



Russbelastung in der Zentralschweiz

Auswertung der Russmessdaten von 2009 bis 2021

Autorenschaft

Dr. Hannah Wey

Geprüft

Dr. Christian Ruckstuhl

Version

07.12.2022



Umwelt
Zentralschweiz

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung.....	3
2. Hintergrund	3
2.1. Entstehung von Russ	3
2.2. Messverfahren.....	4
2.3. Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit	5
2.4. Auswirkungen auf Klima und Umwelt	6
2.5. Gesetzliche Grundlagen	6
3. Russmessungen in der Zentralschweiz	8
3.1. Projektmessungen	8
4. Methodik	12
4.1. Verwendete Datenbanken und Software.....	12
4.2. Normalisierte Werte im Wochengang	12
4.3. Saisonale Aggregationen	12
4.4. Windrichtungsanalysen	12
4.5. Aethalometer-Quellenmodell.....	13
4.6. Berechnung von Russemissionen aus dem Strassenverkehr.....	16
5. Resultate und Diskussion	18
5.1. Jahresmittelwerte für EBC, NO ₂ und PM10 und Standortvergleich	18
5.2. Saisonalität der Russkonzentration im Jahr 2021.....	20
5.3. Tages- und Wochengang der PM10- und EBC-Konzentrationen	21
5.4. Windrichtungsanalyse	23
5.5. Abschätzung der nicht-fossilen und fossilen Anteile.....	25
6. Berechnung von Russemissionen aus dem Strassenverkehr	27
7. Zusammenfassung und Schlussfolgerungen	29
8. Anhang.....	30
8.1. Hintergrund	30
8.2. Messwerte.....	31
8.3. Monatliche Russbelastung	32
8.4. EBC und PM10 im Tages- und Wochengang.....	33
8.5. Saisonale Unterschiede in den Russkonzentrationen.....	34
8.6. Windrichtungsanalysen	36
8.7. Aethalometer-Modell.....	45
8.8. Berechnung von Russemissionen aus dem Strassenverkehr.....	46
8.9. Klassifizierung der Messstandorte	50

Abkürzungen und Begriffserklärungen

Aethalometer	optisches Messgerät zur Bestimmung der Russkonzentration (gemessen als Black Carbon (BC))
BC	«Black Carbon»; im Gegensatz zu CB unerwünscht
C	Kohlenstoff
CB	«Carbon Black»; industriell hergestellte Partikel von bestimmter Struktur und Zusammensetzung für reine Anwendungen in kommerziellen Produkten
EBC	equivalent Black Carbon
EKL	Eidgenössische Kommission für Lufthygiene
EC	Elementarer Kohlenstoff (Elemental Carbon)
FF	fossil fuel
HVS	High-Volume Sampler
LRV	Luftreinhalte-Verordnung
MAAP	Multiangle Absorption Photometer
$\mu\text{g m}^{-3}$	Mikrogramm (Schadstoff) pro Kubikmeter (Luft)
OC	organischer Kohlenstoff
PAK	polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe
PM _{2.5}	Feinstaub («Particulate Matter», aerodynamischer Partikeldurchmesser <2.5 μm)
PM ₁₀	Feinstaub («Particulate Matter», aerodynamischer Partikeldurchmesser <10 μm)
SLCF	kurzlebiger Klimaschadstoff («short-lived climate forcers»)
TC	totaler Kohlenstoff, EC+OC
WB	wood burning

1. Einleitung

Russ ist ein Bestandteil des Feinstaubs (PM) und enthält hohe Mengen an Kohlenstoff (C). In der Schweiz sind die Russkonzentrationen in der Aussenluft seit Beginn der Messungen ab 2007 zwar rückläufig, jedoch noch immer auf einem Niveau deutlich oberhalb des von der eidgenössischen Kommission für Lufthygiene (EKL) vorgeschlagenen Richtwerts. Wegen dieser hohen Exposition und der gesundheitsschädlichen Wirkung ist Russ in der Luftreinhaltung weiterhin von grosser Bedeutung.

Der vorliegende Bericht wurde im Auftrag von Umwelt Zentralschweiz («UZ», vorgängig «ZENTRUM» bzw. «ZUDK») geschrieben. Im Jahre 2017 wurde bereits eine Auswertung der Russmessdaten aus der Zentralschweiz mit Daten von 2009 bis 2016 veröffentlicht.¹ Seither wurden die Messungen im Rahmen von in-LUFT und MfM-U fortgeführt. Gleichzeitig fanden in Zug (2017), Sachseln (2019) und Stans (2021) Kurzzeitmessungen statt. Der Bericht 2017 wurde daher aktualisiert, indem er mit den neuen Messwerten ergänzt sowie wissenschaftlichem Hintergrundwissen und neuen Erkenntnissen erweitert wurde.

2. Hintergrund

2.1. Entstehung von Russ

Russpartikel gelangen bei Wald- und Buschbränden natürlicherweise in die Atmosphäre. Zusätzlich entstehen sie anthropogen durch die unvollständige Verbrennung von fossilen und biogenen Brennstoffen. Russ wird auch industriell hergestellt («Carbon Black», CB). In einem Autoreifen wird z. B. rund 3 kg CB als Füllstoff und Verstärkungsmittel eingesetzt.² Auch in den Bremssystemen in Fahrzeugen wird Russ eingesetzt, unter anderem als Schmiermittel.³ Das BAFU und die Empa erforschen momentan, wie sich der Abrieb von Pneu und Bremsen auf die Umwelt auswirkt.⁴

In der Schweiz sind die Russemissionen seit Anfang der 90er Jahren stark rückläufig (Abbildung 1). Der Energiesektor, zu welchem sowohl Emissionen aus dem Verkehr und Transport als auch Heizungen zählen, ist für den grössten Teil der Emissionen verantwortlich. Gemäss einer älteren BAFU-Studie aus dem Jahre 2010 sind die anthropogenen Hauptquellen Holzfeuerungen und Dieselfahrzeuge, vor allem ohne Partikelfilter wie bei Maschinen in der Land- und Forstwirtschaft sowie der Baubranche (Abbildung 25 im Anhang).⁵

Neben zeitlich variierenden Emissionen, z. B. während Stosszeiten im Verkehr und Heizaktivitäten im Winter, sind auch Inversionslagen für die resultierende Immission entscheidend.⁶

¹ Bieri, S., Ruckstuhl, Ch. (2017). Auswertung der Russmessdaten des in-LUFT und des MfM-U-Projekts der Jahre 2009 bis 2016. inNET Monitoring AG.

² Ceresana (2022). Marktstudie Carbon Black (Industrieruß). <https://www.ceresana.com/de/marktstudien/chemikalien/carbon-black/marktstudie-carbon-black-russ.html>. Letzter Besuch: 17.11.2022.

³ Grigoratos, Th., & Martini, G. (2015). Brake wear particle emissions: a review. Environmental Science and Pollution Research (22), pp. 2491–2504.

⁴ Bader, P. (2020). Die unterschätzte Gefahr. <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/luft/dossiers/magazin2021-1-dossier/die-unterschaetzte-gefahr.html>. Letzter Besuch: 17.11.2022.

⁵ BAFU (2012). Weniger Russ aus Dieselmotoren; Erfolge der Schweiz bei der Emissionsreduktion.

⁶ Amt für Umweltschutz Uri (2018). Inversionswetterlagen und ihr Einfluss auf Luftschadstoffe im Kanton Uri. inNET Monitoring AG.

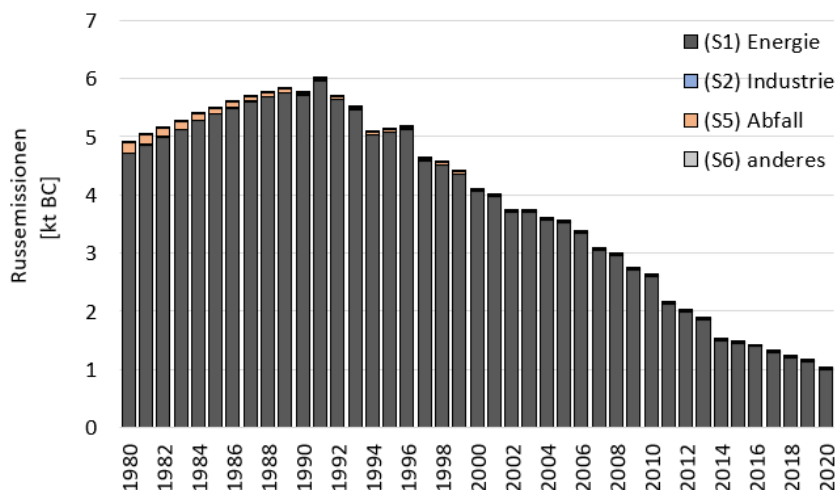


Abbildung 1: Russemissionen (BC) in der Schweiz nach Sektoren zwischen 1980 und 2020.⁷

2.2. Messverfahren

Russ-Verbindungen bestehen hauptsächlich aus Kohlenstoff. «Russ» ist aus chemischer Sicht jedoch keine eindeutig definierte Grösse. Deshalb gibt es auch kein direktes Messverfahren dafür.⁸ Oft werden **«Elemental Carbon» (EC)**, **«Black Carbon» (BC)** oder **«Equivalent Black Carbon» (EBC)** als Indikatoren für die Russbelastung verwendet. Für die Bestimmung dieser Indikatoren werden die thermochemischen und physikalisch-optischen Eigenschaften der Russpartikel ausgenutzt:

Die **Bestimmung von BC** erfolgt mittels eines optischen Messverfahrens. Das zugehörige Gerät ist ein «Aethalometer». Dabei wird die Lichtabsorption durch eine Feinstaubprobe auf einem Quarzfaserfilter mit sieben verschiedenen Wellenlängen gemessen. So kann der Lichtabsorptionskoeffizient des Feinstaubes kontinuierlich ermittelt werden.⁸ Mit dieser Messmethode ist es auch möglich, Russquellen zu unterscheiden (Kapitel 4.5). Russpartikel aus der Holzverbrennung enthalten nämlich organische Verbindungen, welche die Lichtabsorption im Ultraviolett-Bereich verstärken. Im Gegensatz dazu verstärkt BC, welches in Diesel zu einem höheren Anteil enthalten ist als organisches Material, die Lichtabsorption im Infrarot-Bereich.⁹

Die **Messung von EC** erfolgt mittels einer thermisch-optischen Methode, welche auf der unterschiedlichen Hitzebeständigkeit der kohlenstoffhaltigen Feinstaubbestandteile basiert. Das dazugehörige Gerät ist ein High-Volume Sampler (HVS) für die Entnahme der Feinstaub-Tagesproben auf einem Quarzfaserfilter und anschliessend ein OC/EC-Analysator zur Messung der Russkonzentration. Die Filterprobe wird gemäss einem vorgegebenen Protokoll stufenmässig aufgeheizt. Organische Verbindungen (OC) werden dabei in die Gasphase überführt und in CH₄ umgewandelt, welches messbar ist. Beim zweiten Aufheizen verbrennen die restlichen Kohlenstoffverbindungen, insbesondere der elementare Kohlenstoff (EC).⁸

Die Messwerte von EC und BC sind nicht identisch, da sich gefärbte oder hitzebeständige Verbindungen unterschiedlich auf die Höhe des jeweiligen Messwerts auswirken. Auch enthalten beide Messmethoden eine gewisse **Messunsicherheit**: Beide Methoden werden von weiteren Feinstaubkomponenten (z. B. Mineralstaubpartikel) gestört. Durch Verwendung von PM₁ bzw. PM_{2.5} Vorabscheiden wird dieser Einfluss minimiert. Bei der EC-Messung muss die Pyrolyse, sprich die Umwandlung von OC in EC während der

⁷ BAFU (2022). Switzerland's Informative Inventory Report 2022. Submission under the UNECE convention on long-range transboundary air pollution. A7.1.6 BC emission time series. Bern.

⁸ Herich, H., Hüglin, Ch. (2013). Russbelastung in der Schweiz. Messungen im Rahmen des NABEL. EMPA.

⁹ Sandradewi, J., Prevot, A.S.H., Szidat, S., Perron, N., Alfarra, R. M., Lanz, V., Weingartner, E., Baltensperger, U. (2008) Using aerosol light absorption measurements for the quantitative determination of wood burning and tra-c emission contributions to particulate matter. Environmental Science & Technology, 42, pp. 3316–3323.

ersten Aufwärmphase, korrigiert werden. Dazu gibt es zwei verschiedene Verfahren, was im Messprotokoll kommentiert werden sollte. Bei der BC-Messung müssen die Messwerte auf die Lichtstreuung durch das Filtermedium und transparente Aerosolpartikel sowie die Filterbelegung korrigiert werden.

Damit Russimmissionsdaten schweizweit und international verglichen werden können, hat man sich darauf geeinigt, via **Vergleichsmessungen die lineare Beziehung zwischen EC und BC standortspezifisch** zu bestimmen. Auch gemäss BAFU-Immissionsmessempfehlung gilt dieses Vorgehen als Referenzmessverfahren.¹⁰ Mithilfe der linearen Parameter werden die kontinuierlich gemessenen BC Werte korrigiert, sodass die Messwerte konsistent mit den an spezifischen Tagen gemessenen EC-Werten sind.⁸ Die berechneten Werte werden mit **«EBC» («equivalent black carbon»)** bezeichnet. In anderen Worten fungieren die EC-Messwerte als Qualitätssicherung. Die lineare Beziehung wird jährlich neu berechnet und variiert wegen der Qualität der Quarzfaserfilter und dem Russgehalt im Feinstaub, welcher tendenziell abnimmt.¹¹

Tabelle 1: Übersicht über die Parameterbegriffe von Russmessungen.

	Abkürzung	physikalische Messmethode	Messgerät	Beschreibung
elementarer Kohlenstoff	EC	thermische Eigenschaften	High-Volume Sampler (HVS)	- thermo-optische Analyse von Filtern - Messung jeden 4. Tag bis täglich - tiefe zeitliche Auflösung
Black Carbon	BC	Absorption von Licht	Aethalometer	- kontinuierlich mit hoher Auflösung
äquivalenter schwarzer Kohlenstoff	EBC equivalent BC	eindeutig definiertes Messverfahren zum Datenvergleich	beide	- jährliche Korrektur der BC-Messungen mit den EC-Werten - kontinuierlich

2.3. Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit

Wissenschaftliche Studien zu den gesundheitlichen Auswirkungen von Russpartikeln beinhalten oft auch Untersuchungen zu Feinstaub (PM10 und/oder PM2.5), da letzteres die Russpartikel miteinbezieht. Eine Erhöhung der Exposition von reinem Russ um $1 \mu\text{g m}^{-3}$ ist für die menschliche Gesundheit jedoch schlimmer als die Erhöhung der Feinstaubexposition um die gleiche Masse pro Volumeneinheit Luft.¹⁴ Gleichzeitig ist unsicher, wie die Russpartikel selbst gesundheitsschädlich sind oder ob Russ hauptsächlich als Träger fungiert, d. h. weitere toxische Substanzen, welche sich bei der Verbrennung auf den Russpartikeln ablagern, für Gesundheitsschäden verantwortlich sind. Zu diesen Stoffen gehören unter anderem polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK), Nitrat, Ammonium, Sulfat und (Schwer-)Metalle.¹²

Russ ist aus gesundheitlicher Sicht aus mehreren Gründen bedeutend: Da Russpartikel sehr klein sind, können sie tief in die Lunge eindringen und so vom Körper aufgenommen werden. Vor allem Russ aus Dieselaabgasen ist **krebserregend** (WHO-Klasse 1).¹² Weiter führen Russpartikel zu Erkrankungen der **Atemwege** und beeinflussen das **Herz-Kreislauf**-System negativ.¹³ Durch all diese gesundheitlichen Folgen steigt die vorzeitige Sterblichkeit.¹⁴ Neuste Studien berichten sogar von einem Zusammenhang

¹⁰ BAFU (2021). Immissionsmessung von Luftfremdstoffen. Messempfehlungen, Stand 2021. Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt-Vollzug Nr. 2104: 41 S.

¹¹ Herich, H., Schlatter, S. (2017). Kontinuierliche Kurzzeitmessungen von Russ in Feinstaub. Einsatz von MAAP-Geräten im OSTLUFT-Gebiet. OSTLUFT. European Environment Agency (2013). Status of black carbon monitoring in ambient air in Europe. EEA Technical report No 18.

¹³ Niranjana, R., Thakur, A. K. (2017). The toxicological mechanisms of environmental soot (Black Carbon) and Carbon Black: focus on oxidative stress and inflammatory pathways. Frontiers in Immunology, 8:76. doi: 10.3389/fimmu.2017.00763.

¹⁴ WHO (2013). Review of evidence on health aspects of air pollution. REVIHAAP project. Technical report. Copenhagen.

zwischen Feinstaubbelastung entlang von Hauptverkehrsachsen und **Demenz**, wobei die verursachende Substanz jedoch ebenfalls noch unklar ist.^{15, 16}

2.4. Auswirkungen auf Klima und Umwelt

Russ gilt als «**kurzlebiger Klimaschadstoff**». Das heisst, dass die Partikel das terrestrische Klima über eine Zeitskala von Tagen bis zu wenigen Jahren beeinflussen – im Gegensatz zu CO₂, dessen Klimaeinfluss Jahrzehnte andauert. Der Grund dafür liegt in Auswaschung aus der Atmosphäre und der damit verbundenen kürzeren Lebensdauer von Russ verglichen mit den meisten Treibhausgasen.

Diese Russpartikel, auch Aerosole genannt, absorbieren in der terrestrischen Atmosphäre das Sonnenlicht und erwärmen die unmittelbare Umgebung. Ausserdem lagern sich die Partikel weit entfernt von der Emissionsquelle auf Eis- und Schneeflächen ab, zum Beispiel im Hochgebirge oder in der Arktis. Die Flächen verdunkeln sich und der Albedo-Effekt wird kleiner; d. h. das Sonnenlicht wird von den ursprünglich weissen Flächen weniger reflektiert. Das Abschmelzen von Schnee und Eis wird damit beschleunigt und die Atmosphäre erwärmt sich weiter.¹⁷

Weiter beeinflussen Russpartikel indirekt die **Wolkenbildung** und den Niederschlag. Für die Bildung von Wassertröpfchen braucht es nämlich Aerosole, an denen der Wasserdampf kondensiert. Die Zusammenhänge zwischen Wolkenbildung und Klima sind jedoch komplex und bisher nicht abschliessend erforscht. Eine Schwierigkeit bei der Bewertung bezüglich Russes sind die unterschiedlichen optischen Eigenschaften der Partikel, sowie fehlende Kenntnisse über die geografische Verteilung, Mischung, Beschichtungen und Alterungseffekte.^{18, 19}

Die in der Atmosphäre gespeicherte Energiemenge wird in W m⁻² Erdoberfläche gemessen. Bond et al. (2013) hat den totalen **Klimaantrieb** durch BC (inkl. Wolkeneffekte) auf 1.1 W m⁻² geschätzt. Damit ist BC bezüglich Klimaantrieb im heutigen Industriezeitalter der zweitwichtigste anthropogene Emissionsparameter nach CO₂. Die Autoren betonen allerdings, dass es bezüglich der Wolkeninteraktionen grosse Unsicherheiten gibt. Ausserdem werden zusammen mit Russ oft auch noch andere Schadstoffe wie schwefelhaltige Verbindungen emittiert. Rechnet man diese mit ein, reduziert sich der Klimaantrieb entsprechend.

Weitere Substanzen, welche sich bei der Verbrennung auf den Russpartikeln ablagern (z. B. polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) und Metalle) werden zusammen mit Russ ebenfalls in die Umwelt eingetragen.

2.5. Gesetzliche Grundlagen

Für Russ gibt es in der Luftreinhalte-Verordnung (LRV) keine Immissionsgrenzwerte. Für krebserregende Substanzen gilt gemäss LRV jedoch ein Minimierungsgebot. Um dem verfassungsmässigen Schutzanspruch der Bevölkerung gerecht zu werden, sollte die Russkonzentration in der Aussenluft im

¹⁵ Oudin, A., Segersson, D., Adolfsson, R., Forsberg, B. (2018). Association between air pollution from residential wood burning and dementia incidence in a longitudinal study in Northern Sweden. PLoS ONE 13(6): e0198283. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0198283>

¹⁶ Wey, H., Ruckstuhl, Ch., Bieri, S., Joos, N. (2020). Übersicht über die Immissionsmessungen im Kanton Uri. Kapitel 9: Feinstaub PM2.5 als zusätzlicher Messparameter. inNET Monitoring AG.

¹⁷ Myhre, G., D. Shindell, F.-M. Bréon, W. Collins, J. Fuglestad, J. Huang, D. Koch, J.-F. Lamarque, D. Lee, B. Mendoza, T. Nakajima, A. Robock, G. Stephens, T. Takemura and H. Zhang, 2013: Anthropogenic and Natural Radiative Forcing. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

¹⁸ Szopa, S., Naik, V., Adhikary, B., Artaxo, P., Berntsen, T., Collins, W.D., Fuzzi, S., Gallardo, L., Kiendler-Scharr, A., Klimont, Z., Liao, H., Unger, N., Zanis, P. (2021). Short-lived climate forcers, p. 847. Kapitel 6 in: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the IPCC. Cambridge University Press, pp. 817–922, doi:10.1017/9781009157896.008.

¹⁹ Lohmann, U., Friebel, F., Kanji, Z. A., Mahrt, F., Mensah, A. A., Neubauer, D. (2020) Future warming exacerbated by aged-soot effect on cloud-formation. Nature Geoscience, 13, pp. 674–680, doi:10.1038/s41561-020-0631-0.

Jahresmittel $0.1 \mu\text{g m}^{-3}$ nicht übersteigen. Die Eidgenössische Kommission für Lufthygiene (EKL) fordert weitere Emissionsreduktionen, um das Krebsfallrisiko auf einen akzeptablen Wert zu senken. Dieses Ziel ist bei einem Jahresmittelwert von maximal $0.1 \mu\text{g m}^{-3}$ (Richtwert) erreicht.

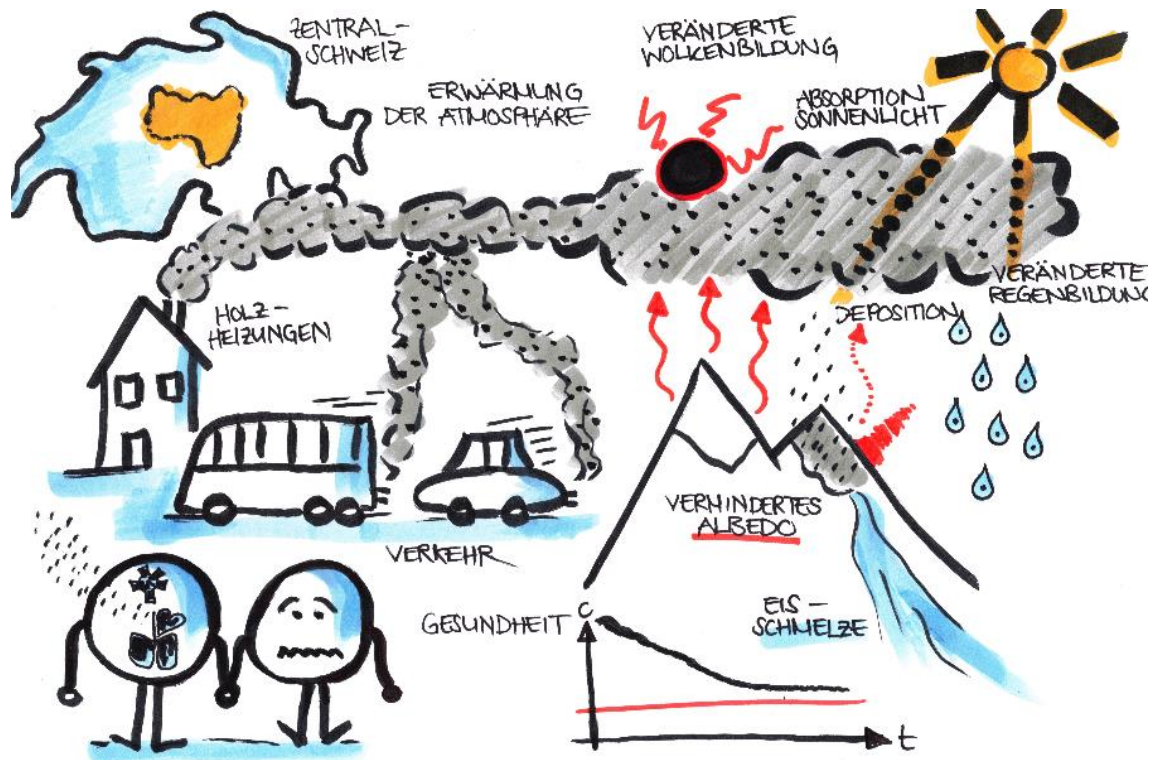


Abbildung 2: Die Russbelastung, welche in der Zentralschweiz vor allem aus Holzheizungen und Verkehr resultiert, hat negative Folgen für die menschliche Gesundheit (Atemwege, Herz-Kreislaufsystem, evtl. Demenz). Gleichzeitig ist Russ ein kurzlebiger Klimaschadstoff, mit diversen negativen Folgen im Klimasystem.

3. Russmessungen in der Zentralschweiz

Im Rahmen verschiedener Projekte wurde in der Zentralschweiz in den letzten Jahren die Russbelastung erhoben (Tabelle 2). Bei fünf inLUFT-Standorten wird ab 2011 die Russbelastung (EBC) gemessen und auf der in-LUFT-Webseite in Echtzeit online veröffentlicht.²⁰ Dazu kommen zwei Stationen des MfM-U-Messnetzes. Bereits Anfang 2017 wurde eine Auswertung dieser Werte (2009 bis 2016) in der Zentralschweiz veröffentlicht:

- Bieri, S., Ruckstuhl, Ch. (2017). Auswertung der Russmessdaten des in-LUFT und des MfM-U-Projekts der Jahre 2009 bis 2016. inNET Monitoring AG.

Seither wurden zusätzlich folgende Daten erhoben:

- weitere 5 Messjahre im inLUFT- und im MfM-U-Messnetz (2017-2021)
- Kurzzeitmessungen in Zug (2017), Sachseln (2019) und Stans (2021)

Aktuelle Luftqualität

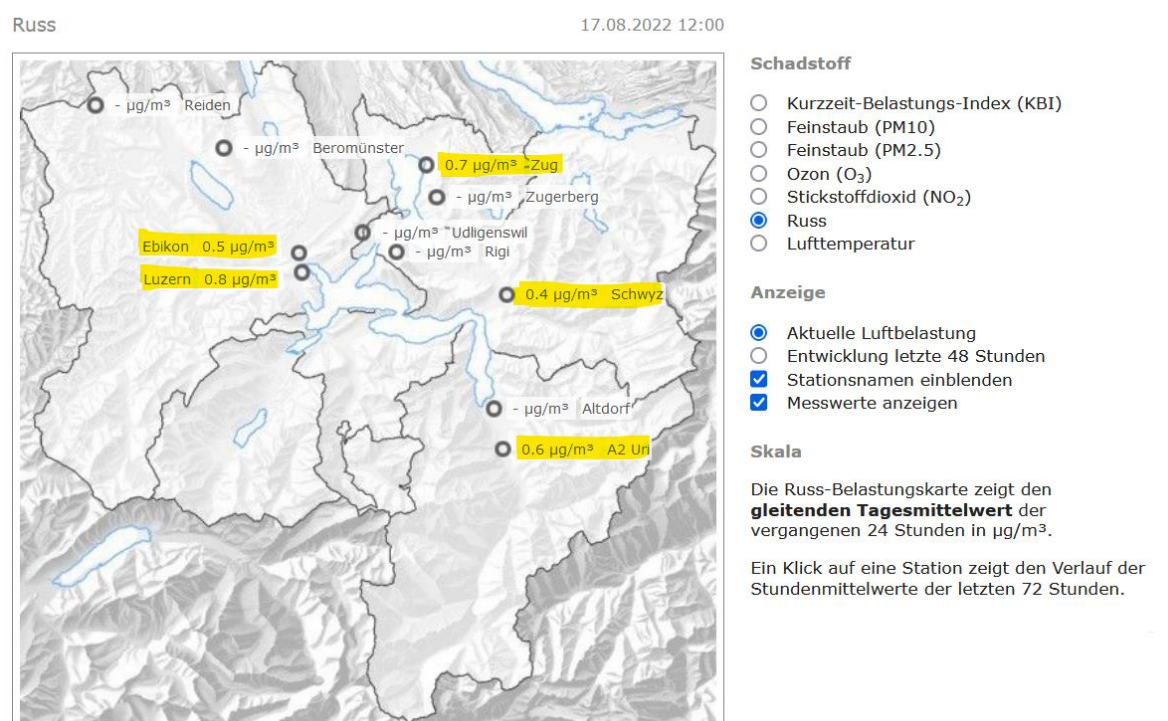


Abbildung 3: Aktuelle Messwerte für Russ des Messprojekts inLUFT. Die Messwerte werden in Echtzeit veröffentlicht.

3.1. Projektmessungen

In der Zentralschweiz gab es neben den Messungen von inLUFT und MfM-U verschiedene Projektmessungen, welche PM10, Russ, und/oder PAK beinhalteten (Tabelle 2, Abbildung 4). Zu diesen Messungen sind mehrere Berichte erschienen:

- Bieri, S., Ruckstuhl, Ch., Imhof, A. (2011). Feinstaubuntersuchungen im **Schächental**; Resultate der Messkampagne Winter 2010/2011. inNET Monitoring AG.
- Bieri, S., Ruckstuhl, Ch., Imhof, A. (2012). Feinstaubuntersuchungen im **Schächental**; Resultate der Messkampagne Winter 2011/2012. inNET Monitoring AG.

²⁰ <https://in-luft.ch>

- Ruckstuhl, Ch., Bieri, S., Joos, N. (2014). Auswertung der Verkehrs- und Immissionsmessdaten im Zentrum von **Altdorf** im Jahr 2013. inNET Monitoring AG.
- Bieri, S., Ruckstuhl, Ch. (2012). Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) im atmosphärischen Feinstaub (PM10); Feinstaubuntersuchung im **Muotatal** (Messkampagne 2011). inNET Monitoring AG.
- Ruckstuhl, Ch., Bieri, S. (2015). Immissionsbelastung Autobahnanschluss **Buchrain**; Russ- und NO₂-Passivsammlermessungen Juni 2014 bis Januar 2015. inNET Monitoring AG.
- Schöpfer, S., Ruckstuhl, Ch. (2018). Einfluss Tempolimit auf die Luftqualität; Resultate und Interpretation der Luft-Immissionsmessungen an der **Grabenstrasse in Zug** im Jahr 2017. inNET Monitoring AG.
- Minder, N., Wey, H., Ruckstuhl, Ch. (2018). Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) im atmosphärischen Feinstaub (PM10); Vergleich der Feinstaubuntersuchungen im **Muotatal** zwischen den Messkampagnen 2009, 2011 und 2018. inNET Monitoring AG.
- Wey, S., Ruckstuhl, Ch., Wey, H. (in prep., 2022). Messbericht **Stans 2021**; Auswertung der Immissionsmessungen in Stans 2021. inNET Monitoring AG.

Zu den Messungen in Sachseln existiert kein eigener Messbericht. Die Daten werden in der Folge grob dargestellt. Die im Zusammenhang mit Russ wichtigsten Resultate dieser Messkampagnen sind in Tabelle 4 zusammengefasst.

Tabelle 2: Überblick der verschiedenen Russ-Messkampagnen in der Zentralschweiz von 2009 bis 2021

		Russbericht 2022													
		Russbericht 2017													
		2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	
Projekt-messungen	Unterschächen														
	Altdorf, Zentrum														
	(Muotathal) ¹														
	Buchrain														
	Zug, Grabenstrasse														
	Sachseln ²														
	Stans ²														
inLUFT	Ebikon, Sedel														
	Zug														
	Luzern Moosstrasse														
	Schwyz														
	Altdorf, Gartenmatt														
MfMU	Reiden	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	A2 Uri (Erstfeld)	2	2	2	2	2	2								

PM10+PAK BC EC EC+BC EC+PAK

¹ keine Russmessungen

² in diesem Bericht nicht gezeigt

³ kritischer Messwert, trotzdem verwendet

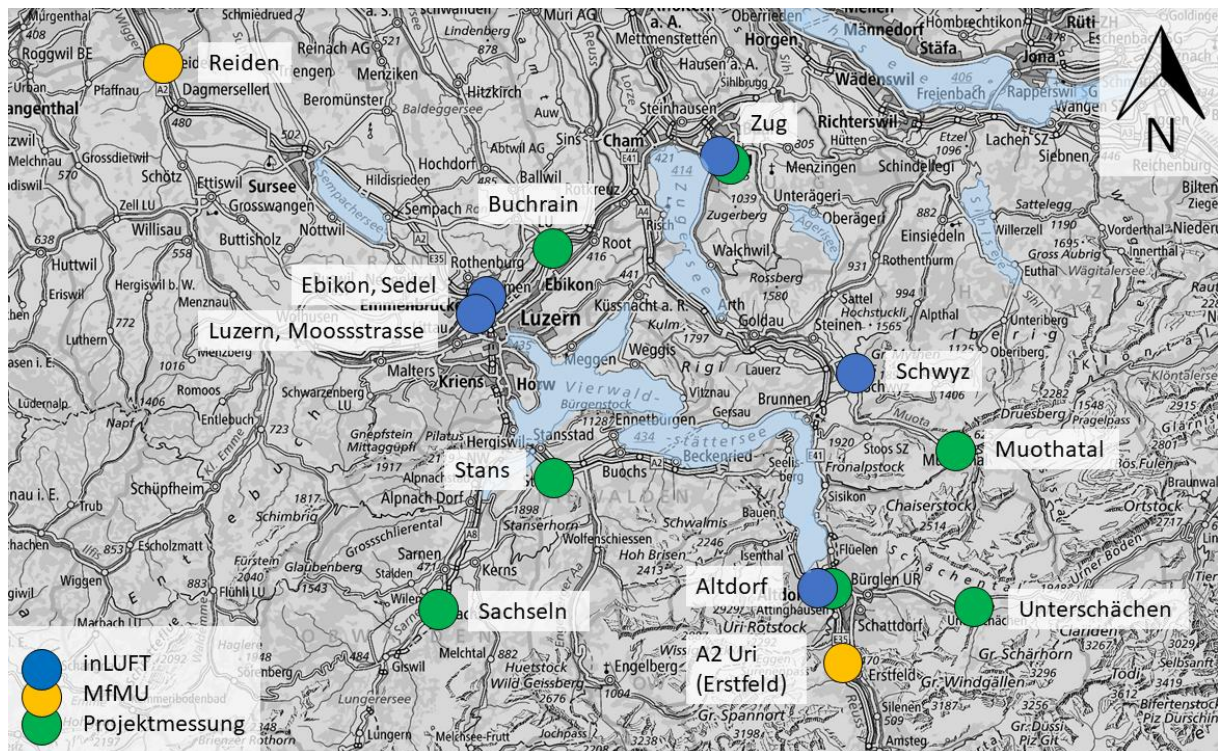


Abbildung 4: Kartenausschnitt der Zentralschweiz mit Messstandorten.

Tabelle 3: Charakterisierung der aktuellen Standorte der Messprogramme «inLUFT» und «MfM-U». Die Standortkategorien sind im Anhang unter Kapitel 8.9 erklärt.

	Standort	Lage	Kategorie
inLUFT	Ebikon, Sedel	nördlich der Stadt Luzern Hügelkuppe ca. 300 m vom Knoten und Anschluss A2 /A14 entfernt	S_B
	Zug, Postplatz	Stadtzentrum vom nahen See beeinflusst	S_T
	Luzern, Moosstrasse	Hauptverkehrsachse Wohn- und Geschäftsquartier	U_T
	Schwyz, Rubiswilstrasse	Nähe Einkaufszentrum offene Bebauung	S_B
	Altdorf, Gartenmatt	östlich der A2 auf freiem Feld	R_B_r
MfM-U	Reiden	direkt an der Autobahn A2 ca. 540 m südlich des Autobahnanschlusses Reiden	R_T
	Erstfeld, A2 Uri	direkt an der Autobahn A2 ca. 500 m nördlich des Autobahnanschlusses Erstfeld	R_T

Tabelle 4: Übersicht über die Messdaten der verschiedenen Russprojekte in der Zentralschweiz.

Projekt	Zeitraum	Messmethode für Russ	Messdaten	Bemerkungen
Unterschächen	01.11.2010 - 31.03.2011	HVS (EC+OC)	PM10 = 13.5 $\mu\text{g m}^{-3}$ Russanteil in PM10 = 5.9 % EC = 0.70 $\mu\text{g m}^{-3}$ EC / OC = 0.16 PAK = 10.7 ng m^{-3}	- Holzfeuerungen als Haupteinfluss
	01.11.2011 - 31.03.2012	HVS (EC+OC)	PM10 = 15.2 $\mu\text{g m}^{-3}$ Russanteil in PM10 = 6.6 % EC = 0.82 $\mu\text{g m}^{-3}$ EC / OC = 0.18 PAK = 14.0 ng m^{-3}	
Altdorf Zentrum	01.12.2012 - 31.12.2013	Aethalometer (BC)	PM10 = 19.4 $\mu\text{g m}^{-3}$ BC = 1.5 $\mu\text{g m}^{-3}$ Russanteil in PM10 = 5.4 %	- Einfluss von Holzfeuerungen im Winter - hoher Verkehrsfluss
Muothatal	01.01.2009 - 31.03.2009	-	PM10 $\approx$ 29 $\mu\text{g m}^{-3}$ PAK = 39.5 ng m^{-3}	- keine Russmessungen - PAK aussergewöhnlich hoch
	01.01.2011 - 31.03.2011	-	PM10 = 30.4 $\mu\text{g m}^{-3}$ PAK = 32.8 ng m^{-3}	
	01.01.2018 - 31.03.2018	-	PM10 = 19.8 $\mu\text{g m}^{-3}$ PAK = 21.8 ng m^{-3}	
Buchrain	26.06.2014 - 08.01.2015	Aethalometer (BC) HVS (EC)	EBC-Konzentration = 1.3 - 2.05 $\mu\text{g m}^{-3}$ EBC _{wb} = 22.5 - 37.9 %	- Verkehr als Haupteinfluss - ausgeprägter Tagesgang mit Konzentrationspitze am Morgen - deutlich tiefere Belastung an Wochenenden (- 41 % am Sonntag versus Montag bis Freitag)
Zug, Postplatz + Grabenstrasse	10.06.2017 - 31.12.2017	Aethalometer (BC) HVS (EC)	PM10 _{Postplatz} = 12.45 $\mu\text{g m}^{-3}$ EBC _{Postplatz} = 0.60 $\mu\text{g m}^{-3}$ Russanteil in PM10 = 4.8 % PM10 _{Grabenstrasse} = 12.18 $\mu\text{g m}^{-3}$ EBC _{Grabenstrasse} = 0.70 $\mu\text{g m}^{-3}$ Russanteil in PM10 = 5.7 %	- Verkehr als Haupteinfluss - höhere EBC-Werte an Grabenstrasse (verkehrsnahe) als an Postplatz
Sachseln ²¹	01.09.2019 - 31.03.2020	Aethalometer (BC) HVS (EC)	EBC = 0.62 $\mu\text{g m}^{-3}$	- evtl. Einfluss der Holzschnitzelheizung beim Schulhaus
Stans	01.01.2021 - 31.12.2021	Aethalometer (BC) HVS (EC)	EBC = 0.43 $\mu\text{g m}^{-3}$ PM10 = 13.2 $\mu\text{g m}^{-3}$	-

²¹ Luzerner Zeitung (2018). Holzschnitzel sorgen in Sachseln für dicke Luft. Romano Cuonz. <https://www.luzernerzeitung.ch/zentralschweiz/obwalden/holzschnitzel-sorgen-fur-dicke-luft-ld.1023877>. Letzter Besuch: 29.08.2022.

4. Methodik

4.1. Verwendete Datenbanken und Software

Die in diesem Bericht verwendeten Jahres-, Tages- und Stundendaten für Windstärke, Windrichtung, Russ (EBC), PM10, NO₂ wurden den Datenbanken MONA (Messstationen «Reiden» und «Erstfeld, A2 Uri») sowie AIRMO (alle anderen Messstationen) entnommen. Dabei wurden ungültige Datenwerte ausgeschlossen. Mit «kritisch» versehene Datenwerte wurden hier verwendet, sind aber im Anhang als solche gekennzeichnet.

Die Daten wurden als .csv zwischengespeichert und mit RStudio (Version 2021.09.2) weiterverarbeitet und abgebildet. Die dazu verwendeten Pakete waren «RColorBrewer» (Farbcodierungen), «lubridate» (zeitliche Aggregationen), «dplyr», «plyr» (Datenmanipulation), «tidyverse» (Datenspeicherung als Tibble) sowie «openair» zur Berechnung und Darstellung von Wind- und Schadstoffrosen.

4.2. Normalisierte Werte im Wochengang

Für die Darstellung der Wochengänge wurden Stundenmittelwerte verwendet. Für die Normalisierung von PM10- und EBC-Daten wurde ein Einzelwert durch den aus den Stundendaten ermittelte Jahresmittelwert dividiert. Dies ermöglicht einen Amplitudenvergleich der beiden Parameter.

4.3. Saisonale Aggregationen

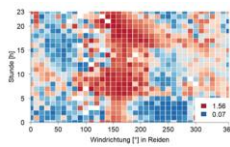
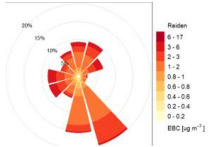
Grundlage der Berechnungen sind Tages- (jährliche und monatliche Darstellungen) oder Stundendaten (Tagesgänge). «S» steht für Sommer (April bis September), «W» für Winter (Januar bis März und Oktober bis Dezember) und «W/S» für das Zahlenverhältnis zwischen Winter und Sommer.

4.4. Windrichtungsanalysen

Für alle Windrichtungsanalysen (Tabelle 5) wurden Stundendaten verwendet. Zusätzlich zu der ganzjährigen Windrichtungs- und Tagesganganalyse wurden Analysen für den Sommer (Juni, Juli, August) und Winter (Januar, Februar, Dezember) erstellt.

Die Belastungsrose zeigt, ähnlich wie die Windrose, die relevanten Windrichtungen und Anzahl Messungen. Anstatt der Windgeschwindigkeit ist allerdings die Konzentration des Schadstoffs, hier Russ, eingezeichnet. Im Gegensatz dazu zeigt die in diesem Bericht verwendete Kombination von Windrichtungs- und Tagesganganalyse keine Anzahl Messungen, dafür aber die zeitliche Variation der Russkonzentration.

Tabelle 5: Unterschiede zwischen Windrosen und der kombinierten Windrichtungs- und Tagesganganalyse.

	Windrichtungs- und Tagesganganalyse	Belastungsrose
		
Windrichtung	X	X
Konzentrationsniveau	X	X
Anzahl Messungen	–	X
zeitliche Variation	X	–

4.5. Aethalometer-Quellenmodell

Mit der Messung der Russbelastung mit Mehrwellenlängen-Aethalometern ist es möglich, den Anteil von Russ aus fossilen und aus nicht-fossilen Quellen abzuschätzen. Das für die Berechnungen notwendige Aethalometer-Quellenmodell, welches in der wissenschaftlichen Literatur mehrfach beschrieben wurde, geht von zwei Annahmen aus. Erstens, dass während der Wintermonate die Verkehrs- (FF = «fossil fuel») und Holzfeuerungsmissionen (WB = «wood burning») die Hauptquellen von Russ darstellen. Zweitens, dass die gesamte Russmasse anhand der unterschiedlichen Lichtabsorption der Partikel aus diesen beiden Quellen modelliert werden kann.^{22,23} Denn PAK und andere organische Verbindungen absorbieren verstärkt Licht im ultravioletten Bereich ($\lambda = 100\text{--}380\text{ nm}$). Schwarzer, graphitähnlicher Kohlenstoff absorbiert vor allem im nahen Infrarot-Bereich ($\lambda = 780\text{--}1000\text{ nm}$, Abbildung 5a). Anhand dieser zweiten Annahme zur Lichtabsorption kann der Absorptionskoeffizient « b_{abs} » in « $b_{\text{abs,FF}}$ » und « $b_{\text{abs,WB}}$ » aufgeteilt werden:

$$(1) b_{\text{abs}}(\lambda) = b_{\text{abs,WB}}(\lambda) + b_{\text{abs,FF}}(\lambda)$$

Bei allen in diesem Bericht folgenden Auswertung wurde für $\lambda_1 = 470\text{ nm}$ (UV) und für $\lambda_2 = 880\text{ nm}$ (IR) verwendet.^{24,25} Als Datenbasis wurden gemessene Tagesmittelwerte verwendet, welche am Ende monatlich aggregiert wurden.

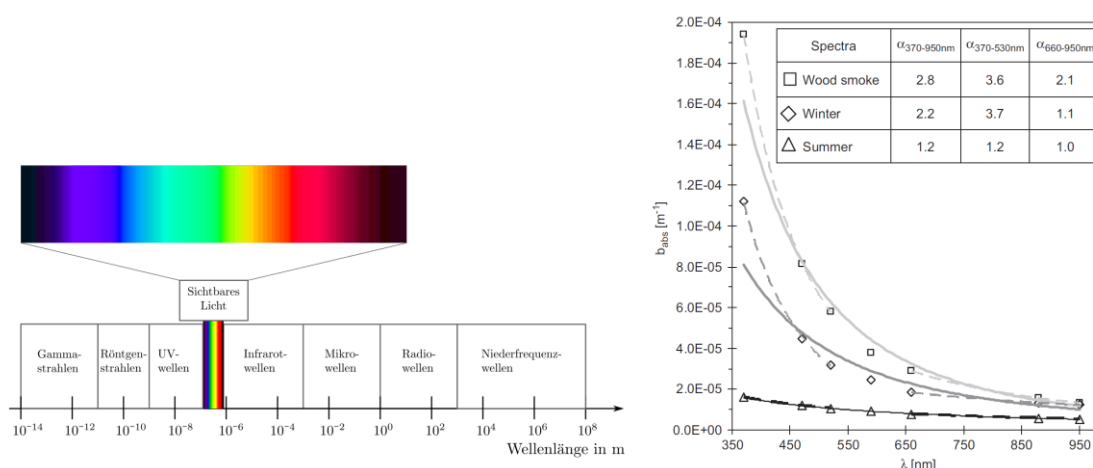


Abbildung 5: (a) Wellenlängen des Lichts mit dem ultravioletten Bereich ($\lambda = 100\text{--}380\text{ nm}$) und Infrarot ($\lambda = 780\text{--}1000\text{ nm}$), welche die physikalische Grundlage für das Aethalometer-Quellenmodell sind.²⁶ (b) Messungen eines Holzfeuers im Labor sowie Winter- und Sommerkampagnen in Roveredo zeigen, dass der Absorptionskoeffizient (« b_{abs} ») proportional zu « $\lambda^{-\alpha}$ » ist, wobei « λ » die Wellenlänge und « α » der Absorptionsexponent ist. Russ aus Verkehrsemissionen zeigen also eine schwache Wellenlängenabhängigkeit und somit ein tieferes « α » als Holzfeuerungspartikel.

Der Absorptionskoeffizient (« b_{abs} » in $[\text{m}^{-1}]$), welcher vom Aethalometer direkt gemessen wird, ist proportional zu « $\lambda^{-\alpha}$ », wobei « λ » die Wellenlänge und « α » den Absorptionsexponenten (bzw. Angstrom-Exponenten) bezeichnen. Verkehrsemissionen zeigen eine schwache Wellenlängenabhängigkeit und somit ein

²² Sandradewi et al. (2008). Using aerosol light absorption measurements for the quantitative determination of wood burning and traffic emission contributions to particulate matter. *Environmental Science & Technology*, 42.

²³ Sandradewi et al. (2008). A study of wood burning and traffic aerosols in an Alpine valley using a multi-wavelength Aethalometer. *Atmospheric Environment*, 42.

²⁴ Diese Wellenlängen entsprechen den Kanälen «BC2» und «BC6».

²⁵ Herich et al. (2011). A 2.5 year's source apportionment study of black carbon from wood burning and fossil fuel combustion at urban and rural sites in Switzerland. *Atmospheric Measurement Technology*, 4.

²⁶ Bildquelle: <https://www.grund-wissen.de/physik/images/spektrum-licht-elektromagnetische-wellen.png>

« α » zwischen 0.8 und 1.1. Holzfeuerungspartikel zeigen hingegen starke Wellenlängenabhängigkeit und entsprechend höhere « α » (Abbildung 5b).

Der Absorptionskoeffizient $b_{\text{abs}}(\lambda)$ [m^{-1}] berechnet sich aus der an der spezifischen Wellenlänge gemessenen BC-Konzentration [g m^{-3}] multipliziert mit dem Aerosol-Licht absorbierenden Querschnitt. Dieser hängt ebenfalls von der Wellenlänge ab und wird als Sigma ($6_{\text{abs}}(\lambda)$) in [$\text{m}^2 \text{g}^{-1}$] bezeichnet. Für diesen Berechnungsschritt wurden die Sigma-Werte $6_{\text{abs}}(470 \text{ nm}) = 23.5$ und $6_{\text{abs}}(880 \text{ nm}) = 12.5$ gewählt.²⁷

$$(2a) \ b_{\text{abs}}(\lambda_1) = \text{BC}(\lambda_1) * 6_{\text{abs}}(\lambda_1)$$

$$(2b) \ b_{\text{abs}}(\lambda_2) = \text{BC}(\lambda_2) * 6_{\text{abs}}(\lambda_2)$$

Das Lambert-Beer'sche Gesetz beschreibt die Abschwächung der Intensität einer Strahlung beim Durchgang durch ein Medium mit einer absorbierenden Substanz in Abhängigkeit des Absorptionskoeffizienten « b_{abs} » und der Dicke. Mithilfe dieses Gesetzes können zwei Gleichungen ausgearbeitet werden, welche den Absorptionskoeffizienten « b_{abs} », die Wellenlänge « λ » und den Absorptionsexponenten « α » für die Verkehrs- und Holzfeuerungsemissionen beschreiben.

$$(3a) \ r_{\text{FF}} = \frac{b_{\text{abs,FF}}(\lambda_1)}{b_{\text{abs,FF}}(\lambda_2)} = \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2}\right)^{-\alpha_{\text{FF}}} = \left(\frac{\lambda_{\text{UV}}}{\lambda_{\text{IR}}}\right)^{-\alpha_{\text{FF}}} = \left(\frac{470}{880}\right)^{-\alpha_{\text{FF}}}$$

$$b_{\text{abs,FF}}(\lambda_1) = b_{\text{abs,FF}}(\lambda_2) * \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2}\right)^{-\alpha_{\text{FF}}}$$

$$(3b) \ r_{\text{WB}} = \frac{b_{\text{abs,WB}}(\lambda_1)}{b_{\text{abs,WB}}(\lambda_2)} = \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2}\right)^{-\alpha_{\text{WB}}} = \left(\frac{\lambda_{\text{UV}}}{\lambda_{\text{IR}}}\right)^{-\alpha_{\text{WB}}} = \left(\frac{470}{880}\right)^{-\alpha_{\text{WB}}}$$

$$b_{\text{abs,WB}}(\lambda_1) = b_{\text{abs,WB}}(\lambda_2) * \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2}\right)^{-\alpha_{\text{WB}}}$$

In Gleichung (1) eingesetzt ergibt dies:

$$(1)' \ b_{\text{abs}}(\lambda_1) = b_{\text{abs,WB}}(\lambda_1) + b_{\text{abs,FF}}(\lambda_1)$$

$$(4) \ b_{\text{abs}}(\lambda) = b_{\text{abs,WB}}(\lambda_2) * \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2}\right)^{-\alpha_{\text{WB}}} + b_{\text{abs,FF}}(\lambda_2) * \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2}\right)^{-\alpha_{\text{FF}}}$$

Mit den Definitionen aus den Gleichungen (3a) und (3b) kann der Quotient mit Exponent ersetzt werden:

$$(4)' \ b_{\text{abs}}(\lambda) = b_{\text{abs,WB}}(\lambda_2) * r_{\text{WB}} + b_{\text{abs,FF}}(\lambda_2) * r_{\text{FF}}$$

In einem zweiten Schritt kann die Gleichung (1) auch für λ_2 umgestellt und in Gleichung (4)' eingesetzt werden. Am Ende wird die Gleichung nach $b_{\text{abs,WB}}(\lambda_2)$ aufgelöst. Analog kann die Berechnung auf für $b_{\text{abs,FF}}(\lambda_2)$ gemacht werden:

$$(1)'' \ b_{\text{abs}}(\lambda_2) = b_{\text{abs,WB}}(\lambda_2) + b_{\text{abs,FF}}(\lambda_2)$$

$$b_{\text{abs,FF}}(\lambda_2) = b_{\text{abs}}(\lambda_2) - b_{\text{abs,WB}}(\lambda_2)$$

$$(4)'' \ b_{\text{abs}}(\lambda_1) = b_{\text{abs,WB}}(\lambda_2) * r_{\text{WB}} + [b_{\text{abs}}(\lambda_2) - b_{\text{abs,WB}}(\lambda_2)] * r_{\text{FF}}$$

$$b_{\text{abs}}(\lambda_1) = [b_{\text{abs,WB}}(\lambda_2) * r_{\text{WB}}] + [b_{\text{abs}}(\lambda_2) * r_{\text{FF}}] - [b_{\text{abs,WB}}(\lambda_2) * r_{\text{FF}}]$$

$$b_{\text{abs}}(\lambda_1) = [b_{\text{abs,WB}}(\lambda_2) * r_{\text{WB}}] - [b_{\text{abs,WB}}(\lambda_2) * r_{\text{FF}}] + [b_{\text{abs}}(\lambda_2) * r_{\text{FF}}]$$

$$b_{\text{abs}}(\lambda_1) = b_{\text{abs,WB}}(\lambda_2) * [r_{\text{WB}} - r_{\text{FF}}] + [b_{\text{abs}}(\lambda_2) * r_{\text{FF}}]$$

$$b_{\text{abs}}(\lambda_1) - [b_{\text{abs}}(\lambda_2) * r_{\text{FF}}] = b_{\text{abs,WB}}(\lambda_2) * [r_{\text{WB}} - r_{\text{FF}}]$$

$$(5a) \ b_{\text{abs,WB}}(\lambda_2) = \frac{b_{\text{abs}}(\lambda_1) - b_{\text{abs}}(\lambda_2) * r_{\text{FF}}}{r_{\text{WB}} - r_{\text{FF}}}$$

²⁷ Herich, H., Hueglin, Ch., Buchmann, B. (2011). A 2.5 year's source apportionment study of black carbon from wood burning and fossil fuel combustion at urban and rural sites in Switzerland. Atmospheric Measurement Technology, 4, pp. 1409-1420, doi: 0.5194/amt-4-1409-2011.

$$(5b) \ b_{\text{abs,FF}}(\lambda_2) = \frac{b_{\text{abs}}(\lambda_1) - b_{\text{abs}}(\lambda_2) * r_{\text{WW}}}{r_{\text{FF}} - r_{\text{WB}}}$$

Die Absorptionsexponenten können durch Werte aus der wissenschaftlichen Literatur abgeschätzt werden.^{28,29} In dem hier vorliegenden Bericht wurden $\alpha_{\text{FF}} = 0.9$ und $\alpha_{\text{WB}} = 1.9$ verwendet.^{28, 29, 30}

Für die Korrektur der BC-Werte (Kapitel 2.2 und analog zu Gleichung 2) wurde in diesem Schritt die lokale Steigung der linearen Regression des täglichen Mittelwerts von $b_{\text{abs}}(\lambda)$ gegen die EC-Konzentration verwendet, welche Sigma genannt wird (Abbildung 6a):

$$(6a) \ EBC_{\text{FF}} = \frac{b_{\text{abs,FF}}(\lambda_2)}{6_{\text{abs}}(\lambda_2)} = \frac{b_{\text{abs,FF}}(880 \text{ nm})}{6_{\text{abs}}(880 \text{ nm})}$$

$$(6b) \ EBC_{\text{WB}} = \frac{b_{\text{abs,WB}}(\lambda_2)}{6_{\text{abs}}(\lambda_2)} = \frac{b_{\text{abs,WB}}(470 \text{ nm})}{6_{\text{abs}}(470 \text{ nm})}$$

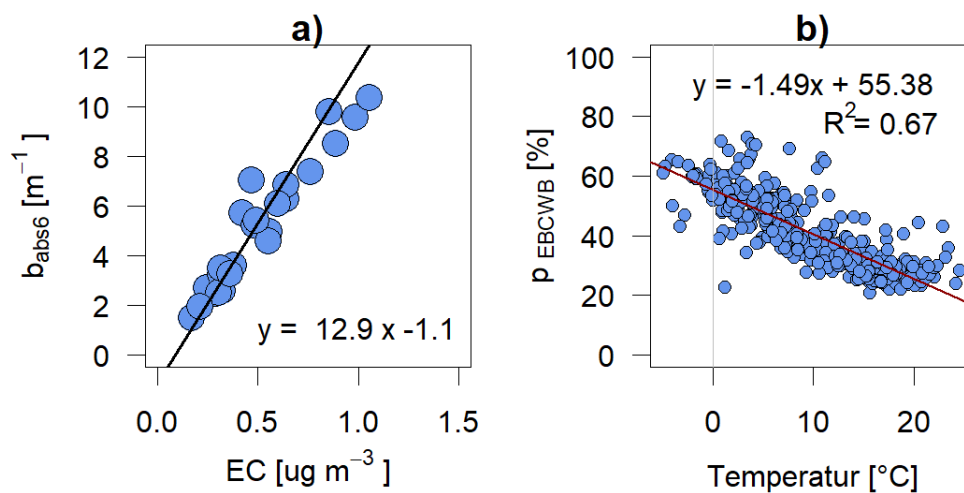


Abbildung 6: Die hier gezeigten Daten stammen aus dem Jahr 2021 in «Altdorf, Gartenmatt». a) Für die Korrektur der BC-Werte im Zusammenhang mit dem Quellenmodell wurde die Steigung (Sigma) der linearen Regression zwischen den Tageswerten der EC-Messung und dem b_{abs} (hier für λ_2 bzw. Infrarot-Bereich) benutzt. b) Die gefundenen Werte für $p_{\text{EBC,WB}}$ wurden mit den entsprechenden Tagesmitteltemperaturen der jeweiligen Messstation verglichen. Die Steigung ist in allen Fällen negativ und kann als Qualitätskontrolle und als Mass für den Einfluss der Holzheizungen betrachtet werden.

Am Ende kann der EBC-Wert aus der Summe von EBC_{WB} und EBC_{FF} berechnet werden, sowie der Anteil von WB und FF an den Totalwerten:

$$(7) \ EBC_{\text{tot}} = EBC_{\text{WB}} + EBC_{\text{FF}}$$

$$(8) \ p_{\text{EBC,WB}} = \frac{EBC_{\text{WB}}}{EBC_{\text{tot}}} * 100$$

²⁸ Herich et al. (2013). Russbelastung in der Schweiz. Messungen im Rahmen des NABEL, Schlussbericht 2012, EMPA.

²⁹ Sandradewi et al. (2008). Using aerosol light absorption measurements for the quantitative determination of wood burning and traffic emission contributions to particulate matter. Environmental Science & Technology, 42.

³⁰ Ruckstuhl, Ch., Bieri, S. (2015). Immissionsbelastung Autobahnanschluss Buchrain: Russ- und NO_2 -Passivsammlermessungen Juni 2014 bis Januar 2015. inNET Monitoring AG.

Die gefundenen Tageswerte für $p_{\text{EBC, WB}}$ wurden mit den Tagesmitteltemperaturen der jeweiligen Messstation verglichen (Abbildung 6b). Die gefundene Steigung der linearen Regression kann als Qualitätskontrolle und Mass für den Einfluss der Holzheizungen betrachtet werden.

4.6. Berechnung von Russemissionen aus dem Strassenverkehr

In diesem Bericht wurden die schweizweiten lokalen Russemissionen aus dem Strassenverkehr für die Jahre 2030, 2040 und 2050 berechnet (Kapitel 6). Weitere Emissionen im Lebenszyklus eines Fahrzeuges, wie die Herstellung von Strom, wurden nicht betrachtet. Folgende Datensätze und Annahmen liegen diesen Berechnungen zu Grunde:

Szenarien

Der Bund beschreibt die zukünftige Flottenzusammensetzung in insgesamt fünf Szenarien: Die Variante ZERO mit den Untervarianten Basis, A, B und C sowie das Szenario «weiter wie bisher» (WWB). In diesem Bericht wurden nur die Emissionen für die Szenarien «ZERO-Basis» und «WWB» berechnet.³¹

Im Szenario «Weiter wie bisher» (WWB) gelten alle bis Ende 2018 in Kraft gesetzten Massnahmen und Instrumente der Energie- und Klimapolitik. Es gibt in diesem Szenario also keine zusätzlichen oder strengeren Massnahmen. Die Entwicklung der Technologien (Effizienz, Anlagen, Installationen, Fahrzeuge, Geräte, etc.) und ihre Nutzung folgt dem autonomen technischen Fortschritt und den per Ende 2018 bestehenden gesetzlichen Grundlagen. Alle vier ZERO-Varianten erreichen das Netto-Null-Ziel bis 2050. Bei der Basisvariante wird die Energieeffizienz rasch und umfassend gesteigert. Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren werden durch Elektrofahrzeuge ersetzt.

Zusammensetzung der Verkehrsflotte auf der Strasse

Der Bericht des Bundesamtes für Energie zu den Energieperspektiven enthält eine Schätzung zu zukünftigen Flottenzusammensetzungen, unter anderem für Personenwagen, LNF (leichte Nutzfahrzeuge) und SNF (schwere Nutzfahrzeuge, Abbildung 7a).³² Die anderen Verkehrsmittel wurden für die in diesem Bericht gemachten Berechnungen wegen ihres vergleichsweise geringen Volumens vernachlässigt.

Emissionsfaktoren

Die Emissionsfaktoren für Russ (BC) stammen aus dem Handbuch für Emissionsfaktoren (HBEFA4.1). Es wurden sowohl Werte für «exhaust» (eigentliche Abgase aus dem Brennstoff) als auch «non-exhaust» (Verschleiss von Bremsen, Pneubetrieb, Strassenabrieb)³³ verwendet.

Fahrzeugkilometer

Die Fahrzeugkilometer pro Jahr bestimmen wesentlich den Energiebedarf des Verkehrssektors. Die Fahrleistungen auf der Strasse werden gemäss BFE-Bericht zukünftig wachsen, jedoch weniger dynamisch als in der jüngsten Vergangenheit. Mittelfristig stellt sich eine gewisse Stabilisierung ein. Die Personenwagen verursachen den grössten Verkehrsanteil (Abbildung 7b).

³¹ Bundesamt für Energie (2020). Energieperspektiven 2050+. Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse. Ittigen.

³² Bundesamt für Energie (2020). EP2050+. Technischer Bericht, Daten zu den Grafiken des technischen Berichts, Kapitel 1-7. Abbildungen 19-24. <https://www.bfe.admin.ch/bfe/de/home/politik/energieperspektiven-2050-plus.html>. Letzter Zugriff: 01.09.2022.

³³ Notter, B., Keller, M., Althaus, H.-J., Cox, B., Knörr, W., Heidt, Ch., Biemann, K., Räder, D., Jamet, M. (). HBEFA 4.1 Development Report. https://www.hbefa.net/e/documents/HBEFA41_Development_Report.pdf. Seite 51. INFRAS & BAFU.

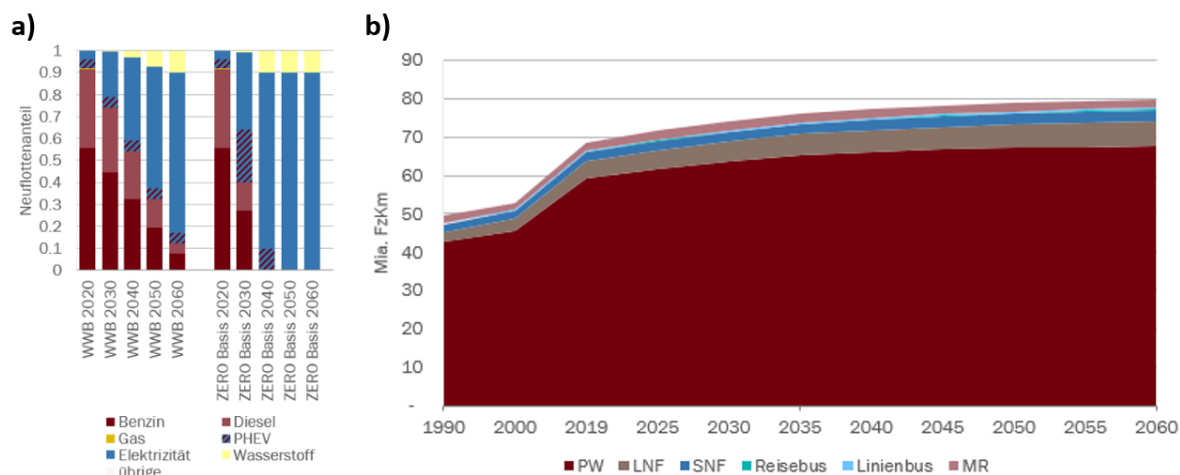


Abbildung 7: Im vorliegenden Bericht verwendete Datensätze aus dem technischen Bericht zu Energieperspektiven in der Schweiz. a) Flottenzusammensetzung bis 2015 für PWs und für die beiden in diesem Bericht verwendeten Szenarien «WWB» und «ZERO-Basis». b) Entwicklung der Flottenzusammensetzung.³⁴

³⁴ Bundesamt für Energie (2020). EP2050+. Technischer Bericht, Daten zu den Grafiken des technischen Berichts, Kapitel 1-7. Abbildung 7. <https://www.bfe.admin.ch/bfe/de/home/politik/energieperspektiven-2050-plus.html>. Letzter Zugriff: 01.09.2022.

5. Resultate und Diskussion

5.1. Jahresmittelwerte für EBC, NO₂ und PM₁₀ und Standortvergleich

Bei der mehrjährigen Russbelastung ist seit den ersten Zentralschweizer Messungen im Jahre 2011 eine rückläufige Tendenz erkennbar (Abbildung 8). Dies stimmt mit Beobachtungen auf der gesamten Nordhalbkugel und auch weiteren Schweizer Standorten überein.^{35,36} In der Zentralschweiz wird dieser negative Trend allerdings seit ca. 2016 schwächer oder die Konzentrationen stagnieren sogar.

Die EBC-Werte bei der Messstation «Luzern, Moosstrasse» sind in der Zentralschweiz sowohl in den warmen als auch in den kalten Monaten generell die höchsten, dicht gefolgt von denjenigen in «Erstfeld, A2 Uri» und, für das Jahr 2021, auch «Reiden» (Tabelle 6). In «Ebikon, Sedel» sind die Werte am tiefsten, wobei aber auch diese Hintergrundbelastung in allen Monaten über dem Richtwert bleibt (Abbildung 11). Diese Belastung bleibt über die Jahre konstant (Tabelle 6). Die jährliche Russbelastung, welche im Jahre 2021 im Bereich zwischen 0.45 und 0.65 µg m⁻³ liegt, übersteigt damit das von der EKL geforderten Jahresmittel von 0.1 µg m⁻³ noch immer um ein Vielfaches (Abbildung 8). Diese Werte liegen im Bereich von Dorfzentren und Hintergrundbelastungen von Städten, beispielsweise in der Ostschweiz.⁸

Die NO₂- und PM₁₀-Belastung, gemessen ab 2009, ist ebenfalls an allen Standorten rückläufig (Abbildung 9 und Abbildung 10). Seit 2017 liegen die NO₂-Messwerte unter dem LRV-Grenzwert von 30 µg m⁻³. Das selbe gilt für PM₁₀, dessen LRV-Grenzwert von 20 µg m⁻³ seit 2016 eingehalten wird. Die einzige Ausnahme für beide Messparameter ist der innerstädtische und verkehrsnahe Standort «Luzern, Moosstrasse». Dort liegt der Wert von PM₁₀ erst seit 2017 unter dem bzw. von NO₂ seit 2020 im Bereich des LRV-Grenzwerts. Diese Beobachtung korrespondiert mit den Russwerten, welche ebenfalls an dieser Station am höchsten sind.

Mit den NO₂-Konzentrationen können die Messstandorte, neben «Luzern, Moosstrasse», in zwei weitere Gruppen eingeteilt werden (Abbildung 9): Der Einfluss des nahen Verkehrs auf Hauptverkehrsachsen zeigt sich an den Standorten «Zug», «Reiden» und «Erstfeld, A2 Uri» mit relativ mittleren Messwerten, im Gegensatz zu «Altdorf», «Schwyz» und «Ebikon, Sedel» mit den tiefsten NO₂-Messwerten. Dieses Muster stimmt zwar überein mit der Hauptemissionsquelle («T» für Verkehr und «B» für Hintergrundbelastung, siehe Tabelle 3 und Kapitel 0 im Anhang), ist aber in den PM₁₀- und Russmessungen nur beschränkt sichtbar, was mit einem grossen Einfluss der überregionalen Feinstaubbelastung erklärt werden kann.

Stellt man die drei Parameter EBC, NO₂ und PM₁₀ und die entsprechenden Grenz- bzw. Richtwerte einander gegenüber, wird aus den Jahresmittelwerten klar ersichtlich, dass bei Russ der dringendste Handlungsbedarf besteht.

³⁵ Szopa, S., Naik, V., Adhikary, B., Artaxo, P., Bernsten, T., Collins, W.D., Fuzzi, S., Gallardo, L., Kiendler-Scharr, A., Klimont, Z., Liao, H., Unger, N., Zanis, P. (2021). Short-lived climate forcers, p. 819. Kapitel 6 in: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the IPCC. Cambridge University Press, pp. 817–922, doi:10.1017/9781009157896.008.

³⁶ Herich, H., Schlatter, S. (2017). Kontinuierliche Kurzzeitmessungen von Russ in Feinstaub. Einsatz von MAAP-Geräten im OSTLUFT-Gebiet. OSTLUFT.

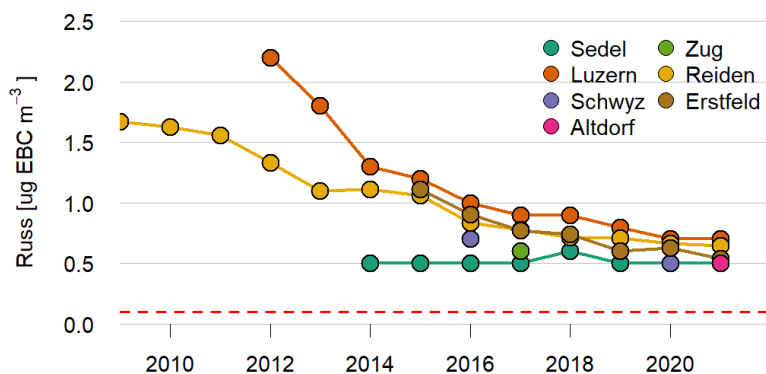


Abbildung 8: Russkonzentrationen ab 2011 an den inLUFT und MfM-U-Stationen. Alle Stationen zeigen EBC-Werte, ausser Reiden (EC-Werte). Die rote Linie zeigt den EKL-Richtwert für das Jahresmittel.

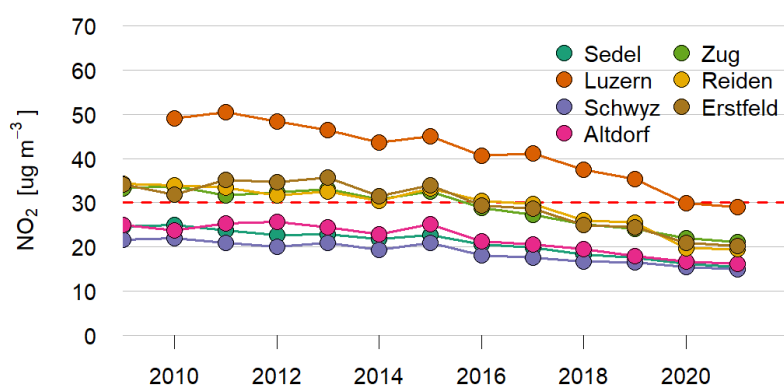


Abbildung 9: NO₂-Konzentrationen zwischen 2009 und 2021 an den inLUFT und MfM-U-Stationen. Die rote Linie zeigt den Jahresmittel-Grenzwert gemäss Luftreinhalte-Verordnung.

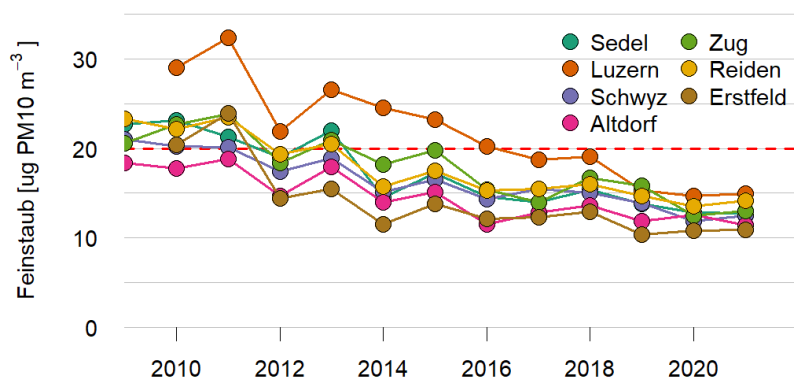


Abbildung 10: PM10-Konzentrationen zwischen 2009 und 2021 an den inLUFT und MfM-U-Stationen. Die rote Linie zeigt den Jahresmittel-Grenzwert gemäss Luftreinhalte-Verordnung. Die Messwerte in Reiden wurden ab 2012 nur gravimetrisch ermittelt.

5.2. Saisonalität der Russkonzentration im Jahr 2021

Der Jahresgang der Russwerte ist an allen Messstandorten ausgeprägt, was mit Beobachtungen in anderen Messgebieten übereinstimmt.³⁷ Generell sind die Werte im Herbst und Winter deutlich höher als in den wärmeren Monaten (Abbildung 11 sowie Abbildung 27 und Abbildung 28 für die Jahre 2016 und 2017 im Anhang).

Die Einflussfaktoren für die Russbelastung sind (emissionsseitig) der Verkehr und Holzheizungen sowie (immissionsseitig) die Stärke von Inversionslagen.³⁸ Der Einfluss der Holzheizungen kann mit dem Quotienten der Winter- und Sommer-Russbelastung beschrieben werden (Tabelle 5). Je höher diese Zahl, desto höher der Einfluss von Holzheizungen, welche nur in den kalten Monaten betrieben werden, währenddem eine konstante Verkehrsbelastung angenommen wird. Den höchsten Quotienten findet man an den Standorten «Ebikon, Sedel» und «Stans». An beiden Standorten ist die absolute Russbelastung im Vergleich zu den anderen Messstationen eher tief (Tabelle 6).³⁹

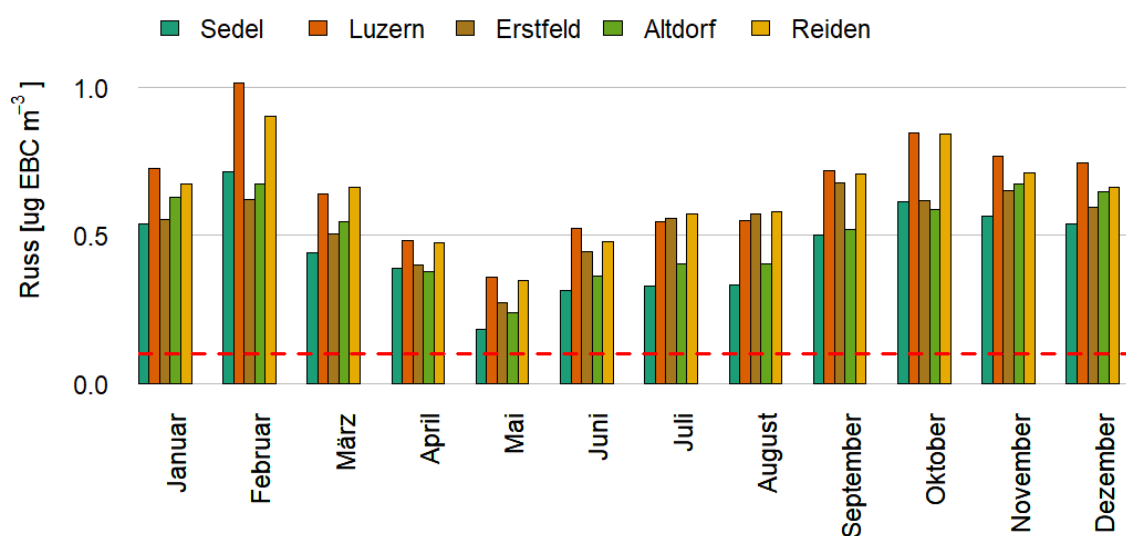


Abbildung 11: Monatsmittelwerte für das Jahr 2021 an fünf Messstationen. Die rote Linie markiert den jährlichen Richtwert.

³⁷ Herich, H., Schlatter, S. (2017). Kontinuierliche Kurzzeitmessungen von Russ in Feinstaub. Einsatz von MAAP-Geräten im OSTLUFT-Gebiet. OSTLUFT.

³⁸ AfU Uri (2018). Inversionswetterlagen und ihr Einfluss auf Luftschadstoffe im Kanton Uri. <https://www.ur.ch/publikationen/14206>

³⁹ sowie Abbildung 34 bis Abbildung 39 im Anhang

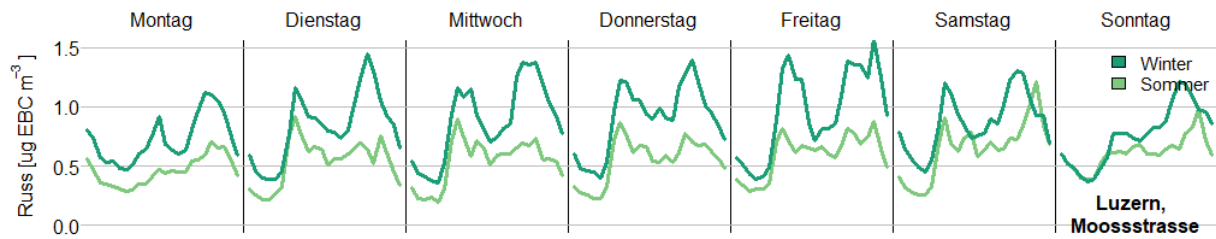


Abbildung 12: Russbelastung in «Erstfeld, A2 Uri» im Wochen- und Tagesgang für die Sommer- und Wintermonate (Juni, Juli, August versus Januar, Februar, Dezember) des Jahres 2021.

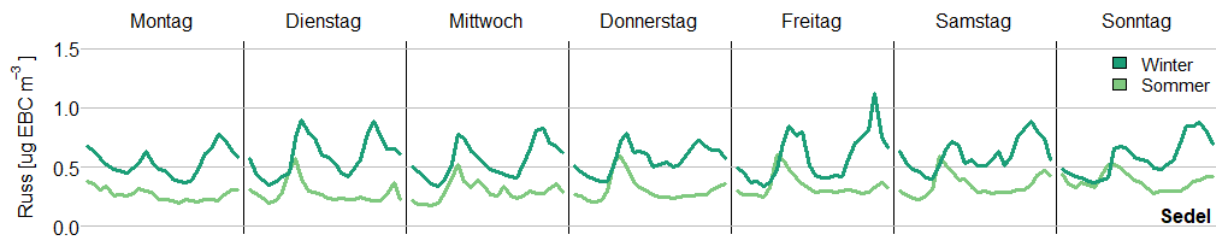


Abbildung 13: Russbelastung in «Ebikon, Sedel» im Wochen- und Tagesgang für die Sommer- und Wintermonate (Juni, Juli und August versus Januar, Februar und Dezember) des Jahres 2021.

5.3. Tages- und Wochengang der PM10- und EBC-Konzentrationen

Die EBC-Konzentrationen zeigen, über das ganze Jahr 2021 gemittelt, an den Messstationen «Altdorf, Gartenmatt», «Erstfeld, A2 Uri», «Luzern, Moosstrasse», «Ebikon, Sedel» und «Stans» jeden Tag sowohl am Morgen als auch am Abend einen Peak zu den Hauptverkehrszeiten (Abbildung 14 und Abbildung 15 sowie Abbildung 29 bis Abbildung 33 im Anhang).⁴⁰ Auch die normalisierten PM10-Konzentrationen schwanken im Tagesverlauf. Die Peaks sind aber, vor allem am Wochenende, stark abgeschwächt oder gar nicht sichtbar. Auch ist die Amplitude geringer als diejenige der Russkonzentrationen, bzw. schwanken weniger um den Mittelwert.

Russ ist Bestandteil von Feinstaub und wird daher bei den PM10-Messwerten miterfasst (Kapitel 2.2). Doch die Belastungsmuster der beiden Parameter unterscheiden sich auf kurzen Zeitskalen, wie die Stundenwerte in Abbildung 14, stark: Die PM10 Konzentrationen sind vor allem von der regionalen Gesamtbelastung, der Stabilität der Inversionslage und damit der atmosphärischen Verdünnung abhängig.⁴¹ Die Russbelastung hingegen wird zusätzlich durch lokale Quellen wie Verbrennungsmotoren im Strassenverkehr und Holzfeuerungen beeinflusst. Die höhere Amplitude in den Russmessungen im Vergleich zu Feinstaub heisst also, dass während der Pendelzeiten mehr Russ im Feinstaub vorhanden ist.⁴²

⁴⁰ sowie Abbildung 29 bis Abbildung 33 im Anhang

⁴¹ AfU Uri (2018). Inversionswetterlagen und ihr Einfluss auf Luftschadstoffe im Kanton Uri. <https://www.ur.ch/publikationen/14206>

⁴² Herich, H., Schlatter, S. (2017). Kontinuierliche Kurzzeitmessungen von Russ in Feinstaub. Einsatz von MAAP-Geräten im OSTLUFT-Gebiet. Schlussbericht 2017. OSTLUFT.

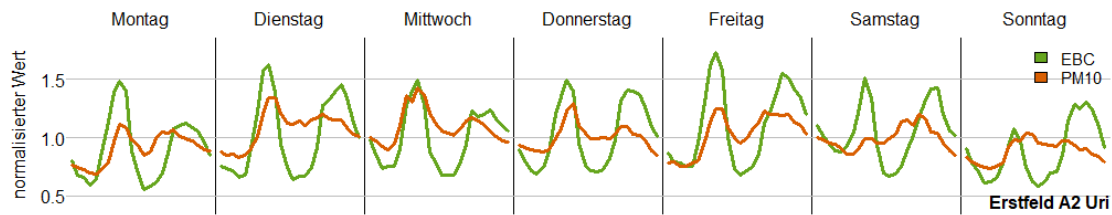


Abbildung 14: Wochengang der mit dem jeweiligen Jahresmittelwert normalisierten PM10- bzw. EBC-Werten des Jahres 2021 an der Messstation «A2 Uri» in Erstfeld.

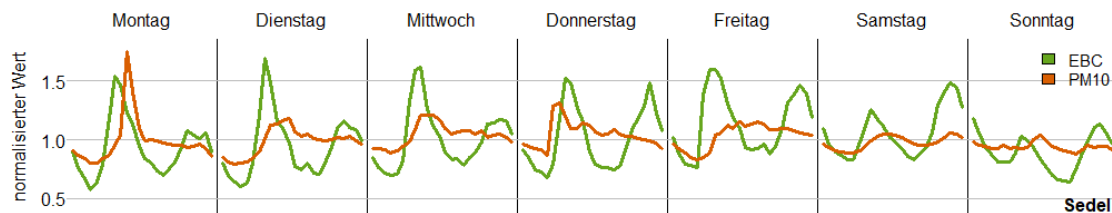


Abbildung 15: Wochengang der mit dem jeweiligen Jahresmittelwert normalisierten PM10- bzw. EBC-Werten des Jahres 2021 an der Messstation «Ebikon, Sedel».

Tabelle 6: Saisonalität der Russkonzentrationen (EBC in $\mu\text{g m}^{-3}$) in den Jahren 2016, 2017 und 2021. Grundlage der Berechnungen sind Tagesmittelwerte. «S» steht für die warme Jahreszeit (April bis September), «W» für die kalten Monate (Januar bis März und Oktober bis Dezember) und «W/S» für das Zahlenverhältnis zwischen den beiden.

	2016			2017			2021		
	S [$\mu\text{g m}^{-3}$]	W [$\mu\text{g m}^{-3}$]	W/S [-]	S [$\mu\text{g m}^{-3}$]	W [$\mu\text{g m}^{-3}$]	W/S [-]	S [$\mu\text{g m}^{-3}$]	W [$\mu\text{g m}^{-3}$]	W/S [-]
Ebikon, Sedel	0.33	0.59	1.78	0.40	0.59	1.48	0.33	0.55	1.66
Luzern, Moosstrasse	0.89	1.20	1.34	0.79	1.03	1.30	0.55	0.81	1.48
Erstfeld, A2 Uri	0.75	1.06	1.40	0.73	0.81	1.10	0.49	0.59	1.20
Zug, Postplatz				0.52	0.75	1.45			
Schwyz, Rubiswilstr.	0.48	(0.97) ¹	(2.02)						
Altdorf, Gartenmatt							0.34	0.56	1.62
Reiden							0.53	0.74	1.40
Stans							0.28	0.58	2.12

¹ Datenlücken (teils fehlende Messwerte im Januar). Das Verhältnis W/S wird daher möglicherweise unterschätzt.

5.4. Windrichtungsanalyse

An vielen Orten ist die dominierende Windrichtung durch die Topografie beeinflusst und limitiert. Dazu kommen lokale Phänomene wie Hangwinde, Kaltluftabflüsse, See- und Landwinde. Zusammen mit dem Windtransport und dem atmosphärischen Verdünnungsfaktor, welcher ebenfalls von der Topografie sowie den vorherrschenden Windgeschwindigkeiten beeinflusst wird, sind die Existenz und die Lage von lokalen Russquellen wie Verkehrsachsen oder Siedlungen die erklärenden Faktoren für die lokale Russkonzentration.

Beim Standort «Sedel» ist die Russbelastung beispielsweise bei westlichen Winden am höchsten (Abbildung 60 und Abbildung 62 im Anhang). Bei dieser Windrichtung liegt die Messstation in der direkten Abluftzone der Autobahnverzweigung Rotsee und des Verkehrsknotenpunktes Seetalplatz.

Das Windregime an der Messstation «Reiden», welche direkt an der Autobahn A2 liegt (Abbildung 16) ist durch die Talrichtung von Südostwinden dominiert, wodurch auch der meiste Russ zur Station transportiert wird (Abbildung 17 und Abbildung 18). Wie schon im vorhergehenden Kapitel für andere Messstationen gezeigt, sind im Tagesverlauf der Russkonzentration zwei Peaks kurz nach den Hauptverkehrszeiten zu sehen (Abbildung 17).

In Sachseln und Stans ist die Hauptwindrichtung Südwest bzw. Ost. Daher kommt auch der Hauptteil des Russeintrags. An beiden Messtandorten kann somit der Einfluss der Heizanlagen nicht ausgeschlossen werden.^{43,44}



Abbildung 16: Die Messstation «Reiden» nordwestlich von Dagmersellen in der topografischen Ansicht. Die Höhen sind um das Dreifache verstärkt.⁴⁵

⁴³ Luzerner Zeitung (2017). Stans: Ernüchterung über Vorzeigeprojekt. <https://www.luzernerzeitung.ch/zentralschweiz/nidwalden/stans-ernuechterung-ueber-vorzeigeprojekt-ld.108648>. Letzter Besuch: 18.10.2022.

⁴⁴ Luzerner Zeitung (2018). Holzschnitzel sorgen in Sachseln für dicke Luft. <https://www.luzernerzeitung.ch/zentralschweiz/obwalden/holzschnitzel-sorgen-fur-dicke-luft-ld.1023877>. Letzter Besuch: 18.10.2022.

⁴⁵ Quelle: GoogleEarth, 10.08.2022.

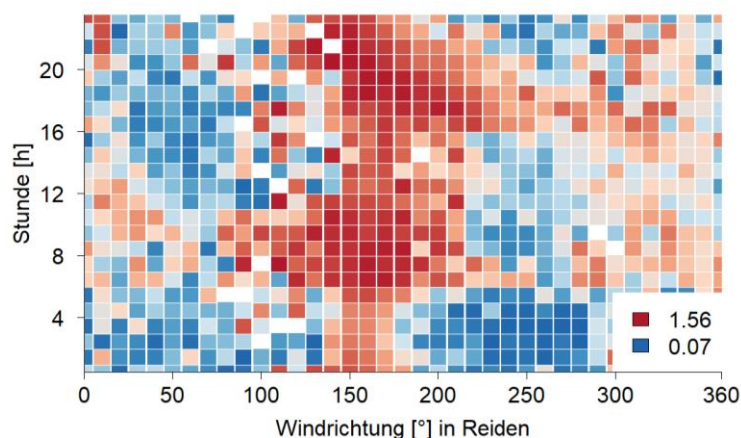


Abbildung 17: Windrichtungs- und Tagesganganalyse für die EBC-Messungen in Reiden im Jahr 2021.

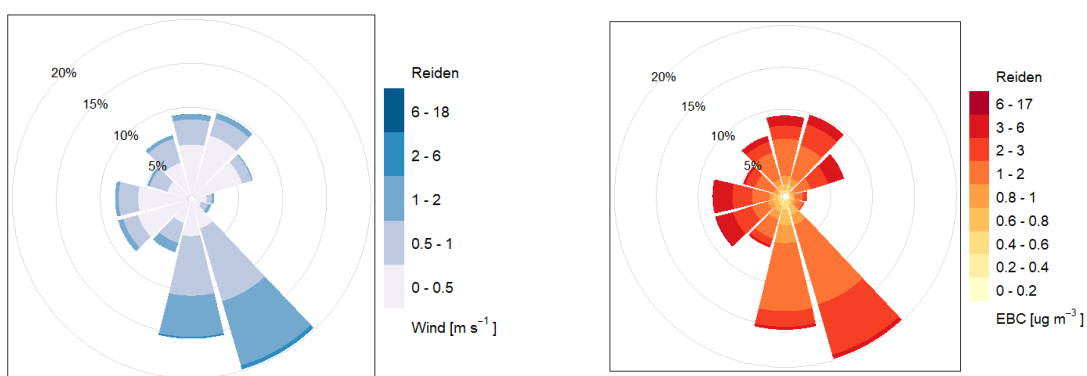


Abbildung 18: Wind- und Schadstoffrosen der Halbstundendaten des Jahres 2021 an der Messstation «Reiden».



Abbildung 19: Schadstofffrose der Messungen in Sachseln 2019/20 auf der Landeskarte. Südwestlich der Messstelle befindet sich eine Holzschnitzelheizung. Deren negative Einfluss auf die Luftqualität kann nicht ausgeschlossen werden.

5.5. Abschätzung der nicht-fossilen und fossilen Anteile

Die verkehrsintensiven Standorte wie «Luzern, Moosstrasse», «Reiden» und «Erstfeld» zeigen in den Russanteilen aus Holzheizungen (grüne Teilbalken in Abbildung 20) eine relativ geringe jahreszeitliche Schwankung. «Altdorf, Gartenmatt» und «Stans» hingegen zeigen grössere monatliche Schwankungen mit höheren Werten in den heizintensiven Monaten. Dies deutet darauf hin, dass an diesen Standorten vermehrt mit Holz geheizt wird.

Der Betrag der Steigung der linearen Regression zwischen Tagesmitteltemperaturen und $p_{EBC, WB}$ (Abbildung 6b und Abbildung 21) kann als grobes Mass für den Einfluss von Holzheizungen an einem Messstandort betrachtet werden, ähnlich wie die Abschätzung durch das Russkonzentrations-Verhältnis zwischen der warmen und kalten Jahreszeit (Tabelle 6). Der hohe Einfluss von Holzheizungen in Stans, welcher bereits in Tabelle 6 festgestellt wurde, bestätigt sich mit der Abschätzung aus dem Aethalometer-Modell beispielsweise (Abbildung 22). Wiederum zeigen die verkehrsintensiven Standorte eine tiefe Temperaturabhängigkeiten von $p_{EBC, WB}$ (Abbildung 21 und Abbildung 22).

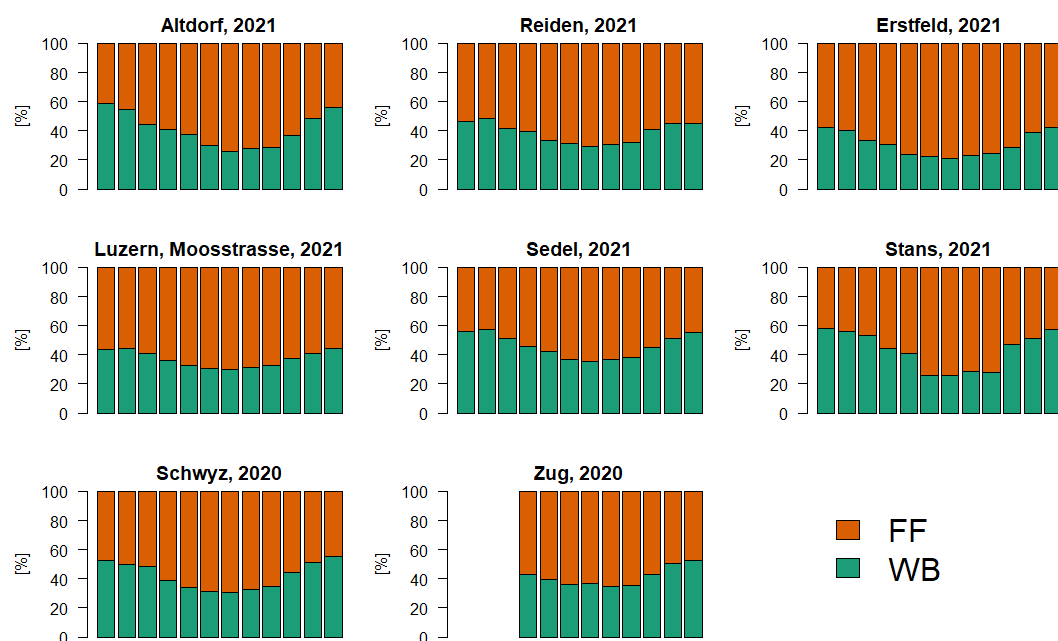


Abbildung 20: EBC_{WB} («Wood Burning» bzw. Holzheizungen) und EBC_{FF} («fossil-fuel» bzw. Verkehr) Anteile für das Jahr 2021 bzw. 2020.

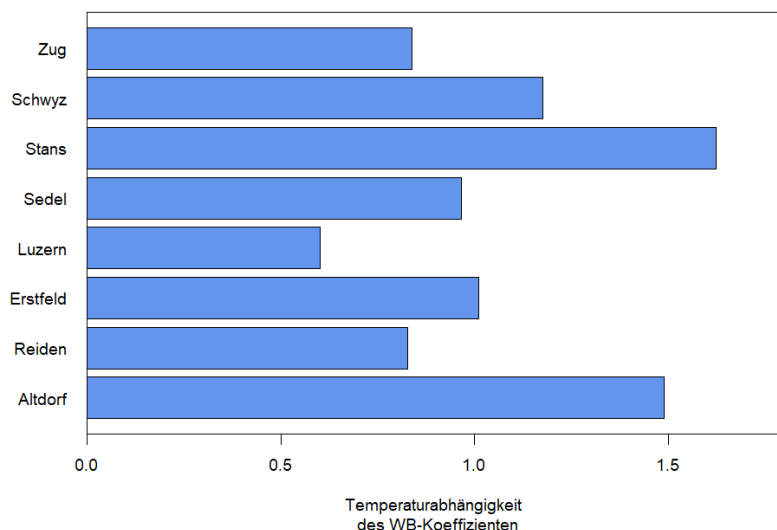


Abbildung 21: Temperaturabhängigkeit des WB-Koeffizienten aus dem Aethalometer-Modell, bzw. Betrag der Steigungen aus Abbildung 69 im Anhang. Zug und Schwyz zeigen Daten aus dem Jahr 2020, die anderen Messstationen aus 2021.

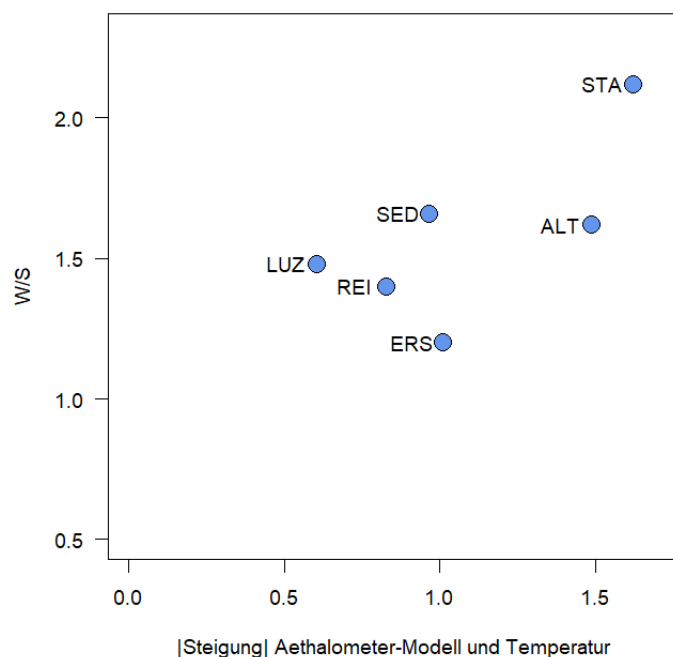


Abbildung 22: Vergleich zwischen zwei Methoden, um die Russquellen im Jahr 2021 zu identifizieren: Auf der x-Achse befindet sich der Betrag der Steigung, welche in Abbildung 21 eingezeichnet ist. Auf der y-Achse ist die Saisonalität der Russkonzentrationen (EBC in $\mu\text{g m}^{-3}$) bzw. «W/S» für das Zahlenverhältnis zwischen den warmen (S) und kalten (W) Monaten aufgetragen.

6. Berechnung von Russemissionen aus dem Strassenverkehr

Die hier durchgeführten Berechnungen der zukünftigen Russemissionen aus dem Strassenverkehr beruhen auf verschiedenen Annahmen, Prognosen. Als Berechnungsgrundlage dient das Handbuch für Emissionsfaktoren V4.1 (HBEFA4.1). Details zur Methodik sind in Kapitel 4.6 zu finden.

In den nächsten Jahren wird im Schweizer Strassenverkehr mit folgenden Entwicklungen gerechnet:

- Zunahme der Fahrzeugkilometer, v. a. bei den Personenwagen (Abbildung 70 im Anhang)
- Rückgang von Verbrennungsmotoren (Benzin und Diesel)
- Weiterentwicklung der Filtertechnik bei der Abgasnachbehandlung
- Elektrifizierung der Fahrzeugflotte

Diese Entwicklungen werden in den zukünftigen Russemissionen für beide berechneten Szenarien (WWB und ZERO-Basis) in Form einer Reduktion sichtbar, vor allem bei den Personenwagen und bis ins Jahr 2030 (Abbildung 23, sowie Abbildung 71, Abbildung 72 und Abbildung 73 im Anhang). Betrachtet man nur die Emissionen aus dem Auspuff («exhaust») sinkt die BC-Menge bereits 2040 unter 10 t BC pro Jahr (Abbildung 73 im Anhang). Zieht man jedoch die non-exhaust-Anteile mit ein, verbleiben die Russemissionen auf konstantem Niveau. Für PWs, LNF und SNF zusammen liegen diese bei ca. 130 t BC pro Jahr (Abbildung 24).

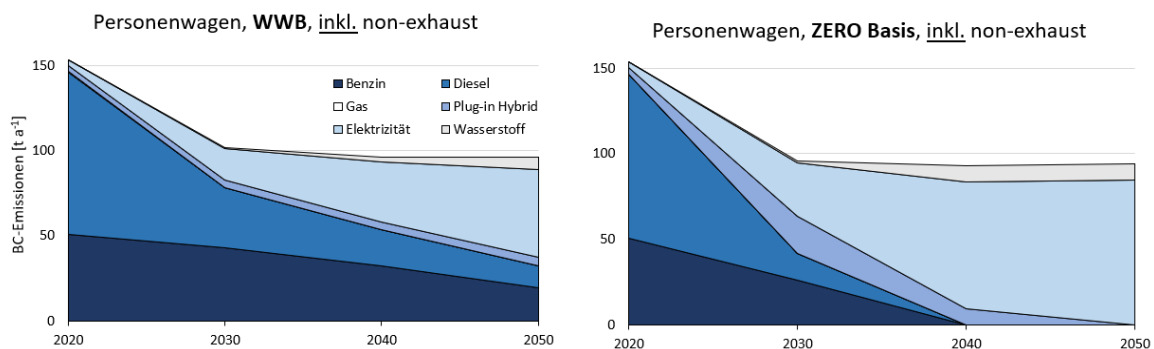


Abbildung 23: Gesamte Russemissionen von 2020 bis 2050 der Personenwagen nach Antriebstechnik und a) für das Szenario «weiter wie bisher» (WWB) und b) für das Szenario «ZERO-Basis».

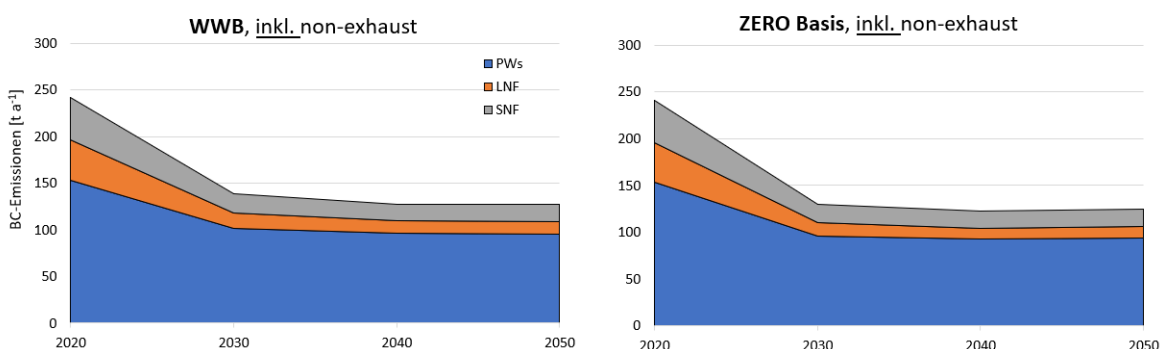


Abbildung 24: Gesamte Russemissionen von 2020 bis 2050 für Personenwagen, LNF und SNF a) für das Szenario «weiter wie bisher» (WWB) und b) für das Szenario «ZERO-Basis».

Der Anteil der «non-exhaust» Emissionen wird also mit der Zeit immer bedeutender. Die technischen Fortschritte im Auspuffbereich und die Elektrifizierung der Flotte allein sind somit ungenügende Massnahmen, um die Russemissionen aus dem Strassenverkehr deutlich zu senken. Dazu wäre eine Reduktion der Fahrzeugkilometer notwendig, insbesondere im Bereich der PW.

Weiter abzuklären sind ausserdem die «non-exhaust» Emissionen aller Fahrzeuge. Grundsätzlich werden die gekauften Neuwagen in den letzten Jahren immer schwerer, da grosse SUV im Trend sind. Die E-Autos sind wegen der Batterie ebenfalls deutlich schwerer als Autos mit Verbrennungsmotor. Bei einem höheren Fahrzeuggewicht ist ein höherer Pneumabrieb anzunehmen. Im Gegensatz dazu haben Elektro- und Hybridfahrzeugen weniger Bremsabriebemissionen, weil sie einen Teil der Bremsenergie rekuperieren können. All diese Begebenheiten werden in den Zahlen des verwendeten HBEFA noch nicht reflektiert, jedoch in die Planung für die Ausgabe 5.1 miteinbezogen.⁴⁶

Für eine ganzheitliche Betrachtung der BC-Emissionen aus dem Strassenverkehr muss zusätzlich zu den exhaust und «non-exhaust» Emissionen des Fahrzeuges selbst auch die Strom- und Batterieherstellung betrachtet werden.⁴⁷ Dies wurde in den vorliegenden Berechnungen nicht gemacht. Zusätzlich gibt es, neben den Fortschritten im Strassenverkehr, zwei weitere Themenbereiche, welche für die zukünftige Entwicklung der nationalen Russemissionen miteinbezogen werden müssen. Diese werden aber in der Folge nur qualitativ und nicht quantitativ beschrieben:

Filter im Off-Road-Bereich

Während sich die absoluten Russemissionen aus dem Verkehr seit der letzten Datenanalyse 2010 durch Fortschritte in der Filtertechnik bei Autos und Baumaschinen verringert hat, sind die Emissionen von landwirtschaftlichen Maschinen beinahe konstant geblieben. Modelle schätzen, dass die Landwirtschaft im Jahr 2020 die mit Abstand grösste Emissionsquelle von Dieseleruss im Nonroad-Bereich ist.⁴⁸ Zwar gilt in der EU und damit für importierte Motoren seit 2019/2020 die Abgasstufe EU-V, welche Partikelfilter benötigt. Jedoch verzögert sich die Wirkung dieser bei landwirtschaftlichen Maschinen wegen der tiefen Erneuerungsrate von etwa 2 % pro Jahr. Das gesetzte Zielmenge für die Landwirtschaft von 20 t Dieseleruss pro Jahr wird damit schätzungsweise um das Jahr 2042 erreicht.

Energieversorgung

Basierend auf einer drohenden Strommangellage und steigenden Energiepreise, verstärkt durch eine Dürrephase mit geringen Wasserabflussmengen in ganz Europa und dem Krieg in der Ukraine und den damit verbundenen Sanktionen gegen Russland, wurde von Seiten der Eidgenössischen Elektrizitätskommission (Elcom) geraten, sich für den Winter 2022/23 mit Brennholz einzudecken. Die Nachfrage stieg in der Folge stark an.⁴⁹ Aufgrund dieser Entwicklung wird befürchtet, dass die Feinstaub- und damit Russemissionen von privaten Holzfeuerungen stark ansteigen werden.⁵⁰ Insbesondere auch, da Kleinanlagen ohne oder nur mit ungenügender Filtertechnik ausgerüstet sind.

Ein weiterer, wenn auch deutlich geringer, negativer Effekt dürfte die Zulassung von Umschaltung der Zweistoffanlagen sein, welche der Bundesrat temporär beschlossen hat.⁵¹ Aufgrund der angespannten Versorgungslage sollen diese mit Öl statt mit Gas betrieben werden. Ölfeuerungen emittierten im Vergleich zu Gasfeuerungen etwa doppelt so viel Staub.⁵²

⁴⁶ persönliche Kommunikation mit Dr. B. Cox, INFRAS

⁴⁷ Ernst Basler & Partner (2021). Szenarien der Elektromobilität in der Schweiz. https://www.ebp.ch/sites/default/files/2021-03/2021-03-08_EBP_CH_EmobSzen_PKW_2021.pdf. Letzter Zugriff: 13.06.2022.

⁴⁸ Zundel, Ch. (2019). Dieseleruss aus der Landwirtschaft. <https://2019.agrarbericht.ch/de/umwelt/luft/dieseleruss-aus-der-landwirtschaft>. Agrarbericht 2019. 30.681.19D. Bundesamt für Landwirtschaft. Bern.

⁴⁹ Handelszeitung (2022). Elcom-Chef rät zu Kerzen und Brennholz bei Strommangel. <https://www.handelszeitung.ch/politik/elcom-chef-werner-luginbuhl-rat-zu-kerzen-und-brennholz-bei-strommangel-523435>. Letzter Besuch: 14.10.2022.

⁵⁰ Tages-Anzeiger (2022). Ein Beleg, wie katastrophal das Land verlernt hat, nachzudenken. <https://www.tagesanzeiger.ch/ein-beleg-wie-katastrophen-das-land-verlernt-hat-nachzudenken-119223312179>. Letzter Besuch: 14.10.2022.

⁵¹ BAFU (2022). Umschaltung von Zweistoffanlagen: Bundesrat passt zwei Verordnungen an. <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/klima/mitteilungen/msg-id-90374.html>. Letzter Besuch: 14.10.2022.

⁵² BAFU (2015). Faktenblatt Emissionsfaktoren Feuerungen. <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/luft/fachinformationen/luftschadstoffquellen/feuerungen-und-heizungen-als-luftschadstoffquellen.html>. Letzter Besuch: 14.10.2022.

7. Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Der EKL-Richtwert von $0.1 \mu\text{g m}^{-3}$ wird in der Zentralschweiz noch immer grossflächig und massiv überschritten. Stellt man die drei Parameter EBC, NO_2 und PM_{10} den entsprechenden Jahresgrenz- bzw. Richtwerten gegenüber, wird ersichtlich, dass bei Russ der dringendste Handlungsbedarf besteht. Aus folgenden Gründen sollte das Russ-Monitoring in der Zentralschweiz in den nächsten Monaten (Winter 2022/23) und Jahren unbedingt weitergeführt und ausgebaut werden:

- Dieselryss gilt als kanzerogen.
- Die weiteren direkten und indirekten Auswirkungen von Russpartikeln auf die menschliche Gesundheit, insbesondere im Bereich Demenz, sind noch unklar.
- Russ gilt als entscheidender Messparameter für die Verkehrsimmissionen, weil er eher reagiert als PM_{10} .
- Die globale Datenlage ist bisher spärlich, doch für Modellierungen im Zusammenhang mit dem Einfluss auf das Klimasystem sind Russmessungen von grosser Wichtigkeit. Russ wirkt sich in doppelter Weise negativ auf das Klimasystem aus: Einerseits wird die Albedo der Erdoberfläche verringert. Weiter absorbiert Russ die kurzwellige Strahlung und erwärmt somit die Atmosphäre.
- In den nächsten Monaten (Winter 2022/23) und Jahren gibt es verschiedene (geo-)politische Entwicklungen, welche die Russkonzentration in der Aussenluft negativ oder positiv beeinflussen können. Dazu gehören
 - die **europäische Energiekrise** im Zusammenhang mit dem Krieg in der Ukraine und den Wirtschaftssanktionen gegen Russland
 - Die Zulassung von Zweistoffanlagen sowie der Anstieg an privaten Holzheizungen ist aus Sicht der Lufthygiene und insbesondere der Russkonzentration sehr negativ. Diesem Zielkonflikt muss politisch unbedingt Rechnung getragen werden.
 - eher negative Auswirkungen auf lokale Russkonzentration
 - der **geplante** Ausstieg aus den fossilen **Energieträgern** für die Bekämpfung des Klimawandels
 - eher positive Auswirkungen auf lokale Russkonzentration

Momentane Berechnungen zu Russ aus dem Strassenverkehr weisen darauf hin, dass diese in wenigen Jahren nicht weiter sinken wird, weil sämtliche Verbesserungen in der Abgasnachbehandlung durch «non-exhaust» Emissionen (Abrieb von Pneu und Bremsen) zunichte gemacht werden. Die wissenschaftliche Datenlage muss diesbezüglich unbedingt verbessert werden! Verstärken sich diese momentan groben Erkenntnisse, ist eine Reduktion der Fahrzeugkilometer die einzige Massnahme, welche zu signifikanten Reduktionen der Gesamtrussemissionen aus dem Strassenverkehr führt.

Vollständige Datensätze und standardisierte Messmethoden, wie dies bei EBC der Fall ist, ermöglichen Standortvergleiche und kleinräumig angepasste Massnahmen. Diese Messungen dienen als Grundlageninformationen für die Evaluation und Anpassung der Massnahmenpläne. Eine spezifische (Nach-) Messung zur Russthematik sollte im Muotatal gemacht werden, um die Wirksamkeit der dort bisher getroffenen Massnahmen zu überprüfen.

8. Anhang

8.1. Hintergrund

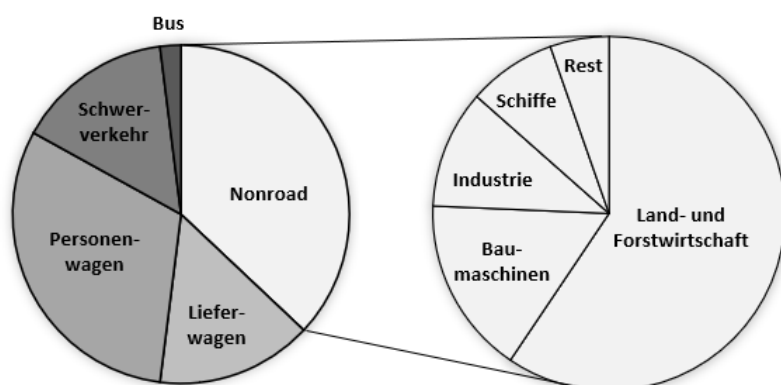


Abbildung 25: Anteile der Russemissionen von Dieselmotoren im Jahr 2010.⁵³

⁵³ BAFU (2012). Weniger Russ aus Dieselmotoren; Erfolge der Schweiz bei der Emissionsreduktion.

8.2. Messwerte

Tabelle 7: Verwendete Jahresmittelwerte für NO₂, PM₁₀ und EBC. An der Station «Reiden» wird nur EC gemessen und PM₁₀ nur gravimetrisch. Alle Werte sind in µg m⁻³.

	Ebikon, Sedel			LuzernMoos			Schwyz			Altdorf			Zug		
	NO ₂	PM ₁₀	EBC	NO ₂	PM ₁₀	EBC	NO ₂	PM ₁₀	EBC	NO ₂	PM ₁₀	EBC	NO ₂	PM ₁₀	EBC
2009	24.6	22.7					21.7	21.0		24.9	18.4		33.3	20.6	
2010	25	23.1		49.1	29.0		22	20.2		23.8	17.8		33.7	22.7	
2011	23.7	21.3		50.4	32.4		20.9	20.1		25.3	18.8		31.7	23.8	
2012	22.7	19.0		48.4	21.9	2.2	20.1	17.4		25.7	14.7		32.3	18.4	
2013	22.9	22.0		46.5	26.6	1.8	20.9	18.9		24.4	17.9		33.1	20.9	
2014	21.8	14.5	0.5	43.7	24.5	1.3	19.4	15.1		22.8	14.0		30.7	18.2	
2015	22.7	17.2	0.5	45.1	23.2	1.2	20.9	16.5		25.2	15.1		32.6	19.8	
2016	20.6	14.6	0.5	40.7	20.2	1	18.1	14.3	0.7	21.3	11.5		28.8	15.4	
2017	19.8	14.0	0.5	41.2	18.7	0.9	17.5	15.5		20.5	12.8		27.3	14.0	0.6
2018	18.3	15.4	0.6	37.4	19.1	0.9	16.7	15.0		19.5	13.6		25.2	16.7	
2019	17.5	13.8	0.5	35.3	15.3	0.8	16.5	13.9		18	11.9		24.1	15.8	
2020	16.2	12.8	0.5	29.9	14.7	0.7	15.4	11.9	0.5	16.6	12.6		22	12.5	
2021	15.4	12.7	0.5	29	14.9	0.7	14.9	12.5		16.1	11.4	0.5	21.1	13.0	

	Reiden			Erstfeld, A2 Uri		
	NO ₂	PM ₁₀ ¹	EC	NO ₂	PM ₁₀	EBC
2009	34.3	23.3	1.7	34.1		
2010	34	22.1	1.6	31.9	20.4	
2011	33.4	23.5	1.6	35.2	23.9	
2012	31.7	19.4	1.3	34.7	14.4	
2013	32.5	20.5	1.1	35.7	15.5	
2014	30.4	15.8	1.1	31.5	11.5	
2015	33.2	17.5	1.1	34	13.8	1.1
2016	30.4	15.3	0.8	29.4	12.1	0.9
2017	29.7	15.5	0.8	28.7	12.3	0.8
2018	26.1	16.0	0.7	24.9	12.9	0.8
2019	25.5	14.7	0.7	24.5	10.4	0.6
2020	19.7	13.5	0.7	20.9	10.8	1.0
2021	19.5	14.1	0.6	20.2	10.9	0.6

¹ von 2012 bis 2021 nur gravimetrisch gemessen

8.3. Monatliche Russbelastung

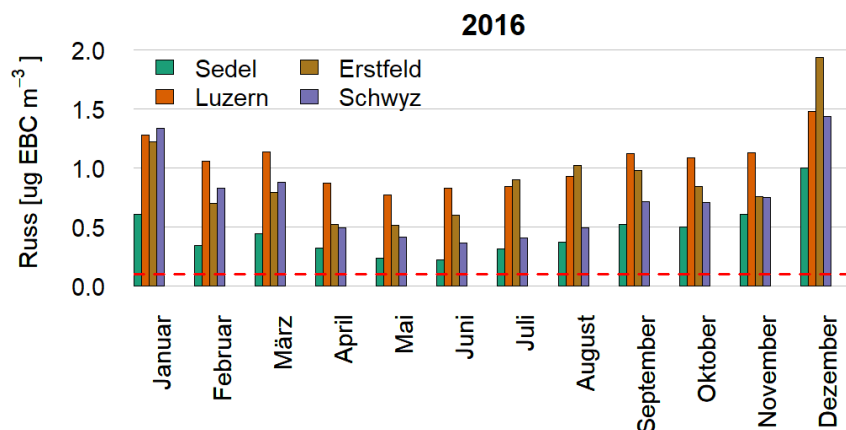


Abbildung 26: Monatsmittelwerte für das Jahr 2016. Zum Dezember 2016 schreibt MeteoSchweiz: «Die Dezembertemperatur in den Tieflagen der Alpennordseite und der Alpentäler (blieb) verbreitet 0.4 Grad bis 1.7 Grad unter der Norm 1981–2010». ⁵⁴ Dies kann die erhöhten Werte durch intensive Heiztätigkeiten erklären.

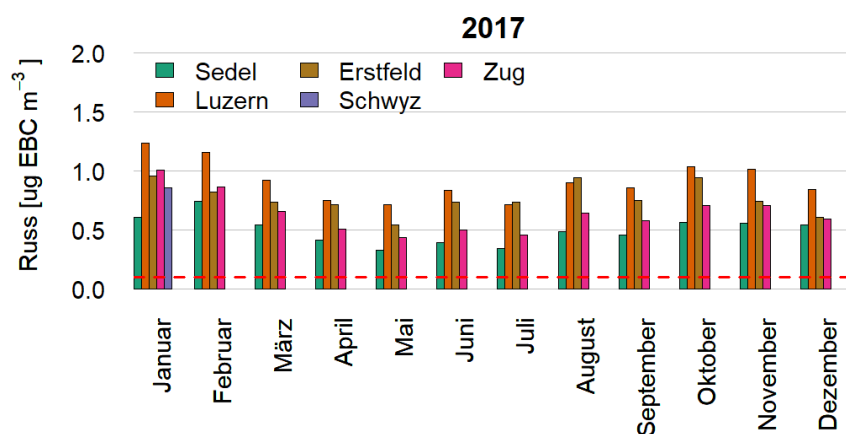


Abbildung 27: Monatsmittelwerte für das Jahr 2017.

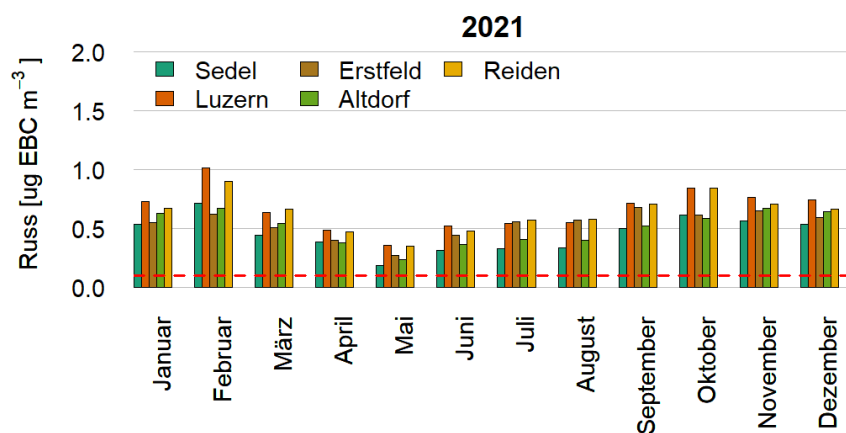


Abbildung 28: Monatsmittelwerte für das Jahr 2021.

⁵⁴ MeteoSchweiz (2017). Klimabulletin Dezember 2016.

8.4. EBC und PM10 im Tages- und Wochengang

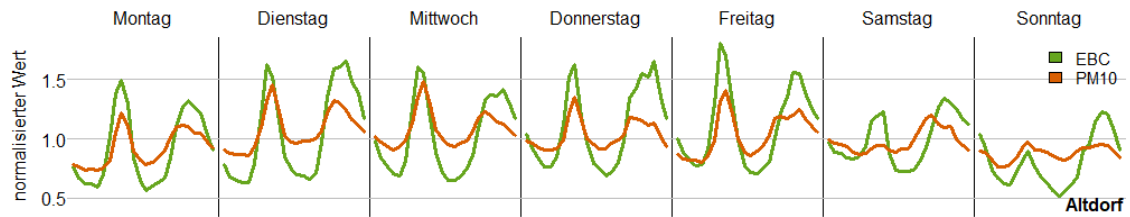


Abbildung 29: Wochengang der mit dem jeweiligen Jahresmittelwert normalisierten PM10- bzw. EBC-Werten des Jahres 2021 an der Messstation «Altdorf, Gartenmatt».

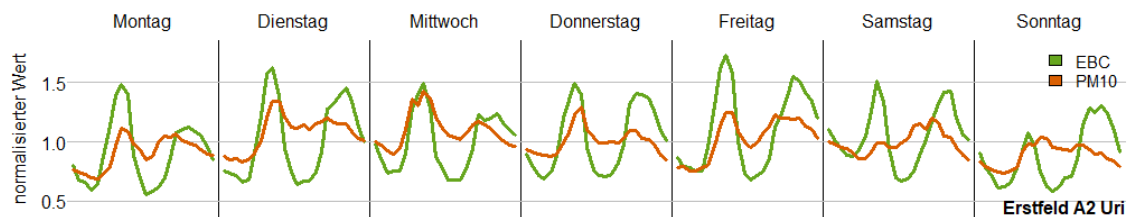


Abbildung 30: Wochengang der mit dem jeweiligen Jahresmittelwert normalisierten PM10- bzw. EBC-Werten des Jahres 2021 an der Messstation «Erstfeld, A2 Uri».

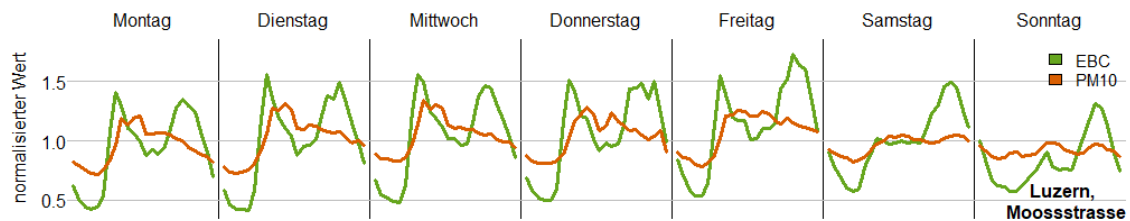


Abbildung 31: Wochengang der mit dem jeweiligen Jahresmittelwert normalisierten PM10- bzw. EBC-Werten des Jahres 2021 an der Messstation «Luzern, Moosstrasse».

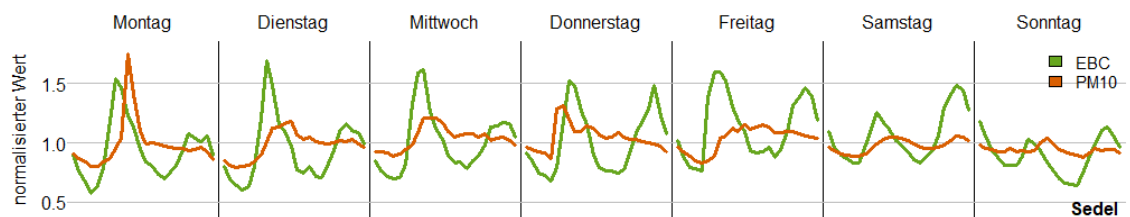


Abbildung 32: Wochengang der mit dem jeweiligen Jahresmittelwert normalisierten PM10- bzw. EBC-Werten des Jahres 2021 an der Messstation «Ebikon, Sedel».

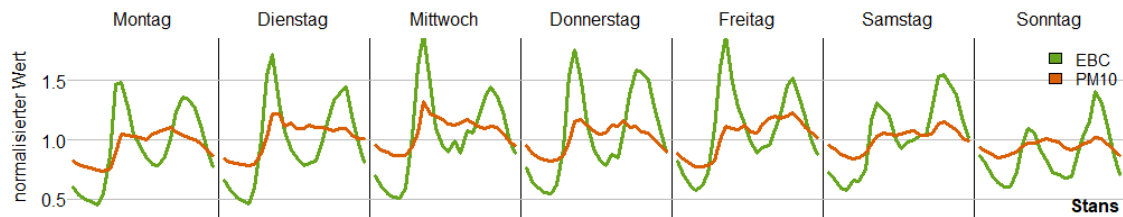


Abbildung 33: Wochengang der mit dem jeweiligen Jahresmittelwert normalisierten PM10- bzw. EBC-Werten des Jahres 2021 an der Messstation «Stans».

8.5. Saisonale Unterschiede in den Russkonzentrationen

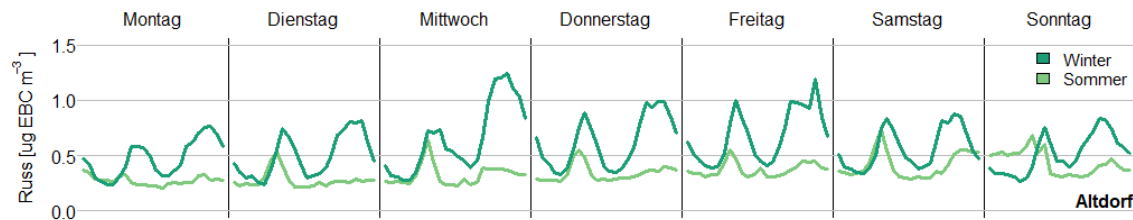


Abbildung 34: Russbelastung in «Altdorf, Gartenmatt» im Wochen- und Tagesgang für die Sommer- und Wintermonate (Juni, Juli, August versus Januar, Februar, Dezember) des Jahres 2021.

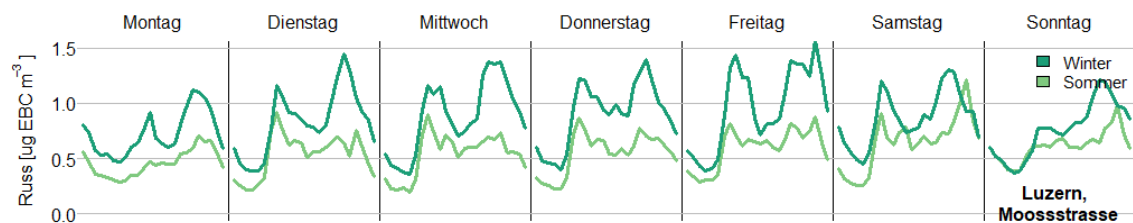


Abbildung 35: Russbelastung in Erstfeld im Wochen- und Tagesgang für die Sommer- und Wintermonate (Juni, Juli, August versus Januar, Februar, Dezember) des Jahres 2021.

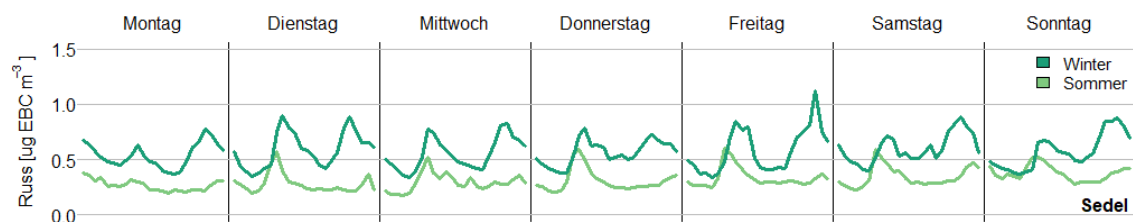


Abbildung 36: Russbelastung in «Ebikon, Sedel» im Wochen- und Tagesgang für die Sommer- und Wintermonate (Juni, Juli, August versus Januar, Februar, Dezember) des Jahres 2021.

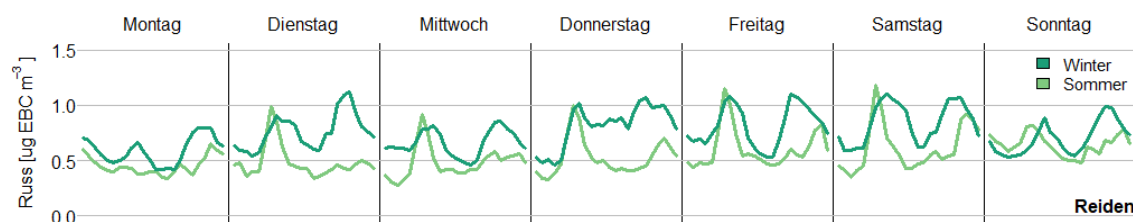


Abbildung 37: Russbelastung in Reiden im Wochen- und Tagesgang für die Sommer- und Wintermonate (Juni, Juli, August versus Januar, Februar, Dezember) des Jahres 2021.

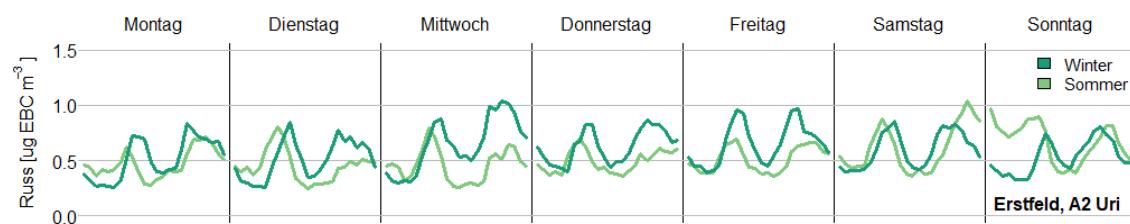


Abbildung 38: Russbelastung in «Erstfeld, A2 Uri» im Wochen- und Tagesgang für die Sommer- und Wintermonate (Juni, Juli, August versus Januar, Februar, Dezember) des Jahres 2021.

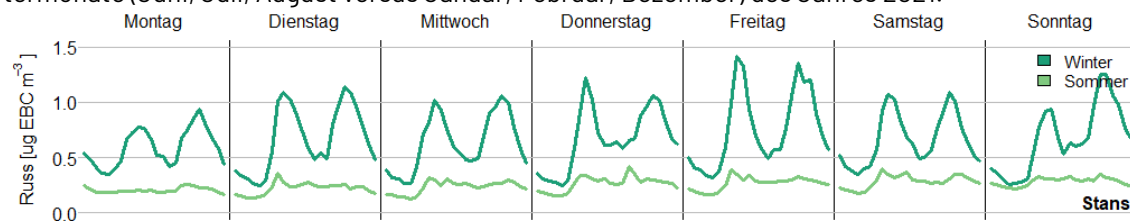


Abbildung 39: Russbelastung in «Erstfeld, A2 Uri» im Wochen- und Tagesgang für die Sommer- und Wintermonate (Juni, Juli, August versus Januar, Februar, Dezember) des Jahres 2021.

8.6. Windrichtungsanalysen

8.6.1. Altdorf, Gartenmatt

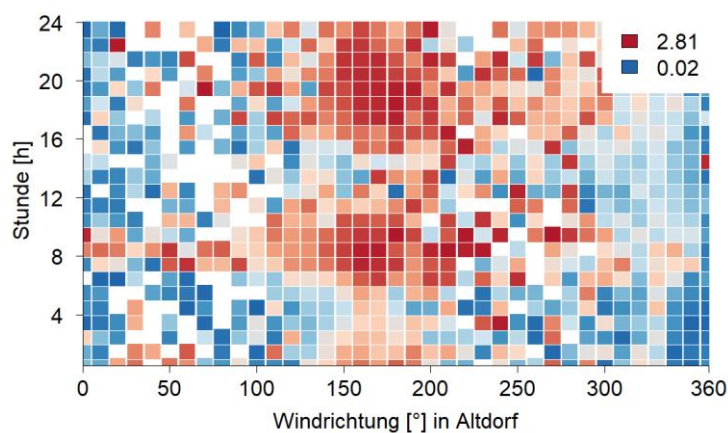


Abbildung 40: Ganzjährige Windrichtungs- und Tagesganganalyse für die EBC-Messungen in «Altdorf, Gartenmatt» im Jahr 2021.

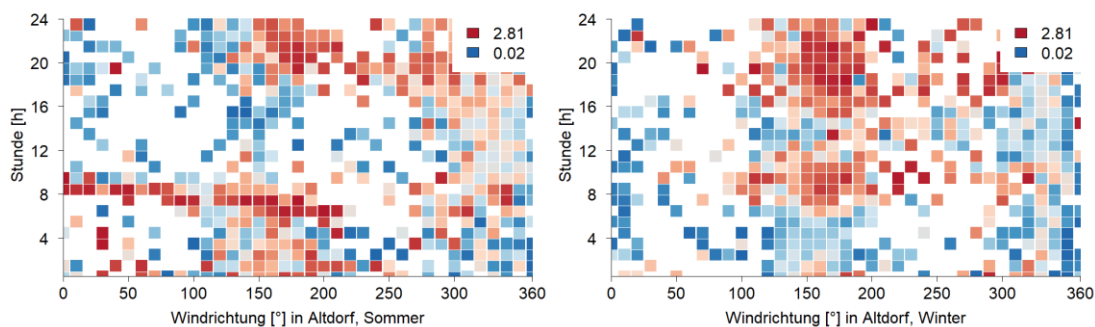


Abbildung 41: Windrichtungs- und Tagesganganalysen für die EBC-Messungen in «Altdorf, Gartenmatt» für Sommer (links: Juni, Juli, August) bzw. Winter (rechts: Januar, Februar, Dezember) im Jahr 2021.

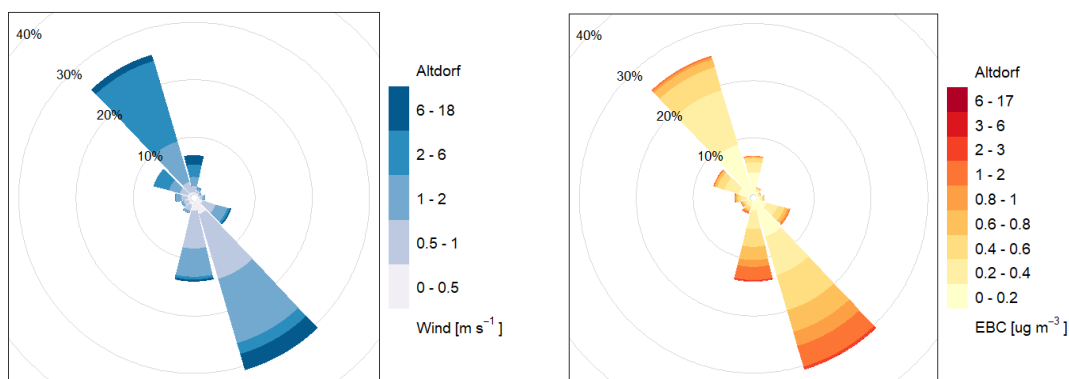


Abbildung 42: Wind- und Schadstoffrosen der Halbstundendaten des Jahres 2021 an der Messstation «Altdorf, Gartenmatt».

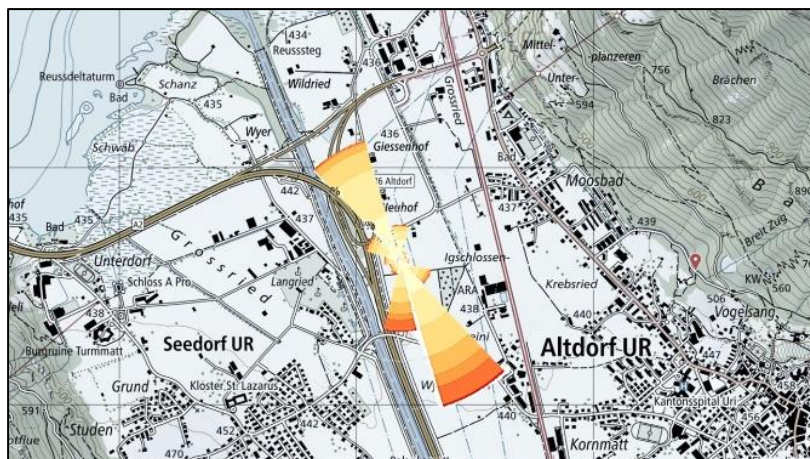


Abbildung 43: Windrose der Halbstundendaten des Jahres 2021 an der Messstation «Altdorf, Gartenmatt» über der Landeskarte.

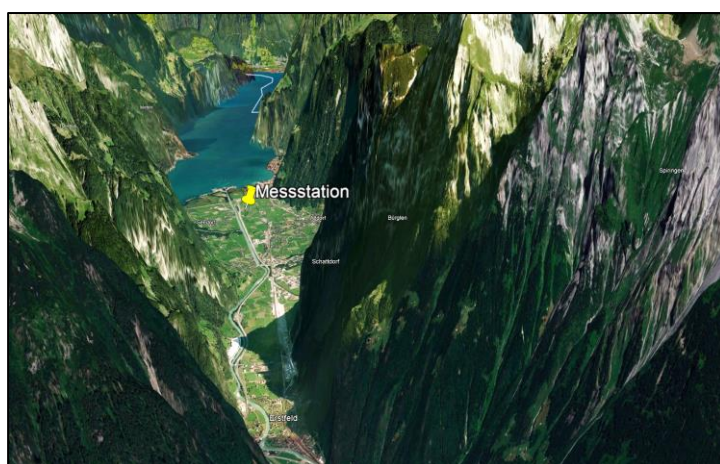


Abbildung 44: Die Messstation «Altdorf, Gartenmatt» in der topografischen Ansicht. Die Höhen sind um das Dreifache verstärkt.⁵⁵

8.6.2. Erstfeld, A2

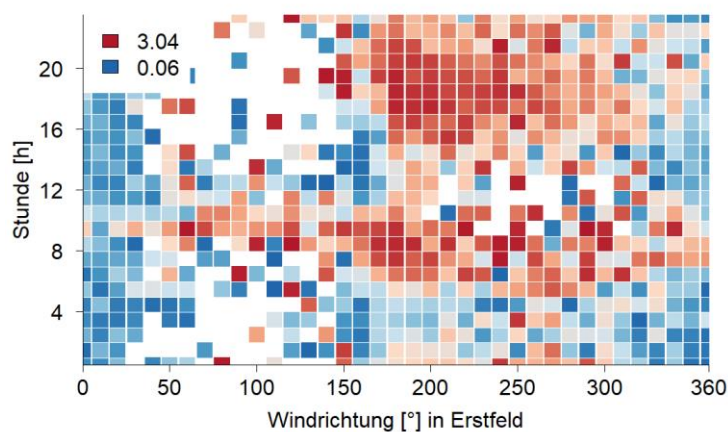


Abbildung 45: Ganzjährige Windrichtungs- und Tagesganganalyse für die EBC-Messungen in «Erstfeld, A2 Uri» im Jahr 2021.

⁵⁵ Quelle: GoogleEarth, 10.08.2022.

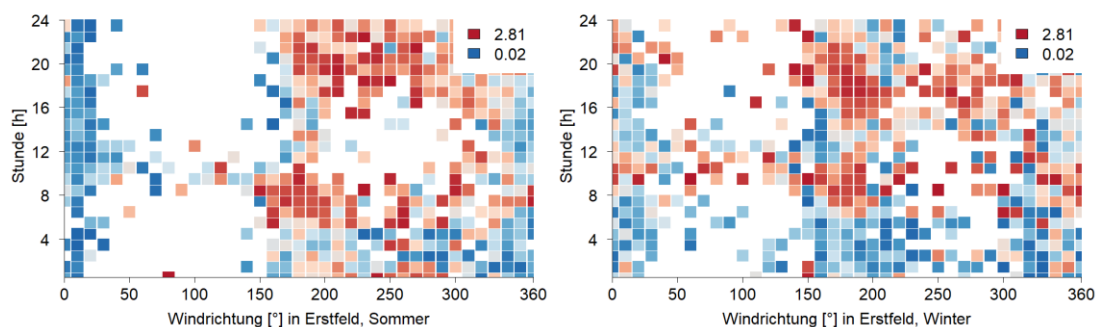


Abbildung 46: Windrichtungs- und Tagesganganalysen für die EBC-Messungen in «Erstfeld, A2 Uri» für Sommer (links: Juni, Juli, August) bzw. Winter (rechts: Januar, Februar, Dezember) im Jahr 2021.

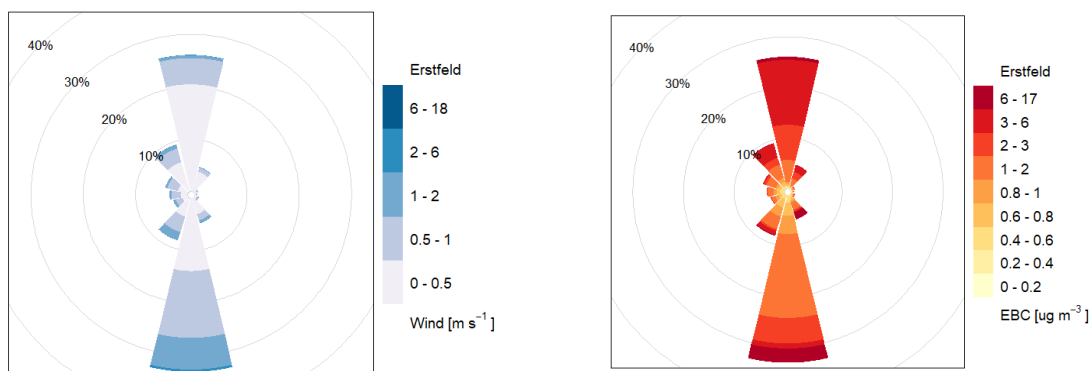


Abbildung 47: Wind- und Schadstoffrosen der Halbstundendaten des Jahres 2021 an der Messstation «Erstfeld, A2 Uri».

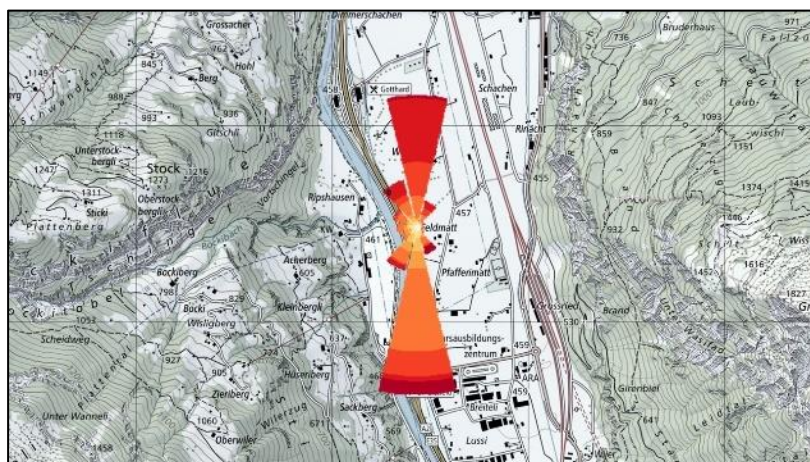


Abbildung 48: Windrose der Halbstundendaten des Jahres 2021 an der Messstation «Erstfeld, A2 Uri» über der Landeskarte.

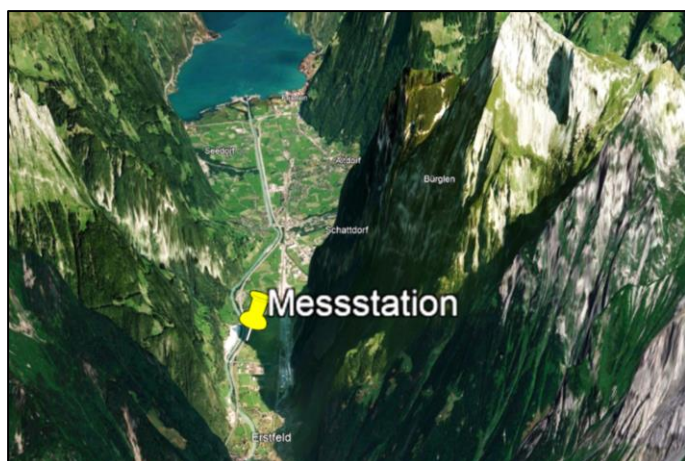


Abbildung 49: Die Messstation «Erstfeld, A2 Uri» in der topografischen Ansicht. Die Höhen sind um das Dreifache verstärkt.⁵⁶

8.6.3. Reiden

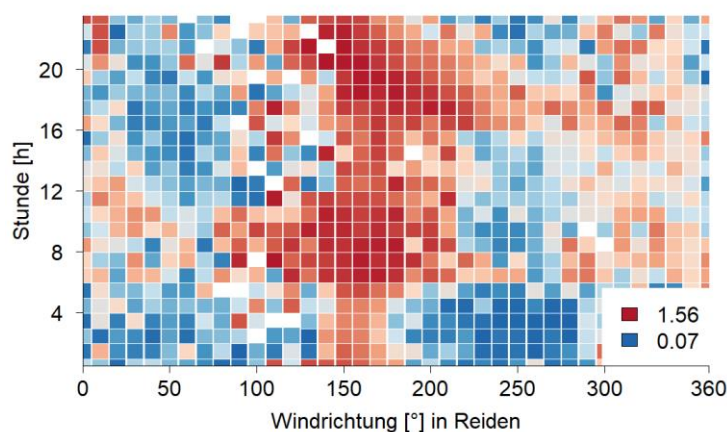


Abbildung 50: Ganzjährige Windrichtungs- und Tagesganganalyse für die EBC-Messungen in Reiden im Jahr 2021.

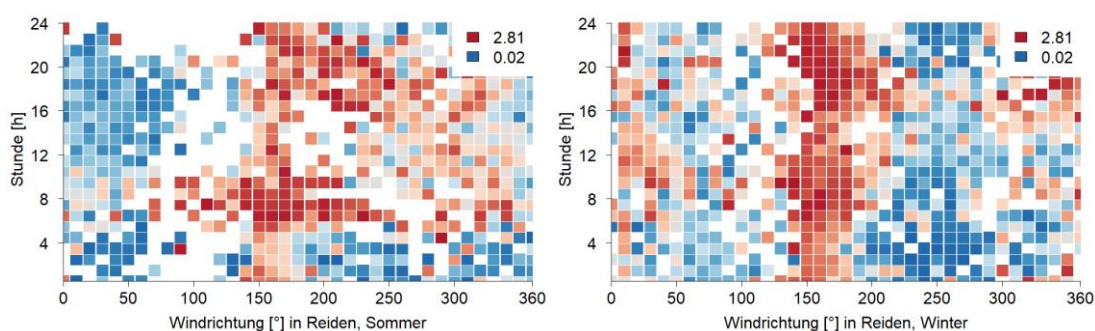


Abbildung 51: Windrichtungs- und Tagesganganalysen für die EBC-Messungen in Reiden für Sommer (links: Juni, Juli, August) bzw. Winter (rechts: Januar, Februar, Dezember) im Jahr 2021.

⁵⁶ Quelle: GoogleEarth, 10.08.2022.

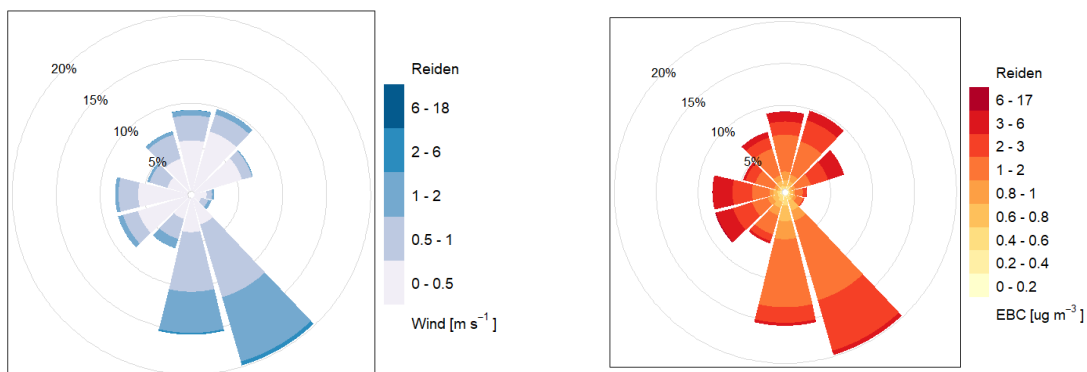


Abbildung 52: Wind- und Schadstoffrosen der Halbstundendaten des Jahres 2021 an der Messstation «Reiden».

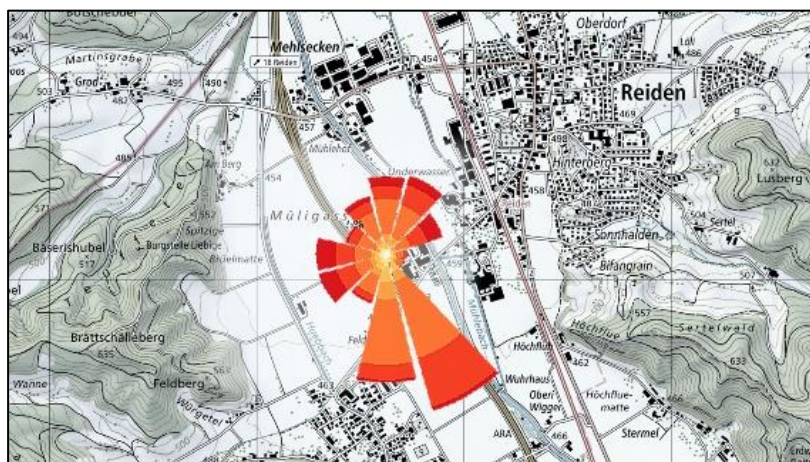


Abbildung 53: Windrose der Halbstundendaten des Jahres 2021 an der Messstation «Reiden» über der Landeskarte.



Abbildung 54: Die Messstation «Reiden» nordwestlich von Dagmersellen in der topografischen Ansicht. Die Höhen sind um das Dreifache verstärkt.⁵⁷

⁵⁷ Quelle: GoogleEarth, 10.08.2022.

8.6.4. Ebikon, Sedel

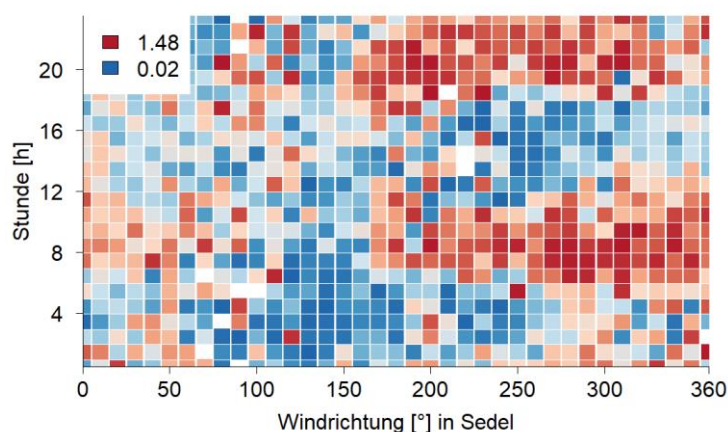


Abbildung 55: Ganzjährige Windrichtungs- und Tagesganganalyse für die EBC-Messungen in «Ebikon, Sedel» im Jahr 2021.

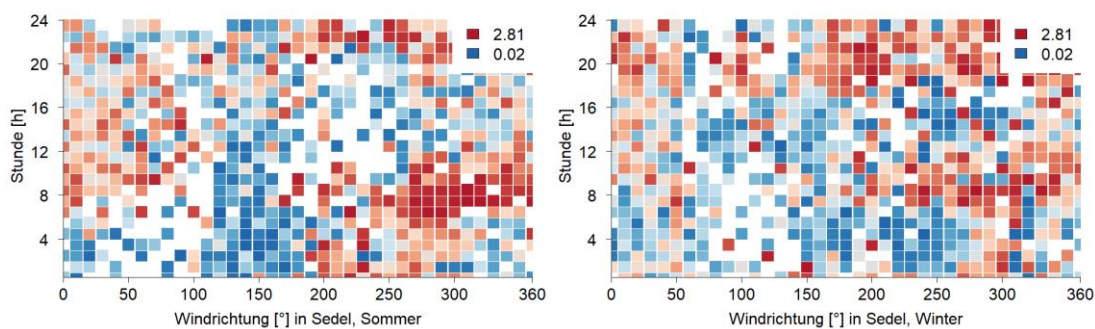


Abbildung 56: Windrichtungs- und Tagesganganalysen für die EBC-Messungen in Sedel für Sommer (links: Juni, Juli, August) bzw. Winter (rechts: Januar, Februar, Dezember) im Jahr 2021.

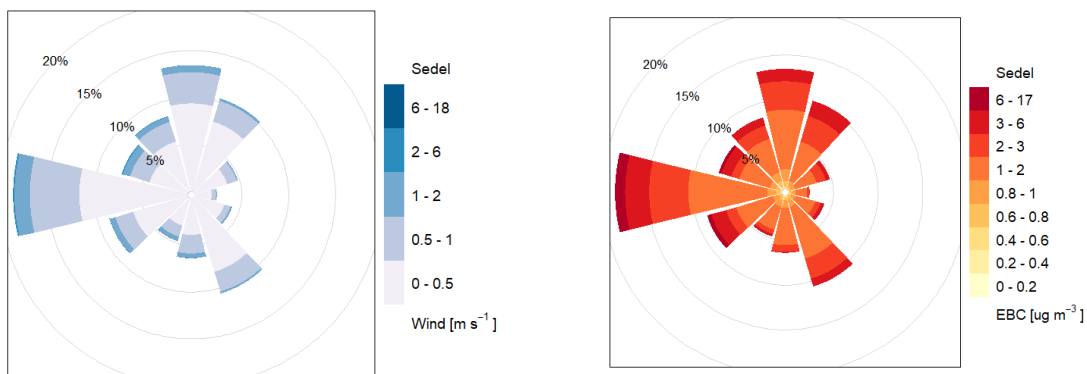


Abbildung 57: Wind- und Schadstoffrosen der Halbstundendaten des Jahres 2021 an der Messstation «Ebikon, Sedel».

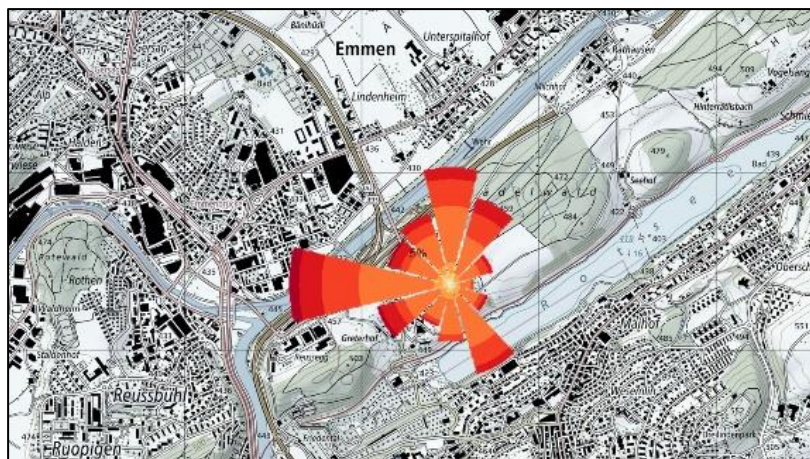


Abbildung 58: Windrose der Halbstundendaten des Jahres 2021 an der Messstation «Ebikon, Sedel» über der Landeskarte.



Abbildung 59: Die Messstation «Ebikon, Sedel» in der topografischen Ansicht. Die Höhen sind um das Dreifache verstärkt.⁵⁸

8.6.5. Stans

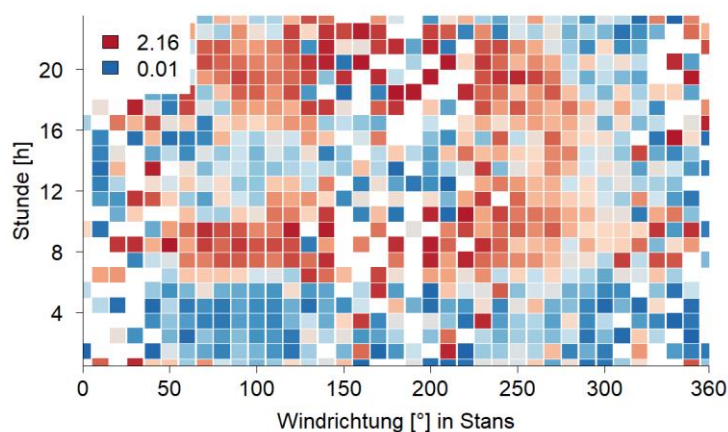


Abbildung 60: Ganzjährige Windrichtungs- und Tagesganganalyse für die EBC-Messungen in Stans im Jahr 2021.

⁵⁸ Quelle: GoogleEarth, 10.08.2022.

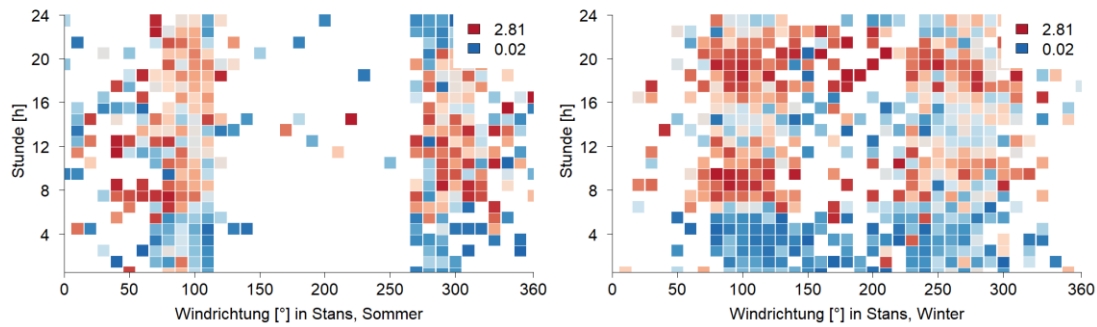


Abbildung 61: Windrichtungs- und Tagesganganalysen für die EBC-Messungen in Stans für Sommer (links: Juni, Juli, August) bzw. Winter (rechts: Januar, Februar, Dezember) im Jahr 2021.

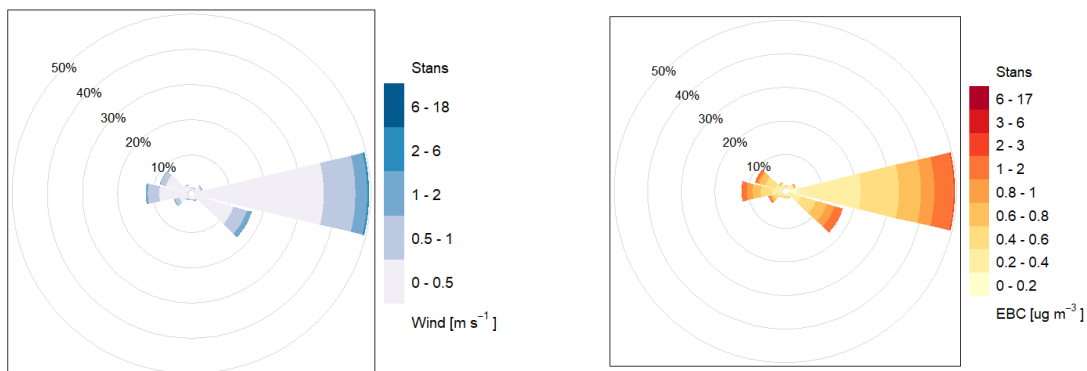


Abbildung 62: Wind- und Schadstoffrosen der Halbstundendaten des Jahres 2021 an der Messstation «Stans».

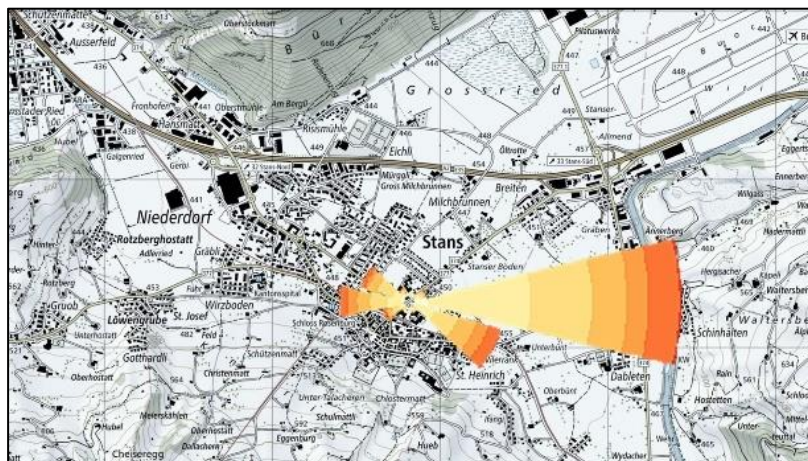


Abbildung 63: Windrose der Halbstundendaten des Jahres 2021 an der Messstation «Stans» über der Landeskarte. Östlich des Messstandorts befindet sich die Holzfeuerungs-Anlage in Oberdorf, welche eventuell die erhöhten Werte aus dieser Richtung erklärt.



Abbildung 64: Die Messstation «Stans» in der topografischen Ansicht. Die Höhen sind um das Dreifache verstärkt.⁵⁹

8.6.6. Sachseln

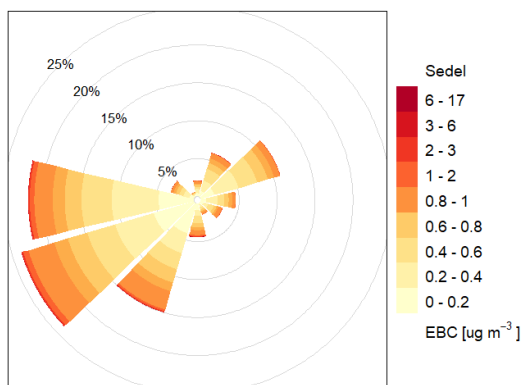


Abbildung 65: Schadstoffrosen der Halbstundendaten des Jahres 2019/20 an der Messstation «Sachseln».

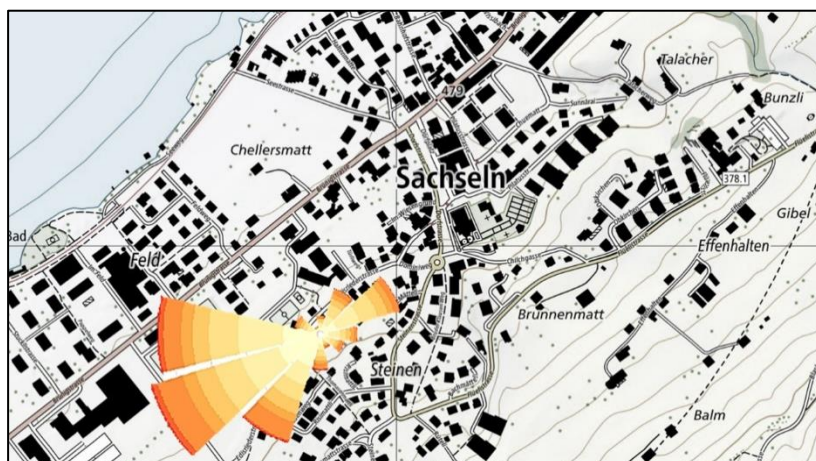


Abbildung 66: Windrose der Halbstundendaten des Jahres 2021 an der Messstation «Sachseln» über der Landeskarte.

⁵⁹ Quelle: GoogleEarth, 10.08.2022.

8.7. Aethalometer-Modell

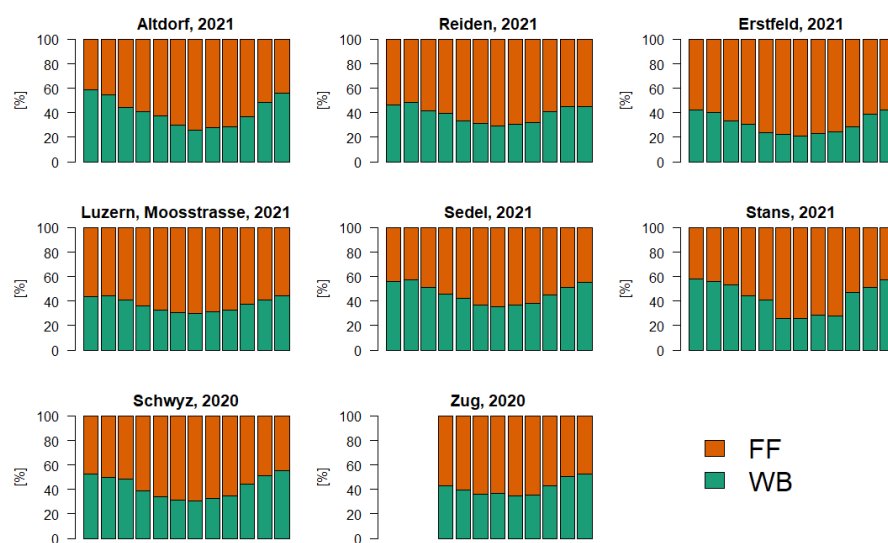


Abbildung 67: Ergebnisse aus dem Aethalometer-Modell: **Relative** Russwerte, aufgeteilt in die Quellen «ff» (fossil fuel), welche auf Verkehr hindeuten, und «wb» (wood burning), welche auf Holzheizungen hinweisen.

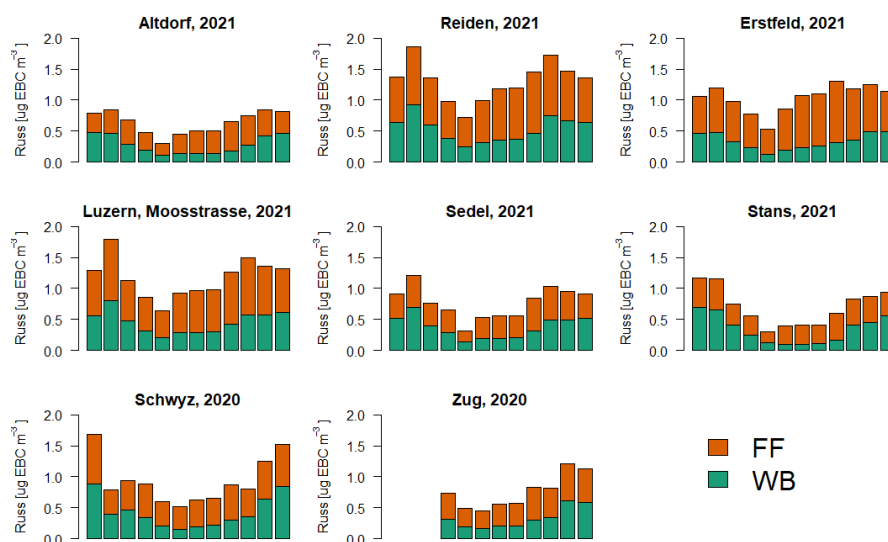


Abbildung 68: Ergebnisse aus dem Aethalometer-Modell: **Absolute** Russwerte, aufgeteilt in die Quellen «ff» (fossil fuel), welche auf Verkehr hindeuten, und «wb» (wood burning), welche auf Holzheizungen hinweisen.

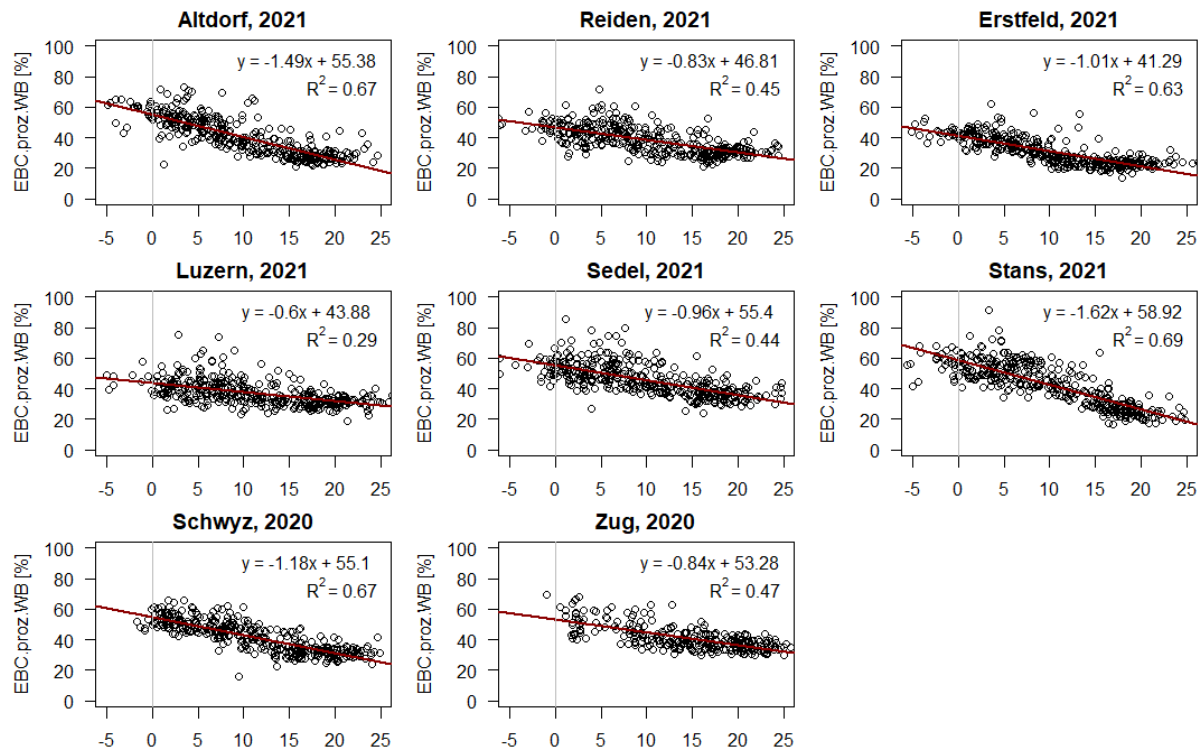


Abbildung 69: Absolute Tagesmitteltemperatur in °C auf der x-Achse und der prozentuale Anteil für «wb» (wood burning) auf der y-Achse wie in Abbildung 67.

8.8. Berechnung von Russemissionen aus dem Strassenverkehr

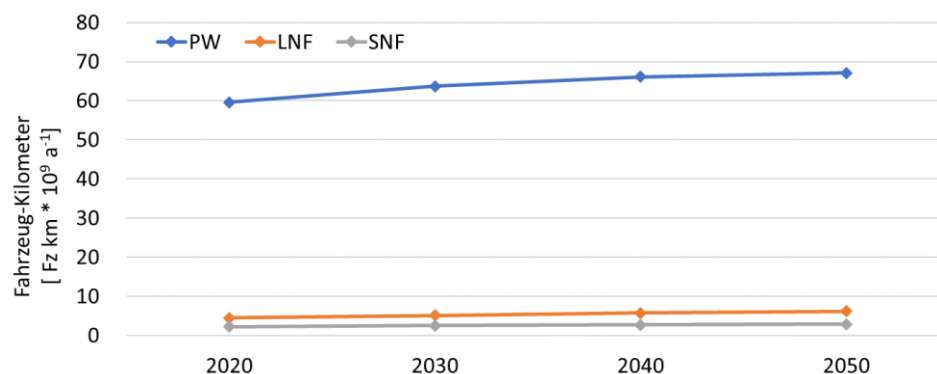


Abbildung 70: Entwicklung der Fahrzeugkilometer für Personenwagen (PW), leichte und schwere Nutzfahrzeuge (LNF und SNF) bis 2050 gemäss dem Bericht zu Energieperspektiven 2050+. ⁶⁰

⁶⁰ Bundesamt für Energie (2020). EP2050+. Technischer Bericht, Daten zu den Grafiken des technischen Berichts, Kapitel 1-7. Abbildung 7. <https://www.bfe.admin.ch/bfe/de/home/politik/energieperspektiven-2050-plus.html>. Letzter Besuch: 01.09.2022.

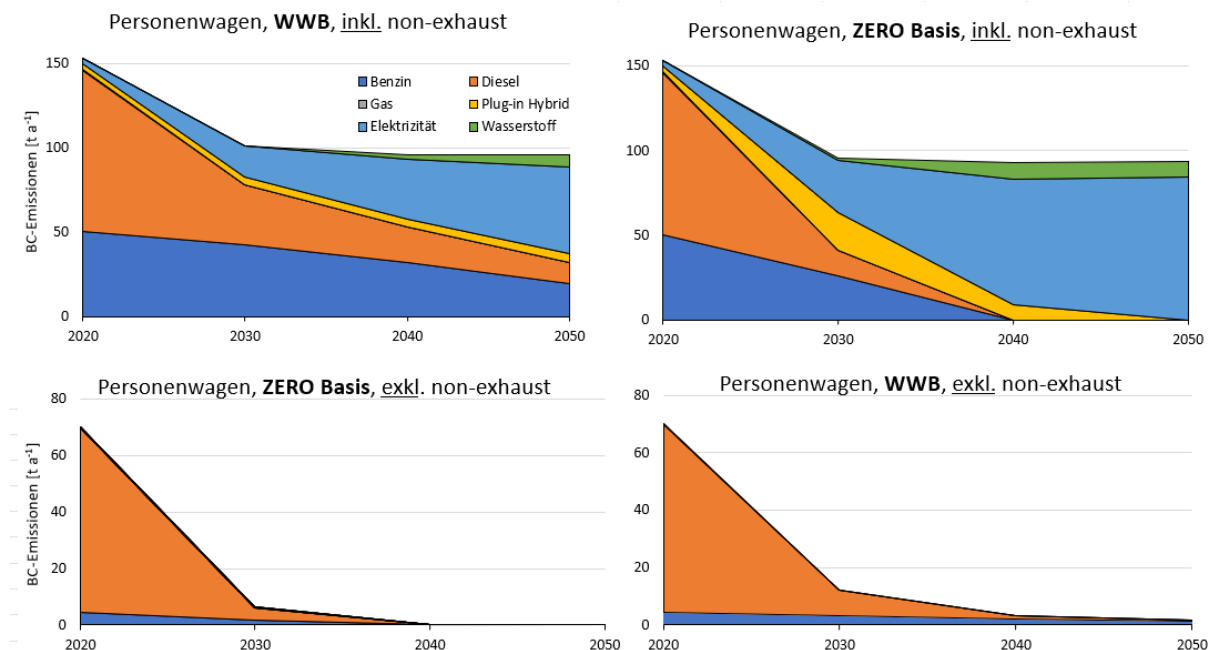


Abbildung 71: Berechnete BC-Emissionen bis ins Jahr 2050 für die beiden Szenarien «weiter wie bisher» (WWB) und ZERO-Basis sowie mit und ohne «non-exhaust» Emissionen für Personenwagen.

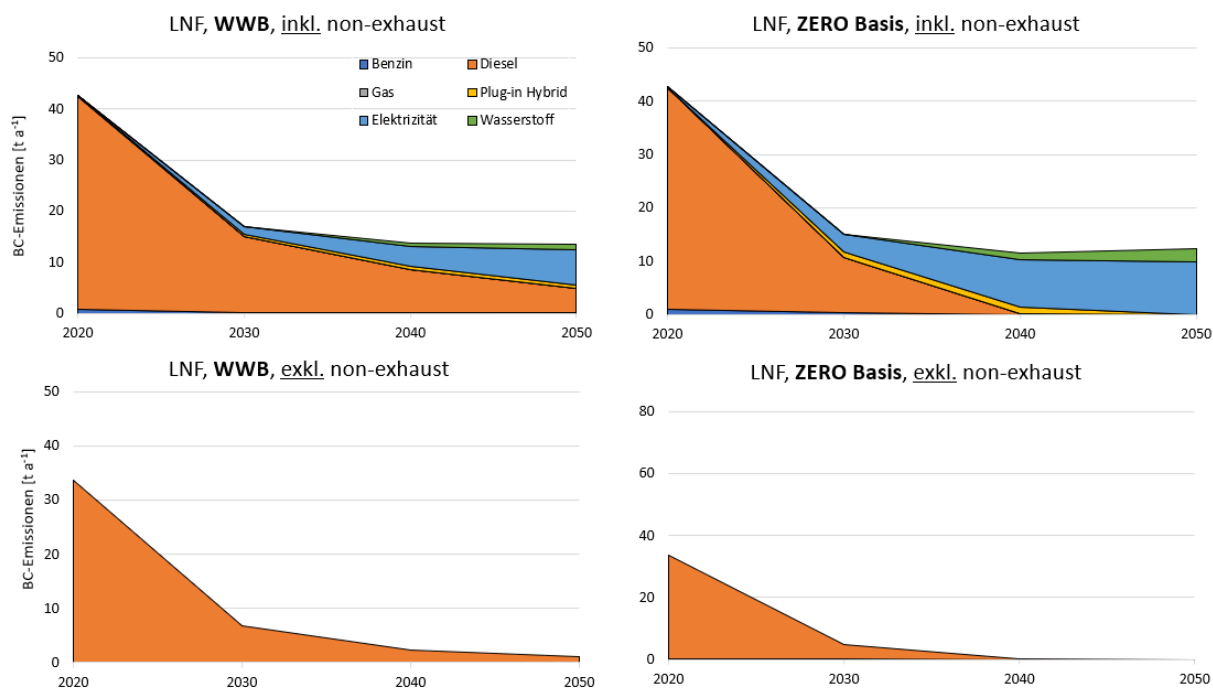


Abbildung 72: Berechnete BC-Emissionen bis ins Jahr 2050 für die beiden Szenarien «weiter wie bisher» (WWB) und ZERO-Basis sowie mit und ohne «non-exhaust» Emissionen für leichte Nutzfahrzeuge (LNF).

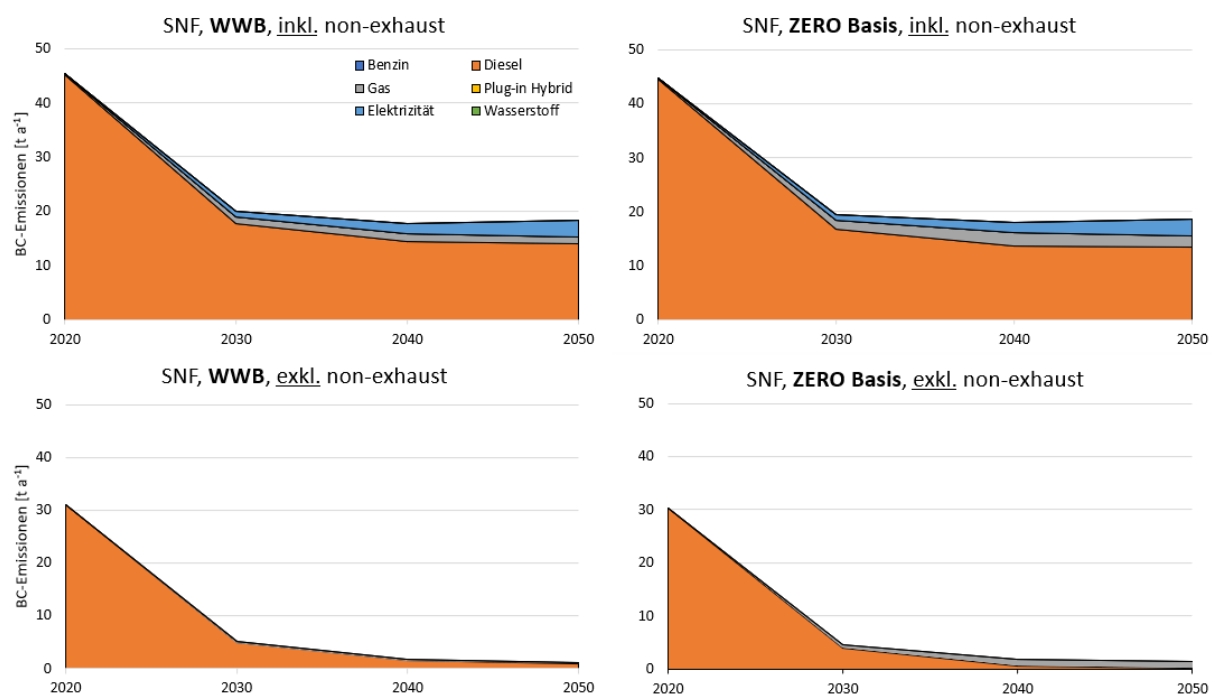


Abbildung 73: Berechnete BC-Emissionen bis ins Jahr 2050 für die beiden Szenarien «weiter wie bisher» (WWB) und ZERO-Basis sowie mit und ohne «non-exhaust» Emissionen für schwere Nutzfahrzeuge (SNF).

Tabelle 8: Exhaust und «non-exhaust» Russemissionen [g BC km⁻¹] für PW, LNF und SNF für die verschiedenen Antriebstypen bis 2050. Auszug aus dem HBEFA 4.1.

PW						
exhaust	Benzin	Diesel	Gas	PHEV	Elektrizität	Wasserstoff
2020	0.000133	0.003047	0.000193	0.000061	0.000000	0.000000
2030	0.000109	0.000486	0.000117	0.000028	0.000000	0.000000
2040	0.000096	0.000084	0.000103	0.000028	0.000000	0.000000
2050	0.000089	0.000070	0.000101	0.000028	0.000000	0.000000
non-exhaust	Benzin	Diesel	Gas	PHEV	Elektrizität	Wasserstoff
2020	0.001400	0.001400	0.001400	0.001400	0.001400	0.001400
2030	0.001400	0.001400	0.001400	0.001400	0.001400	0.001400
2040	0.001400	0.001400	0.001400	0.001400	0.001400	0.001400
2050	0.001400	0.001400	0.001400	0.001400	0.001400	0.001400
LNF - leichte Nutzfahrzeuge						
exhaust	Benzin	Diesel	Gas	PHEV	Elektrizität	Wasserstoff
2020	0.000223	0.008461	0.000191	NA	0.000000	0.000000
2030	0.000166	0.001695	0.000187	0.000053	0.000000	0.000000
2040	0.000155	0.000717	0.000188	0.000053	0.000000	0.000000
2050	0.000155	0.000572	0.000188	0.000053	0.000000	0.000000
non-exhaust	Benzin	Diesel	Gas	PHEV	Elektrizität	Wasserstoff
2020	0.002000	0.002000	0.002000	NA	0.002000	0.002000
2030	0.002000	0.002000	0.002000	0.002000	0.002000	0.002000
2040	0.002000	0.002000	0.002000	0.002000	0.002000	0.002000
2050	0.002000	0.002000	0.002000	0.002000	0.002000	0.002000
SNF						
exhaust	Benzin	Diesel	Gas	PHEV	Elektrizität	Wasserstoff
2020	NA	0.014178	0.001242	NA	0.000000	NA
2030	NA	0.002485	0.001263	NA	0.000000	NA
2040	NA	0.000725	0.001266	NA	0.000000	NA
2050	NA	0.000443	0.001267	NA	0.000000	NA
non-exhaust	Benzin	Diesel	Gas	PHEV	Elektrizität	Wasserstoff
2020	NA	0.006500	0.006500	NA	0.006500	NA
2030	NA	0.006500	0.006500	NA	0.006500	NA
2040	NA	0.006500	0.006500	NA	0.006500	NA
2050	NA	0.006500	0.006500	NA	0.006500	NA

8.9. Klassifizierung der Messstandorte

Der geografische Raum Zentralschweiz ist sehr vielfältig. Um dieser Vielfalt gerecht zu werden und dennoch repräsentative Aussagen für ähnlich strukturierte Gebiete zu erzielen, wird eine Standortklassifikation verwendet. So können die Messresultate einer einzelnen Messstation auf andere, ähnlich strukturierte Gebiete übertragen werden.

Neu gilt die aktuelle Klassifizierung gemäss den Messempfehlungen in «Immissionsmessung von Luftfremdstoffen, Anhang 4» (BAFU, 2021). Die Aggregationsart orientiert sich an den Bestimmungen der Europäischen Union (Entscheidung 97/101/EG des Rates sowie Entscheidung 2001/752/EG der Kommission).

Es werden zwei bzw. drei Kriterien berücksichtigt: (1) Die Stationsumgebung, (2) die Hauptemissionsquellen und für die ländlichen Hintergrundstationen (R_B) (3) die Entfernung zu bedeutenden Emissionsquellen. Diese Einteilung ergibt für jeden Messstandort einen zwei- bzw. dreistelligen alphanumerischen Code, durch den die Standorteigenschaften definiert sind.

Gesamthaft gibt es neun Klassen (U_T, U_I, U_B / S_T, S_I, S_B / R_T, R_I, R_B), wobei die ländlichen Hintergrundstationen (R_B) wie schon erwähnt nochmals in drei Unterkategorien eingeteilt werden. Weiter gibt es die Möglichkeit zur Feinklassierung der Verkehrsbelastung (A bis E) und zur Beschreibung der lokalen Ausbreitungssituation. Diese beiden Kriterien fliessen aber nicht in den Stationscode ein.

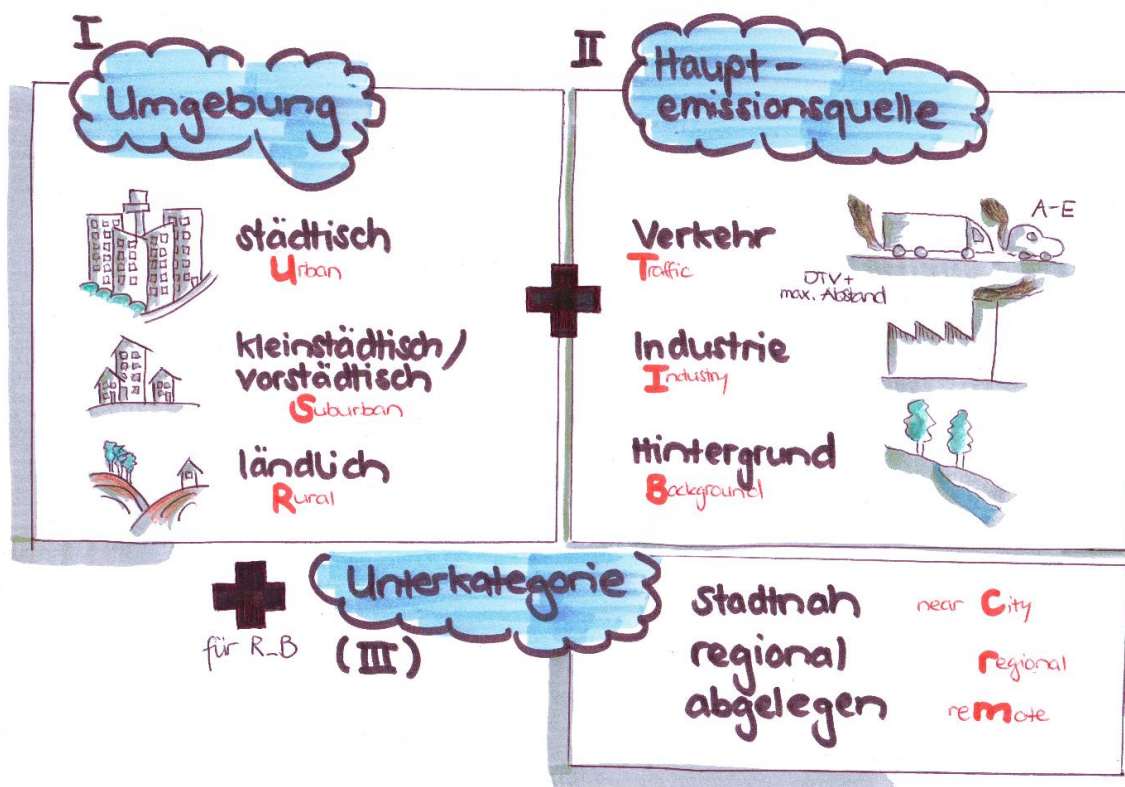


Abbildung 74: Grafische Darstellung der Kategorisierung der Messstandorte

Tabelle 9: Detaillierte Definition der Kategorisierung der Messstandorte

I Stationsumgebung	Definition
städtisches Gebiet (Urban)	- grössten Städte - durchgängig bebautes Gebiet - 1'500 Einwohner/km ² UND Gesamteinwohnerzahl >50'000
kleinstädtisches / vorstädtisches Gebiet (Suburban)	- kleine bis mittlere Einzelstädte oder Randgebiete der grössten Städte - überwiegend bebautes Gebiet - >300 Einwohner/km ² UND Gesamteinwohnerzahl >5'000
ländliches Gebiet (Rural)	- alle übrigen Gebiete, - <300 Einwohner/km ² ODER <5'000 Einwohner

II Haupt-Emissionsquelle	Definition
Verkehr (Traffic)	- maximaler Abstand zur Verkehrsachse (100 m UND DTV < 50'000) - zusätzliche Klasse zur Verkehrsbelastung (A-E bzw. «sehr gering» bis «sehr hoch»)
Industrie (Industry)	- dominierende Emissionen aus industriellen Prozessen und/oder Heizkraftwerken
Hintergrund (Background)	- keine dominierende Emissionsquelle - zusätzliche Unterkategorien in ländlicher Umgebung

(III) Unterkategorie	Definition
stadtnah (near city)	näher als 10 km vom Stadtrand UND weniger als 200 m Höhendifferenz
regional (regional)	10 – 50 km von bedeutenden Emissionsquellen entfernt ODER mehr als 200 m Höhendifferenz. –
abgelegen (remote)	mehr als 50 km von grossen Emittenten / Quellgebieten entfernt ODER mehr als 1000 m Höhendifferenz