerte 2011 und 2009 sehr ähnlich sind, während die Werte für das erste Quartal 2018 deutlich tiefer sind. In allen drei Jahren ist der BaP Quartalsmittelwert deutlich grösser als der EU-Jahreszielwert. Dabei gilt es zu beachten, dass diese Werte nur bedingt vergleichbar sind, aber trotzdem Indizien liefern, dass es in der gesamtjährlichen Betrachtung zu Überschreitungen kommt. Trotz der Abnahme aller drei Messgrössen im ersten Quartal 2018 sind die Werte insbesondere für PAK und BaP absolut gesehen immer noch sehr hoch.

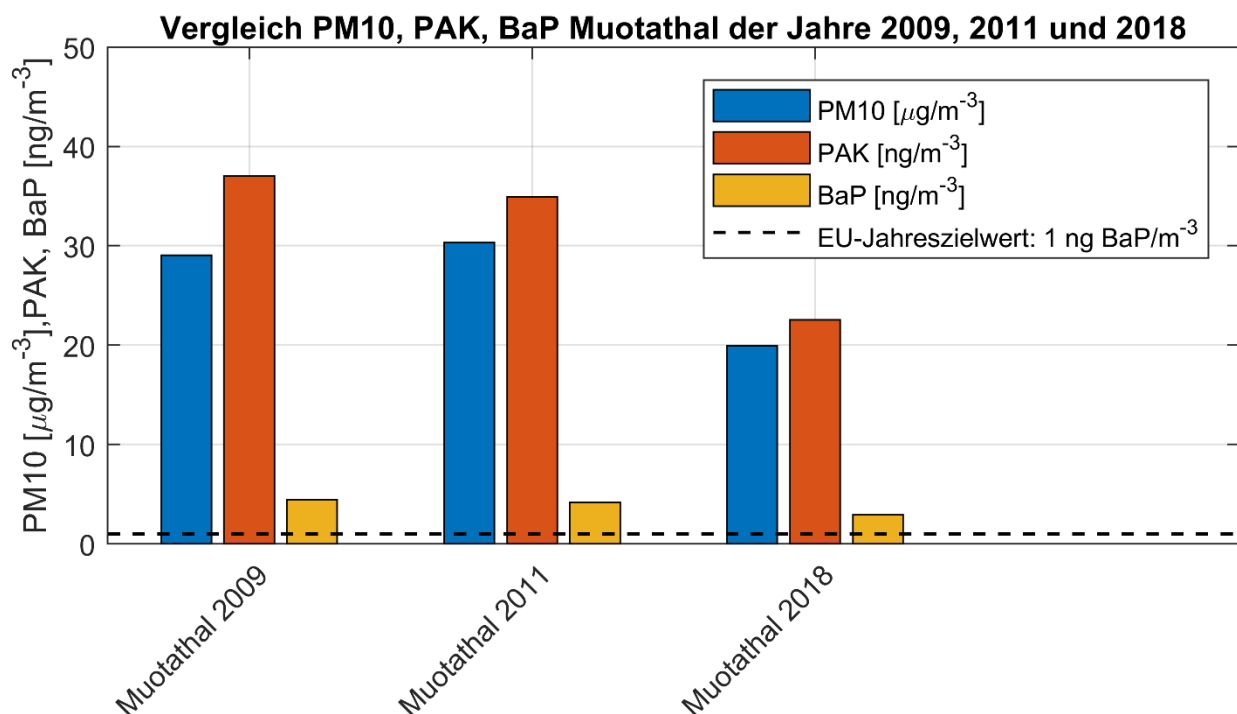


Abbildung 31: Vergleich PM10, PAK (Summe von 10 PAK gemäss NABEL) und BaP in Muotathal während der Messkampagne Januar – März der Jahre 2009, 2011 und 2018.

⁶⁵ Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe im PM10 an ausgewählten Stationen des NABEL sowie der Kantone, Messbericht 2016, Andrea Fischer und Christoph Hüglin, EMPA, Dübendorf September 2017.

4.5 Vergleich der Ergebnisse 2018 mit den NABEL-Stationen 2016

Seit 2006 untersucht das Bundesamt für Umwelt (BAFU) an ausgewählten Standorten des „Nationalen Beobachtungsnetzes für Luftfremdstoffe“ (NABEL) die PAK-Konzentrationen im atmosphärischen Feinstaub PM10. Die Daten der aktuellen Messkampagne 2018 werden dabei mit den aktuellsten verfügbaren NABEL-Daten der ausgewählten 11 Stationen aus dem Jahre 2016 verglichen. Von diesen 11 Stationen steht einzig die Messstation Magadino-Cadenazzo zeitweise unter dem dominierenden Einfluss von Holzverbrennungsanlagen. Diese stellen im Zusammenhang mit PAK einen wichtigen Faktor dar. Aus demselben Grund wurden die bestehenden Standorte auch noch mit kantonalen Messstationen ergänzt, welche vorwiegend durch Abgase von Holzfeuerungen geprägt sind.⁶⁶ Es sind dies die Stationen Appenzell, Flums (OSTLUFT) und San Vittore (Kanton Graubünden), welche in Bezug auf Holzfeuerungen insbesondere San Vittore eine stark exponierte Messstation darstellt.⁶⁶ So ist der Messstandort in Muotathal am ehesten mit der NABEL-Station Magadino oder den kantonalen Stationen San Vittore, Appenzell und Flums vergleichbar.

Abbildung 32 zeigt einen Vergleich der PM10-Konzentrationen, BaP und der Summe der 10 toxikologisch relevantesten PAK.⁶⁶ Die PM10-Konzentrationen in Muotathal entsprechen im Vergleich mit den anderen 14 Messstationen in etwa dem Durchschnitt des PM10-Gehalts.

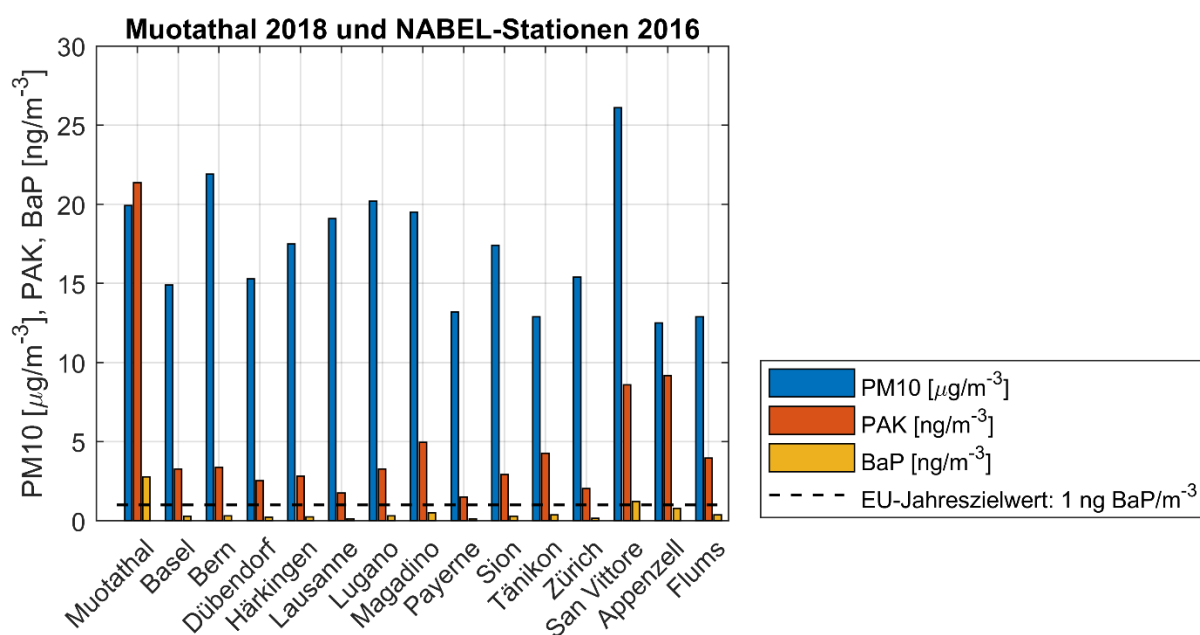


Abbildung 32: Vergleich PM10, PAK und BaP in Muotathal 2018 mit den Ergebnissen der PAK-Messungen Januar – März 2016 im NABEL-Messnetz (nur Summe von 10 PAK gemäss NABEL).

Die BaP-Belastung im Jahre 2018 ist in Muotathal am höchsten. Der EU-Jahreszielwert wird in den drei Wintermonaten um nahezu das Dreifache überschritten.

Diese Situation ist bei den PAK-Konzentrationen analog beobachtbar. Die PAK-Konzentration in Muotathal überschreiten auch jene von verkehrsintensiven Standorten wie Bern und Lugano, obwohl die

⁶⁶ Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe im PM10 an ausgewählten Stationen des NABEL sowie der Kantone, Messbericht 2016, Andrea Fischer und Christoph Hüglin, EMPA, Dübendorf September 2017.

Belastung durch PM10 an diesen Standorten grösser ist. Nach Muotathal haben die vier Messstandorte Magadino, San Vittore, Appenzell und Flums die grössten PAK-Werte. Wie Muotathal sind diese vier Regionen ländlich geprägt. San Vittore und Appenzell sind ausserdem ebenfalls durch eine Tallage charakterisiert.⁶⁷

Schon aus dem Messbericht 2016 der EMPA wird ersichtlich, dass die höchsten PAK-Konzentrationen an ländlichen Messtationen gemessen werden und nicht etwa an stark verkehrsbelasteten Messtandorten. Dies liefert ein klares Indiz für den dominierenden Einfluss von Holzfeuerungen in Zusammenhang mit der PAK-Belastung.⁶⁷ Verbrennung von Abfall bei der Holzverbrennung kann zu erhöhten PAK-Konzentrationen führen. Bei Emissionsmessungen in einem Kachelofen sind nämlich die PAK-Emissionen bei der Zugabe von Kunststoff um den Faktor 10 bis 20 im Vergleich zur Verbrennung von reinem Holz angestiegen.^{68,69} Wie gross der Anteil an Fremdstoffen ist, kann anhand der Immissionsmessungen jedoch nicht bestimmt werden.

Interessant ist das Verhältnis der PAK- zu PM10-Konzentrationen, welches in Tabelle 14 aufgeführt ist. Muotathal weist mit Abstand und in allen drei untersuchten Jahren das höchste Verhältnis aller Stationen auf. Das im Jahre 2018 gemessene Verhältnis liegt dabei zwischen den an derselben Stelle gemessenen Werten von 2009 und 2011. Der im Jahre 2018 gemessene Wert ist also kein Einzelereignis. Das bedeutet, dass der Anteil der PAK-Konzentration bei vergleichbaren PM10-Werten und im Vergleich zu den übrigen Messtationen immer noch übermässig gross ist. Es ist jedoch zu beachten, dass die Werte aus dem NABEL-Bericht nicht aus dem gleichen Jahr stammen. Die übermässige Belastung durch PAK im PM10 in Muotathal ist trotzdem erkennbar. Die ländlichen Standorte Appenzell und San Vittore, welche unter dem Einflussbereich von Holzfeuerungsanlagen stehen, sowie der ländliche Messtandort Tänikon, weisen die zweit- bzw. dritthöchsten Verhältnisse auf. Das grosse Verhältnis unterstreicht ein weiteres Mal die Bedeutung der PAK-Emissionen von Holzfeuerungsanlagen.

⁶⁷ Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe im PM10 an ausgewählten Stationen des NABEL sowie der Kantone, Messbericht 2016, Andrea Fischer und Christoph Hüglin, EMPA, Dübendorf September 2017.

⁶⁸ Dioxin- und PAK-Konzentrationen in Abgas und Aschen von Stückholzfeuerungen, Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen (StMLU), Schriftenreihe StMLU, Materialien Band 142, Launhardt, Th., Hurm, R., Schmid, V., Link, H.: München 1998.

⁶⁹ Dioxin- und PAK-Emissionen der privaten Abfallverbrennung, Nussbaumer, T., BUWAL, 2004.

Tabelle 14: Verhältnis von PAK (nur Summe von 10 PAK gemäss NABEL) zu PM10 des Quartalsmittels im Zeitraum von Januar bis März in Muotathal des Jahres 2018, 2011, 2009 und im NABEL-Messnetz des Jahres 2016.

Standort	PAK/PM10-Verhältnis [ng m ⁻³ /μg m ⁻³]
Muotathal 2018	1.23
Muotathal 2011	1.04
Muotathal 2009	1.36
Basel 2016	0.22
Bern 2016	0.15
Dübendorf 2016	0.17
Härkingen 2016	0.16
Lausanne 2016	0.09
Lugano 2016	0.16
Magadino 2016	0.25
Payerne 2016	0.11
Sion 2016	0.17
Tänikon 2016	0.33
Zürich 2016	0.13
San Vittore 2016	0.33
Appenzell 2016	0.73
Flums 2016	0.31

Abbildung 33 zeigt die prozentuale Verteilung der 10 toxikologisch relevantesten PAK der Messstation in Muotathal im Vergleich zu den Messungen der 14 Stationen aus dem NABEL-Bericht. Dabei wird ersichtlich, dass sich die prozentuale Verteilung der wichtigsten PAK in Muotathal nicht wesentlich von den 11 NABEL-Stationen und den drei kantonalen Stationen unterscheidet.

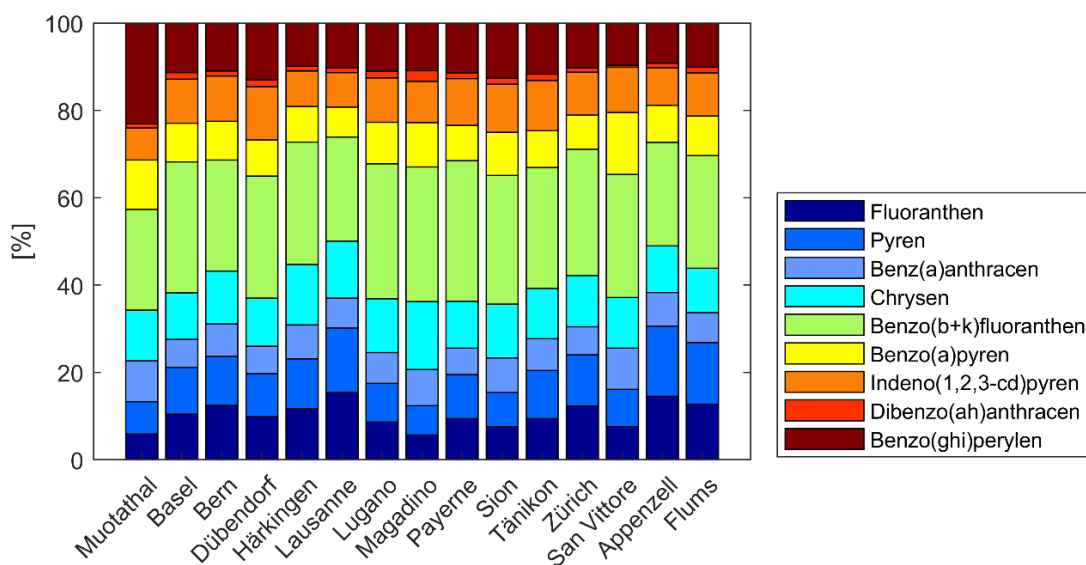


Abbildung 33: Darstellung der prozentualen Verteilung der 10 toxikologisch relevantesten PAK der Messkampagne 2018 in Muotathal und der NABEL- respektive kantonalen Stationen aus dem Jahre 2016.

4.6 Interpretation PAK/PM10-Verhältnis

Die PAK- und BaP-Konzentrationen, welche 2018 in Muotathal gemessen wurden, nehmen im Verlaufe des Quartals sehr stark ab (Abbildung 27). Die PM10-Konzentrationen weisen eher einer Bipolarität auf, mit erhöhten Werten im Februar und keiner deutlichen Abnahme über die drei Monate im ersten Quartal hinweg. Zusammenfassend ist keine ähnliche Entwicklung der drei Werte PM10, PAK und BaP ersichtlich. In Abbildung 34 wurde die Entwicklung des Verhältnisses PAK und PM10 im ersten Quartal 2018 betrachtet und mit der hiesigen potentiellen Sonnenscheindauer verglichen.⁷⁰ Die Werte sind über eine Woche gemittelt dargestellt. Die potentielle Sonnenscheindauer nimmt im Verlaufe des ersten Quartals kontinuierlich zu, wobei das Verhältnis PAK/PM10 stetig abnimmt, während die PM10-Konzentrationen auf vergleichsweise hohem Niveau verharren.

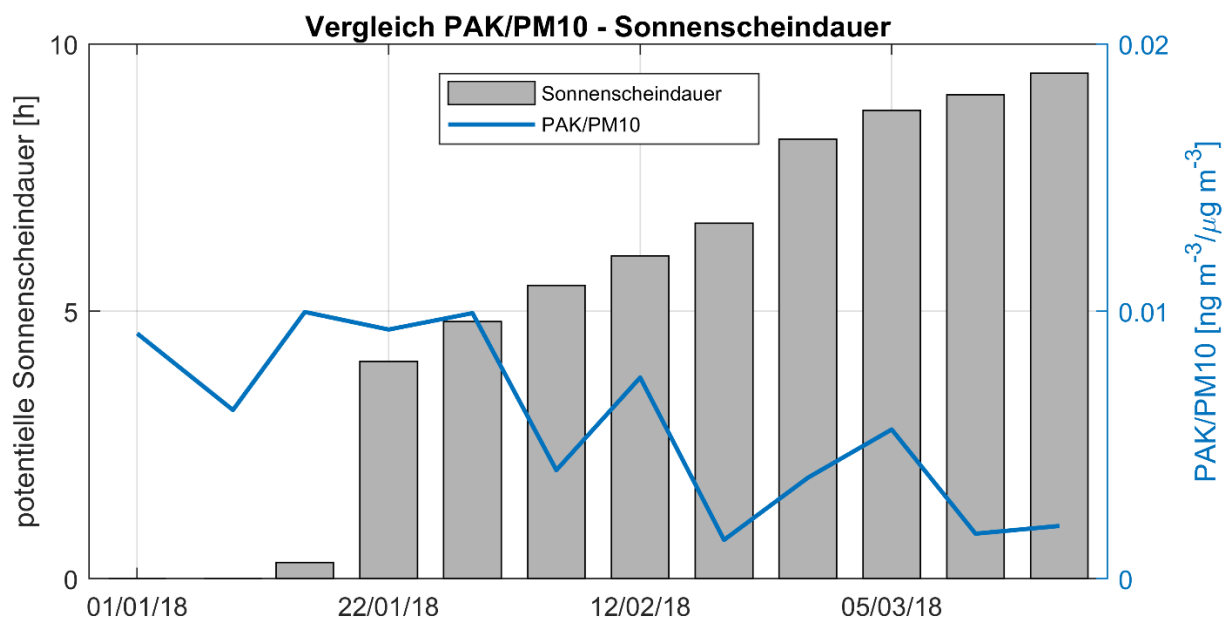


Abbildung 34: Vergleich des Verhältnisses PAK/PM10 und der Sonnenscheindauer in Muotathal 2018

Der starke Rückgang der PAK-Konzentrationen ist nicht auf die Verflüchtigung von PAK auf den HVS-Filtern aufgrund von höheren Temperaturen zurückzuführen.^{71,72} Für den Rückgang der PAK-Werte bei gleichbleibenden PM10-Werten gibt es zwei Hypothesen:

- I. Die primären Feinstaubemissionen (z. B. Holzfeuerungen) nehmen mit zunehmenden Temperaturen bzw. nahendem Frühling ab, was eigentlich eine Abnahme der Feinstaubbelastung zur Folge hätte. Eine mögliche Erklärung, welche dieser Entwicklung entgegenwirkt, sind durch

⁷⁰ <http://suntag.ch/index.php> [Stand: 05.07.2018].

⁷¹ Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe im PM10 an ausgewählten Stationen des NABEL sowie der Kantone, Messbericht 2016, Andrea Fischer und Christoph Hüglin, EMPA, Dübendorf September 2017.

⁷² Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) im atmosphärischen Feinstaub (PM10), Feinstaubuntersuchung im Muotathal (Messkampagne 2011), Susanne Bieri, inNET Monitoring AG, Dr. Christian Ruckstuhl, inNET Monitoring AG, 26.01.2012.

photochemische Prozesse ausgelöste sekundäre Bildungsmechanismen, welche durch die erhöhte Sonneneinstrahlung im Verlaufe des Frühlings vermehrt auftreten.^{73,74,75} Dabei bestehen die sekundären PM10-Anteile aus gasförmigen Vorläuferstoffen, welche einen grossen Anteil am gesamten Feinstaub ausmachen. Dies wurde bereits im Jahre 2006 festgestellt. Zum Beispiel hatte bei der MfM-U-Messstation Reiden bis zu 80 % des Feinstaubs sekundären Ursprungs.⁷³ Es kann angenommen werden, dass in Muotathal ebenfalls ein relevanter Anteil des Feinstaubs sekundär gebildet wird. Dies könnte die erhöhte PM10-Belastung im März erklären. Die sekundäre Feinstaubbildung durch die erhöhte solare Einstrahlung wirkt der Abnahme der primären Feinstaubemission entgegen, wodurch die PM10-Werte nicht in gleichem Masse abnehmen wie die PAK-Konzentrationen.

- II. PAK-ärmerer Feinstaub wird aus dem Schwyzer Talkessel nach Muotathal transportiert, worauf die Windverhältnisse hindeuten (Abbildung 10). Dieser vermehrte Transport tagsüber im März kommt aufgrund der verstärkten Thermik zustande.

Es kann davon ausgegangen werden, dass die Kombination der verstärkten sekundären Feinstaubbildung und der Zunahme des Schadstoffimports aus dem Schwyzer Talkessel für den Rückgang des PAK/PM10-Verhältnisses verantwortlich ist. Diese beiden Hypothesen können anhand der vorhandenen Daten nicht abschliessend beurteilt werden.

⁷³ Verursacher von Feinstaub, Teilbericht 1 PSI: Januar, Februar 2006, Teilbericht 2 uwe: Datenanalyse Reiden 2005/06. Prévôt A. u. a., 2006.

⁷⁴ OSTLUFT Jahresbericht Luftqualität 2017, OSTLUFT, Mai 2018.

⁷⁵ Luftbelastung in der Zentralschweiz: Detaillierte Messdaten 2017, Zentralschweizer Umweltfachstellen, Mai 2018.

4.7 Zusammenhang von Emissionen und Immissionen

Die PM10-Konzentrationen in Muotathal und in Schwyz sind während der jeweiligen Messkampagnen der Jahre 2011 und 2018 ähnlich hoch, allerdings stammen sie vermutlich aus unterschiedlichen Quellen. In Muotathal bilden die lokalen Feuerungsanlagen sicherlich eine wichtige Emissionsquelle. Zu diesen sind erfasste Kenngrößen vorhanden. Es wird dabei zwischen grossen und kleinen Feuerungsanlagen unterschieden, die anhand der Leistung von grösser oder kleiner als 70kW charakterisiert werden. Tabelle 15 liefert einen Vergleich der Holzfeuerungsanlagen in Muotathal der Jahre 2018 und 2011. Im Jahre 2011 gab es insgesamt 13 Betriebe mit 18 Feuerungsanlagen. 2018 gibt es neun Betriebe, in denen 16 grosse Feuerungsanlagen (> 70 kW) betrieben werden. Diese neun Grossbetriebe stossen ungefähr 6631 kg Feinstaub pro Jahr aus, während es 2011 erst 6090 kg pro Jahr waren. Zusammen erbringen die 16 Anlagen eine Leistung von 7763 kW, während es im Jahre 2011 noch rund 7000 kW waren. Obwohl die Anzahl Anlagen also zurückging, stiegen sowohl Gesamtleistung als auch Feinstaubemissionen. Die Anzahl der kleinen Feuerungsanlagen (< 70 kW) hat im Vergleich zum Jahre 2011 um rund einen Drittel abgenommen und beträgt neu rund 205 Anlagen. Dieser starke Rückgang ist erklärbar durch die drei grossen Wärmeverbände, welche in Muotathal existieren.⁷⁶

Tabelle 15: Holzfeuerungsanlagen in Muotathal der Jahre 2011 und 2018

	2011 (Stand 26.09.2011)	2018 (Stand 09.08.2018)
Anzahl Betriebe mit grossen Feuerungsanlagen (> 70 kW)	13	9
Anzahl grosse Feuerungsanlagen	18	16
Feinstaubemission grosser Feuerungsanlagen [kg/a]	6090	6631
Leistung der Feuerungsanlagen [kW]	7079	7763
Anzahl kleiner Feuerungsanlagen (< 70 kW)	300	ca. 205

Die grossen Holzfeuerungsanlagen (> 70 kW) unterstehen einer Emissionskontrolle. Als mögliche erhebliche Feinstaub- und PAK-Quellen könnten die zusätzlichen rund 205 kleinen Holzfeuerungsanlagen (< 70 kW) in Frage kommen. Eine quantitative Aussage der möglichen Feinstaubbelastung im Zusammenhang mit den vorhandenen Emissionen ist mit grossen Unsicherheiten behaftet. Unsicherheitsfaktoren sind dabei die nicht kontinuierlich quantifizierten Emissionen der Kleinfeuerungsanlagen, die Verweildauer der Schadstoffe in der Atmosphäre und die Volumenberechnung ohne Inversionslagen. Aus diesem Grund wird auf eine Abschätzung des Zusammenhangs Emissionen, Ausbreitungsvolumen und Immissionen verzichtet.

Abbildung 35 zeigt die PM10-Konzentration bei vorherrschender Windrichtung. Da jedoch die PM10-Konzentrationen nur als Tagesmittelwerte vorhanden sind, ist es schwierig eine Aussage zu formulieren.

⁷⁶ Erwin Horat, Feuerungskontrolleur Muotathal, 2018.

Tendenziell ist ersichtlich, dass höhere PM10-Konzentrationen bei Windstille (kein Wind) und Westwindverhältnissen auftreten. Die erhöhten PM10-Werte bei Windstille sind erklärbar, da bei geringeren Windgeschwindigkeiten die Durchmischung verringert und dadurch eine Akkumulierung der Luftschadstoffe im Talkessel ermöglicht wird. Die erhöhten PM10-Konzentrationen bei Westwindverhältnissen können entweder durch die Tagesmittelwerte des PM10 und den damit verbundenen ändernden Tagesgang des Windes erklärt werden oder durch lokale Witterungsphänomene, die eine Zufuhr von Luftschadstoffen aus dem Talkessel von Schwyz ermöglichen. Dies kann jedoch nicht abschliessend erklärt werden, da die zeitliche Auflösung der PM10-Messungen von einem Tag keine Rückschlüsse auf den Tagesverlauf der PM10-Konzentrationen und allfälligen damit verbundenen Luftschadstoffen von Schwyz liefern können. Zudem ist die vermehrte Wintersturmaktivität vor allem im Januar zu beachten, denn diese führte zu vermehrten lokalen Westwindverhältnissen.

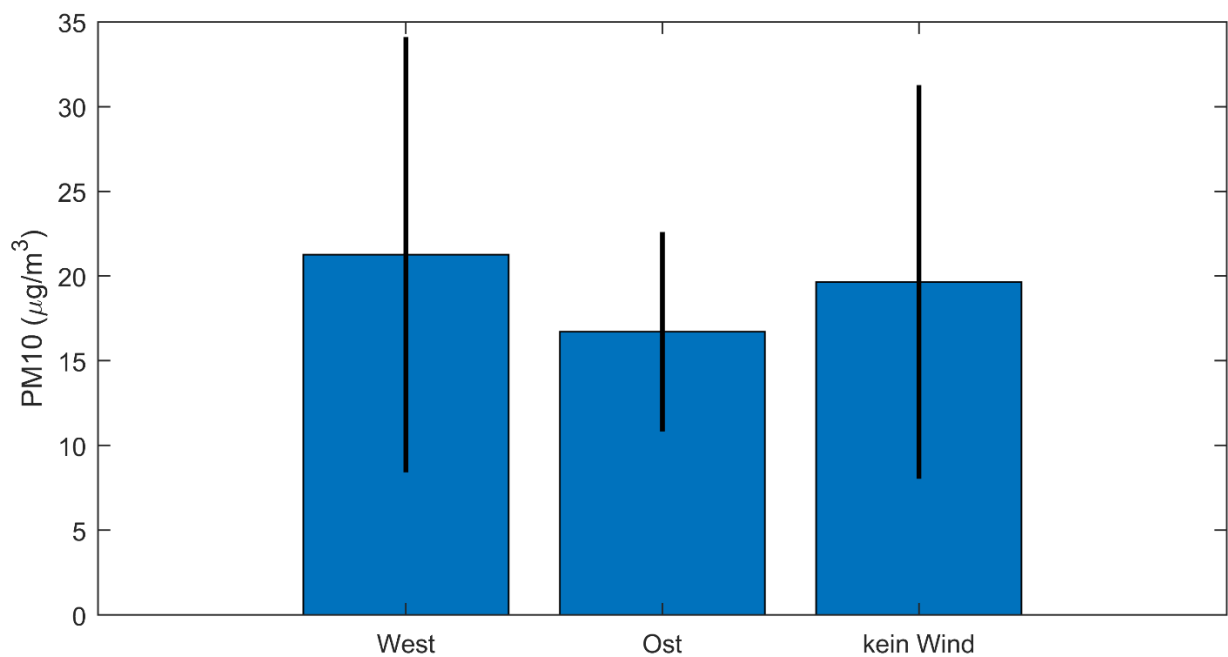


Abbildung 35: PM10-Konzentration bei vorherrschender Windrichtung (W-Sektor: 181 - 360°, O-Sektor: 0 - 180°, kein Wind < 1 m/s). Als schwarze Linie ist die Standardabweichung dargestellt.

5 Betroffene Massnahmen aufgrund der Messkampagnen 2009 und 2011

Aus den Erkenntnissen der ersten Messkampagnen 2009 und der Verifizierungskampagne im Jahre 2011 wurden Massnahmen eingeleitet, durch welche die erhöhten PAK-Anteile im PM10 zukünftig verringert werden sollten.

Die durch die Gemeinde Muotathal ausgearbeiteten Massnahmen beinhalteten unter anderem den Ausbau von Abgasreinigungsanlagen für grosse Holzfeuerungsanlagen (>70 kW). Diese sind im Gange, aber noch nicht abgeschlossen.⁷⁷ Weiter erfolgte die Nachrüstung von Partikelfiltern bei mehreren grossen Holzfeuerungsanlagen in der Gemeinde Muotathal und ein Abbau einer Anlage mit gleichzeitiger Integration in den Verbund einer anderen Grossanlage.⁷⁷

Zudem wird der Ausbau des bestehenden Wärmeverbundes gefördert. Das heisst, dass die Anzahl der an die Fernwärme angeschlossenen Haushalte erhöht wurde, was auch in den nächsten Jahren weiter verfolgt wird.^{77,78} Das Förderprogramm für Erneuerbares Heizen in der Zentralschweiz, welchem auch der Kanton Schwyz angehört, unterstützt Privathaushalte bei der Sanierung zu einem erneuerbaren Heizsystem (Kapitel 7.2).⁷⁹ Von der Beratung durch Fachpersonen und der finanziellen Unterstützung können auch die Bewohnerinnen und Bewohner von Muotathal profitieren. Jedoch ist die Förderung von Holzfeuerungen als erneuerbares Heizsystem aus lufthygienischer Sicht als Ersatz für Öl- und Gasheizungen zu hinterfragen.⁸⁰ Denn die emittierte Schadstoffmenge der Holzfeuerung, die zwar eine CO₂-ärmere Energiequelle darstellt, ist um ein Vielfaches grösser als im Vergleich zum Heizöl (Tabelle 16). Zusätzlich wird beim Zentralschweizer Förderprogramm eine Sanierung einer bestehenden Holzfeuerung zu einem Fernwärmeanschluss nicht finanziell gefördert.⁷⁹

Tabelle 16: Emittierte Schadstoffmenge in Bezug auf den Energiegehalt des Brennstoffs [mg MJ⁻¹] der wichtigsten Heizungstypen.⁸⁰

Feuerungsart	Emissionsfaktoren bezogen auf Inputenergie (mg/MJ)				
	NO ₂	CH ₄	NM VOC*	CO	PM10
Erdgas	10-54	6	2	4-16	0,1
Heizöl EL	28-51	1	6	7-14	0,2
Offene Cheminées und Raumheizer	80	240	360	3000	100
Stückholzkessel	80	20	30	1500	50
Pellet-Kessel	60-70	4-6	6-9	150-200	50
Automatische Holzfeuerung >50 kW	120-150	4-6	6-9	300-500	100

* NMVOC = Summe der flüchtigen Kohlenwasserstoffe (VOC), ohne Methan (CH₄)

⁷⁷ Mündliche Erläuterung Edgar Betschart (Umweltschutzbeauftragter Gemeinde Muotathal), Beat Gwerder (Gemeinderat der Gemeinde Muotathal) und Oskar Ulrich (Verwaltungsmitglied der Gemeinde Muotathal), 2018.

⁷⁸ Mündliche Erläuterung Melinda Suter, Amt für Umweltschutz des Kantons Zug, ehemals Amt für Umweltschutz Schwyz, 2018.

⁷⁹ Mündliche Erläuterung Christian Kiebele, Amt für Umweltschutz Schwyz, 2018.

⁸⁰ Akademien der Wissenschaften Schweiz: Energiepolitik und Klimaschutz mit Luftreinhaltung verbinden – Synergien nutzen und Zielkonflikte mildern. Swiss Academies Factsheets, 9 (4), 2014.

Die Kleinfeuerungsanlagen (<70 kW) wurden erfasst und die Liste an den lokalen Feuerungskontrolleur weitergeleitet. Diese Anlagen werden innerhalb eines zweijährigen Zyklus kontrolliert.⁷⁷ Neben dieser Kontrolle vor Ort wurde die Bevölkerung in Muotathal mithilfe von Informationsblättern über das korrekte Feuern in Privathaushalten sensibilisiert.^{77,78,81} Dieses Informationsblatt erscheint seit Dezember 2013 jährlich in den Wintermonaten und wird auch im kommenden Winter wieder im monatlich erscheinenden Infoblatt publiziert werden (Kapitel 7.3).⁸¹

⁸¹ Mündliche Erläuterung Oskar Ulrich, Verwaltung Gemeinde Muotathal, 2018.

6 Schlussfolgerungen

Die Messkampagne in Muotathal fand während des ersten Quartals des Jahres 2018 statt und diente als Erfolgskontrolle der nach den beiden Messkampagnen 2009 und 2011 getroffenen Massnahmen. Diese hatten zum Ziel, die lokale Feinstaubbelastung und den PAK-Anteil im Feinstaub zu senken.

Die getroffenen Massnahmen scheinen zwar sinnvoll gewählt. Die PAK-Anteile im PM10 haben sich jedoch nicht signifikant verbessert. Der Absolutwert des krebserregenden Benzo(a)pyren ist im Jahr 2018 zwar tiefer als in den vorhergehenden Messungen, liegt aber im Vergleich mit Referenzstandorten noch schweizweit an der Spitze.

Die umgesetzten Massnahmen reichen nicht aus, um das Projektziel zu erreichen. Aus diesem Grund müssen die bisher eingeleiteten Massnahmen zwingend beibehalten, verschärft und erweitert werden. Die Umsetzung von zusätzlichen Massnahmen sollte zeitnah angegangen werden.

Der Immissionsanteil verursacht durch Gross- oder Kleinfeuerungsanlagen kann nicht genau quantifiziert werden. In den letzten Jahren lag der Fokus der Massnahmen jedoch vor allem auf den Grossanlagen als Punktquellen der Luftverschmutzung, indem Partikelfilter und Abgasreinigungsanlagen installiert wurden. In einem weiteren Schritt sollte der Schwerpunkt nun auf die eher diffusen und daher weniger kontrollierbaren Quellen, sprich den Kleinfeuerungsanlagen, gelegt werden, um die nichtfachgerechte Verbrennung von Abfall und lackiertem Holz zu minimieren und die PAK-Konzentration in Feinstaub weiter zu reduzieren. Zwar gibt es auch bei den Kleinfeuerungsanlagen bereits Ansatzpunkte, wie die fortlaufende Sensibilisierung der Bevölkerung, regelmässigen Kontrollen durch einen Feuerungskontrolleur und der Anschluss an die Fernwärme. Letzteres hat noch mehr Potential, um weiter ausgebaut zu werden. Das zentralschweizerische Förderprogramm bietet neben der finanziellen Unterstützung auch Beratung durch die kantonale Energieberatungsstelle an. Neben dem Ersatz einer Öl- und Gasheizung durch ein erneuerbares Heizsystem, sollte aus Sicht der Autoren aber auch das Umsteigen der privaten Holzheizung auf eine Wärmeversorgung durch Fernwärme stärker proklamiert und auch finanziell gefördert werden. Dabei soll die Energiefachperson nebst den CO₂-Reduktionszielen auch den Zielkonflikt zwischen Klimaschutz und Luftreinhaltung aufzeigen.

Eine Überprüfung der Wirksamkeit der bisherigen und zukünftigen Massnahmen ist etwa im Jahre 2025 angebracht.

7 Anhang

7.1 Messwerte

Tabelle 17: Tages- und Wochenmittel der wichtigsten Messgrößen

Probenahme		Analytik			Witterungsbedingung		
Woche	Datum	PM10 [$\mu\text{g m}^{-3}$]	PAK [ng m^{-3}]	BaP [ng m^{-3}]	Temp. [$^{\circ}\text{C}$]	Niederschlag [mm]	Inv.Häufigkeit [%]
KW 1	01.01.2018	12.89	23.39	3.16	2.34	6.8	75.00
	02.01.2018	10.18			2.05	8.6	41.67
	03.01.2018	8.88			4.87	10.2	78.47
	04.01.2018	13.92			3.54	47	80.56
	05.01.2018	13.79			4.74	0.4	100.00
	06.01.2018	-			2.98	0	100.00
	07.01.2018	-			4.89	0	100.00
KW 2	08.01.2018	-	29.40	4.60	7.18	0	100.00
	09.01.2018	17.17			6.47	8.6	88.89
	10.01.2018	19.97			3.06	0	86.81
	11.01.2018	30.07			2.56	0.2	97.22
	12.01.2018	33.31			2.13	0	88.89
	13.01.2018	16.26			0.02	0	65.97
	14.01.2018	14.06			-2.66	0	48.61
KW 3	15.01.2018	28.43	29.93	4.00	-1.47	0	93.06
	16.01.2018	9.28			4.52	10.4	80.56
	17.01.2018	3.75			2.26	8.6	25.70
	18.01.2018	20.38			1.8	4.2	41.67
	19.01.2018	17.78			2.44	23.2	39.59
	20.01.2018	11.17			0.54	23.2	38.20
	21.01.2018	7.49			2.26	48	22.92
KW 4	22.01.2018	17.42	38.33	5.13	3.24	53.2	82.64
	23.01.2018	14.81			3.53	9.6	72.92
	24.01.2018	24.22			3.13	0	100.00
	25.01.2018	23.08			4.67	0	98.61
	26.01.2018	21.92			4.24	0	95.83
	27.01.2018	18.92			4.26	0	70.83
	28.01.2018	14.36			3.73	0	95.14
KW 5	29.01.2018	17.01	28.44	3.27	2.88	0	99.31
	30.01.2018	16.74			4.28	0	85.42
	31.01.2018	20.82			4.04	0	86.81
	01.02.2018	8.94			1.29	10.4	53.47
	02.02.2018	7.57			-1.5	0	61.11
	03.02.2018	10.96			-1.22	0	42.36

	04.02.2018	11.71			-1.24	0	64.59
KW 6	05.02.2018	26.38	23.88	3.04	-2.47	0	81.25
	06.02.2018	32.04			-2.64	0	63.89
	07.02.2018	34.29			-0.7	0.6	11.12
	08.02.2018	35.69			-0.77	0.4	4.17
	09.02.2018	20.53			-1.45	0	24.31
	10.02.2018	26.75			-1.08	0.2	37.50
	11.02.2018	17.10			-0.23	12.4	28.48
KW 7	12.02.2018	6.33	34.29	4.19	-1.67	7	32.64
	13.02.2018	10.94			-6.28	3	89.58
	14.02.2018	16.92			-4.73	0	90.28
	15.02.2018	30.88			-1.33	10.2	88.20
	16.02.2018	49.89			2.72	10.8	72.22
	17.02.2018	17.17			2.22	7.2	61.11
	18.02.2018	17.17			0	2.4	2.78
KW 8	19.02.2018	23.01	9.79	0.92	-0.55	0	13.20
	20.02.2018	31.28			-1.21	0	27.78
	21.02.2018	30.29			-1.64	0.4	35.42
	22.02.2018	38.96			-1.89	0.2	25.70
	23.02.2018	35.40			-1.84	0	22.23
	24.02.2018	37.21			-1.64	0	11.81
	25.02.2018	25.47			-4.41	0	12.50
KW 9	26.02.2018	26.99	24.93	2.93	-8.75	0	30.56
	27.02.2018	15.56			-10.86	0	45.14
	28.02.2018	26.93			-7.82	0	53.47
	01.03.2018	46.85			-2.46	0.2	58.34
	02.03.2018	63.08			-3.45	3.2	68.06
	03.03.2018	22.49			0.11	0.4	76.39
	04.03.2018	14.49			3.57	0.2	96.53
KW 10	05.03.2018	19.39	18.47	2.27	4.2	0	81.25
	06.03.2018	28.13			2.91	1.8	88.20
	07.03.2018	13.68			2.55	5	49.31
	08.03.2018	7.21			2.59	1.8	44.45
	09.03.2018	14.97			5.13	0.2	95.14
	10.03.2018	14.36			6.77	0	96.53
	11.03.2018	10.69			8.87	0	87.50
KW 11	12.03.2018	10.49	6.37	0.73	6.11	7.2	77.78
	13.03.2018	7.93			4.35	6.2	46.53
	14.03.2018	6.53			5.09	0.8	50.00
	15.03.2018	8.78			9.03	0	71.53
	16.03.2018	12.11			6.26	0	72.92
	17.03.2018	58.69			3.64	4.8	50.70
	18.03.2018	19.61			0.46	0.4	2.78

KW 12	19.03.2018	29.58	8.02	0.88	-1.17	4.4	20.14
	20.03.2018	33.89			-2.24	1.8	5.56
	21.03.2018	20.88			-2.16	0.8	38.89
	22.03.2018	14.28			-1.57	0.6	32.64
	23.03.2018	13.33			2.46	1.4	41.67
	24.03.2018	9.40			3.34	0	86.81
	25.03.2018	11.90			5.88	0	75.00
KW 13	26.03.2018	22.69	7.50	0.79	4.53	1.4	54.17
	27.03.2018	17.26			3.56	11.6	27.09
	28.03.2018	5.68			7.58	11	22.92
	29.03.2018	3.57			4.46	10.4	25.70
	30.03.2018	5.61			5.85	39.6	63.20
	31.03.2018	15.25			0.73	27.2	38.89

7.2 Förderbeiträge in der Zentralschweiz für Erneuerbares Heizen

Ersetzen Sie Ihre alte Heizung!

Aus der CO₂-Abgabe des Bundes erhalten Sie attraktive Förderbeiträge für den Ersatz Ihrer bestehenden Heizöl-, Erdgas- oder Elektroheizung.



Das Gebäudeprogramm 

www.energie-zentralschweiz.ch



Erneuerbar Heizen

Förderbeiträge in der Zentralschweiz

Der Ersatz Ihrer alten Öl-, Gas- oder Elektroheizung, durch ein erneuerbares Heizsystem lohnt sich mehrfach! Sie fördern die regionale Wirtschaft und werden unabhängig von schwankenden Weltmarktpreisen. Sie profitieren von attraktiven Förderbeiträgen und leisten einen wichtigen Beitrag zum Klimaschutz.

Als förder- und erneuerbare Heizsysteme gelten Wärmepumpen, thermische Solaranlagen und Holzfeuerungen. Zudem können Anschlüsse an Wärmenetze gefördert werden, wenn diese mit Holz, Umweltwärme oder Abwärme betrieben werden.

In der Zentralschweiz geförderte Heizsysteme

HEIZSYSTEM	GEFÖRDERT IN DEN KANTONEN	BEMERKUNGEN
Wärmepumpe	LU, NW, SZ, UR	Im Kanton Zug bieten verschiedene Gemeinden Förderbeiträge an.
Thermische Solaranlage	LU, NW, SZ, UR	
Holzfeuerung	LU, NW, SZ, UR	
Anschluss an Wärmenetz	NW, SZ, UR	

In fünf Schritten zum Fördergesuch:

1. Informieren Sie sich über das genaue Vorgehen.

Kontaktieren Sie die Energieberatungsstelle in Ihrem Kanton oder informieren Sie sich auf www.energie-zentralschweiz.ch.

2. Planen Sie Ihren Heizungsersatz.

Kontaktieren Sie eine Fachperson für die Planung des Heizungsersatzes. Nutzen Sie den GEAK Plus als Entscheidungshilfe für Ihren Heizungsersatz. Eine Liste der GEAK-Experten finden Sie auf www.geak.ch.

3. Reichen Sie Ihr Fördergesuch ein.

Die Eingabe des Gesuchs erfolgt elektronisch über das Gesuchportal Ihres Kantons. Alle Details und ein Erklärvideo für die Eingabe finden Sie unter www.energie-zentralschweiz.ch.

4. Ersetzen Sie Ihre Heizung.

Sie haben nach Erhalt der Förderzusage zwei Jahre Zeit (im Kanton Uri: 3 Jahre), die Sanierung abzuschliessen.

5. Erhalten Sie Ihr Fördergeld.

Reichen Sie nach Abschluss der Sanierungsarbeiten das Abschlussformular bei Ihrem Kanton ein und die Auszahlung des Fördergeldes wird ausgelöst.

Energieberatungs-Telefone

LU: 041 412 32 32

NW: 041 618 40 54

OW: 041 666 64 24

SZ: 041 819 19 91

UR: 041 875 26 88

ZG: 041 728 23 82

7.3 Informationsblatt der Gemeinde Muotathal



GEMEINDE
MUOTATHAL

gemeinde@muotathal.ch
www.muotathal.ch

Umweltschutzkommission

Hauptstrasse 48 | Postfach 142 | 6436 Muotathal
Telefon 041 830 25 74 | Fax 041 830 21 28 | gemeinde@muotathal.ch



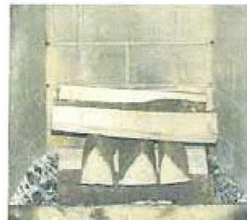
In Muotathal ist die Feinstaubbelastung in den Wintermonaten durch die Inversions-Wetterlage sehr hoch (vergleichbar mit der Stadt Zürich). Mit ein Grund ist auch der unsachgemässe Betrieb der vielen „kleinen“ Holzfeuerungen und Cheminées.

Was kann jeder zu besserer Luft beitragen?

- Korrekte Anfeuerungsmethode, von oben nach unten (Gase und Partikel werden beinahe vollständig verbrannt)
- Rauch ist beim Anfeuern grau (nicht schwarz), sollte jedoch nach ca. 10 Minuten hell werden und bald nach Austritt aus dem Kamin verschwinden → keine Rauchfahne.



Anfeuermodul: Dieses sogenannte Anfeuermodul kann einfach selber hergestellt werden und ersetzt Papier und Karton. Die vier Scheiter legen Sie übereinander und die Kreuz aufeinander und die Anzündhilfe dazwischen (roter Kreis).



Einschichten des Holzes in Cheminées: In grossen Feuerräumen, wie beispielsweise in Cheminées, schichten Sie die Scheiter mit etwas Abstand als Kreuzbeige ein, unten die dickeren und oben die dünneren.



Platzieren des Anfeuermoduls: Das Anfeuermodul wird oben auf dem Brennholzstapel aufgebaut (untere Scheiter des Anfeuermoduls quer zu den obersten Brennholzscheitern). Ein Streichholz genügt, und das Feuer ist entfacht.



In Speicheröfen werden die Scheiter mit der Stirnseite nach vorne eingefüllt

- Kaminbrand vorbeugen durch regelmässige Reinigung und korrekte Anfeuerungsmethode
- Merkblätter sind bei der Gemeindeverwaltung und beim Amt für Umweltschutz erhältlich, bzw. im Internet abrufbar (www.sz.ch/luft).

Was bringt's?

- Vorteile für die Gesundheit der Kinder, Vitalität der Kühe und Schafe dank weniger hochgiftiger Gase aus Abfallverbrennung
- Weniger Atembeschwerden und bessere Lungenentwicklung bei Kindern (Feinstaub aus Feuerungen oder Abgasen kann Lungen reizen und bei Asthmatikern zu häufigeren Beschwerden führen und bei Kindern die Lungenentwicklung vermindern)
- Krankheiten verringern
- Abfallverbrennen führt zu Korrosionen am Kamin und in der Folge zu einer kürzeren Lebensdauer des Materials. Durch korrektes Brennmaterial können Kosten gespart werden.

Die Umweltschutzkommission nimmt gerne Ihre Meldungen entgegen und geht den Hinweisen aus der Bevölkerung nach (auch nächtliche Vergehen sollen gemeldet werden) Tel: 041 831 02 20.