

Immissionsmessungen in Ebnat-Kappel

Dorf mit hohem Anteil an Holzfeuerungen



Schlussbericht 2022

Abkürzungsverzeichnis

| | |
|--------------------------|---|
| BaP | Benzo(a)pyren |
| CO | Kohlenmonoxid |
| EC | Russ, Elementarer Kohlenstoff (elemental carbon) |
| EKL | Eidg. Kommission für Lufthygiene (EKL) |
| LRV | Eidgenössische Luftreinhalte-Verordnung (SR 814.318.142.1) |
| $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | Mikrogramm (Schadstoff) pro Kubikmeter (Luft) |
| NO | Stickstoffmonoxid |
| NO ₂ | Stickstoffdioxid |
| NO _x | Stickoxide (Summenparameter = NO ₂ + NO, bezogen auf NO ₂) |
| PAK | Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe |
| PM10 | Feinstaub Grössenklasse <10 μm |
| SMPS | Scanning mobility particle sizer |
| WHO | World Health Organization |

Impressum

| | |
|---------------|---|
| Herausgeber: | OSTLUFT – Die Luftqualitätsüberwachung der Ostschweizer Kantone und des Fürstentums Liechtenstein |
| Projektteam: | Hanna Herich, Dominik Noger, Susanne Schlatter |
| Auswertungen: | Hanna Herich, Susanne Schlatter |
| Kontakt: | OSTLUFT, sekretariat@ostluft.ch |
| Titelbild: | Standort Ebnat-Kappel Gillstrasse (roter Punkt), Kanton SG |
| Copyright: | © OSTLUFT, Abdruck mit Quellenangabe erwünscht |

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

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|--|----|
| 1 | Zusammenfassung | 4 |
| 2 | Ziele | 6 |
| 3 | Methodik | 6 |
| 3.1 | Standortbeschreibung | 6 |
| 3.2 | Standortklassierung | 7 |
| 3.3 | Messparameter | 8 |
| 4 | Ergebnisse | 8 |
| 4.1 | Windsituation | 8 |
| 4.2 | Luftschadstoffe | 9 |
| 4.2.1 | Übersicht und Grenzwerte | 10 |
| 4.2.2 | Feinstaub PM10, Tagesgänge | 11 |
| 4.2.3 | Russ (EC), Tagesgänge und Quellen | 12 |
| 4.2.4 | Stickstoffdioxid (NO ₂), Tagesgänge | 15 |
| 4.2.5 | Kohlenmonoxid (CO) | 16 |
| 4.2.6 | Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) | 17 |
| 4.3 | Luftschadstoffe und Emissionsquellen | 19 |
| 4.3.1 | Schadstoffausbreitung | 19 |
| 4.3.2 | Feinstaub in SMPS-Partikelgrößenklassen | 20 |
| 4.4 | Jahresgang und Inversionen | 21 |
| | Anhang Jahresgänge | 23 |

1 Zusammenfassung

Bereits in den Jahren 2010-2012 wurden in Ebnat-Kappel erste Luftqualitätsmessungen durchgeführt. Diese wiesen auf eine starke Belastung der Atemluft durch Abgase von Holzfeuerungen hin. Zwischen Januar 2020 und Dezember 2021 wurden erneute Messungen in Ebnat-Kappel durchgeführt. Die neuen Messungen zeigen, dass die Luftqualität in Ebnat-Kappel heute im Jahresmittel ähnlich wie an vergleichbaren ländlichen Siedlungs- oder Hintergrundstandorten ist. Die winterlichen Schadstoffkonzentrationen durch kanzerogenem Russ, Nanopartikel und Benzo(a)pyren sind aufgrund der Emissionen aus Holzfeuerungen noch immer überdurchschnittlich hoch.

Das Dorf Ebnat-Kappel liegt auf 630 m ü. M. in einem ebenen Talkessel im Toggenburg und hat einen hohen Anteil an Holzfeuerungen. In den Jahren 2010-2012 wurden bereits Immissionsmessungen im Ort durchgeführt. Die Resultate zeigten deutlich den Einfluss von Holzfeuerungsmissionen auf die Luftbelastung.

Grenzwerte im Jahresmittel klar eingehalten

Die Jahresmittel-Grenzwerte wurden in Ebnat-Kappel für NO₂, CO, PM10 und PM2.5 deutlich eingehalten. Die Belastung durch Feinstaub PM10 lag aufgrund von Saharastaubereignissen im Jahr 2021 mehrmals über dem Tagesmittel-Grenzwert. Ozon überschreitet während der Sommermonate in Ebnat-Kappel die Grenzwerte. Im Vergleich zu anderen ländlichen Ostschweizer Siedlungsstandorten ist die Belastung in Ebnat-Kappel damit vergleichbar.

Luft sauberer als vor zehn Jahren

Die NO₂ Belastungen in Ebnat-Kappel sind seit 2011 um rund ein Viertel gesunken. Auch die Feinstaubbelastungen für PM10 sanken deutlich und lagen 2021 rund ein Drittel tiefer als 2011. Die Abnahme beider Schadstoffe verlief proportional zu den anderen Standorten in der Ostschweiz.

In den letzten zehn Jahren sind die Russimmissionen in der ganzen Ostschweiz massiv gesunken, besonders seit Einführung der Dieselpartikelfilter. In Ebnat-Kappel sanken die Konzentrationen seit 2011 mit rund 45% jedoch viel weniger, als an den verkehrsbelasteten Standorten. 2020/ 2021 waren die Russbelastungen somit gleich hoch wie an stark verkehrsbelasteten Standorten.

Höchste Belastungen im Winter

Auffällig ist in Ebnat-Kappel der grosse Unterschied der Belastungen im Jahresverlauf. Besonders für Schadstoffe wie Russ (EC) oder feinste Nanopartikel sind im Winter massive Anstiege zu beobachten. Analysen zeigen, dass rund 70% der winterlichen Russpartikel aus Holzfeuerungen stammen. Während einzelner Wintermonate sind die mittleren Russkonzentrationen in Ebnat-Kappel höher als in der Stadt Zürich oder an Autobahnstandorten im OSTLUFT-Gebiet.

In Ebnat-Kappel wurde auch der Gehalt von zehn verschiedenen PAK im Feinstaub bestimmt. Den Hauptbeitrag zur Toxizität lieferte das kanzerogene Benzo(a)pyren, welches mehrheitlich durch Holzfeuerungen emittiert wird. Die Belastung ist im Verhältnis zu anderen Schweizer Standorten massiv erhöht und hat seit den früheren Messungen überhaupt nicht abgenommen. Ähnliche Konzentrationen wurden schweizweit bisher nur in schlecht durchlüfteten Gebieten im Misox und Muotathal gemessen.

2 Ziele

Das Dorf Ebnat-Kappel mit rund 5'000 Einwohnern liegt auf 630 m ü. M. in einem ebenen Talkessel im Toggenburg. In der Ortschaft gibt es sechs grosse Holzschneitzelheizungen, von denen die vier bereits vor Beginn der Messungen 2020 ersetzt oder saniert worden sind (z.B. mit Elektrofiltern), sowie über 1000 kleine Holzfeuerungen. Bei den Messungen in Ebnat-Kappel standen folgende Fragestellungen im Vordergrund:

- Wie ist die lufthygienische Situation in Ebnat-Kappel, stellvertretend für ein Dorf mit einem hohen Holzfeuerungsanteil mit Tallage? Wie hat sich die Luftqualität im Vergleich zu früheren Messungen in Ebnat-Kappel (2010-2012) verändert?
- Wie ist der Einfluss der technischen Modernisierungen der Holzschneitzelheizungen im Ort, Vergleich Vorher-/ Nachhersituation mit Fokus auf die Russ- und Feinstaubbelastung?
- Wie unterscheidet sich die Belastungssituation in Ebnat-Kappel von der Hintergrundbelastung am nahegelegenen Höhenstandort Wald Höhenklinik sowie von anderen Messorten im Ostluft-Gebiet mit Belastungen durch Holzfeuerungen?

3 Methodik

3.1 Standortbeschreibung

Die Position des Messcontainers in Ebnat-Kappel befand sich innerhalb des Dorfzentrums auf dem Parkplatzgelände an der Gillstrasse (siehe Abb.1). Die Station wurde von Januar 2020 bis Dezember 2021 betrieben. Auch die früheren Messungen in Ebnat-Kappel (2010-2021) fanden an der Gillstrasse statt, jedoch rund 100 m südlich Richtung Kappelerstrasse.

In Abb. 2 sind der Messstandort, sowie das Gebiet eingezeichnet, in welchem Temperatursensoren zur Erfassung von bodennahen Inversionswetterlagen eingesetzt wurden. Rund 14 km westlich von Ebnat-Kappel befindet sich die OSTLUFT-Hintergrund-Messstation Wald Höhenklinik, die nachfolgend für Vergleiche herangezogen wird.



Abb. 1: Standort Ebnat-Kappel

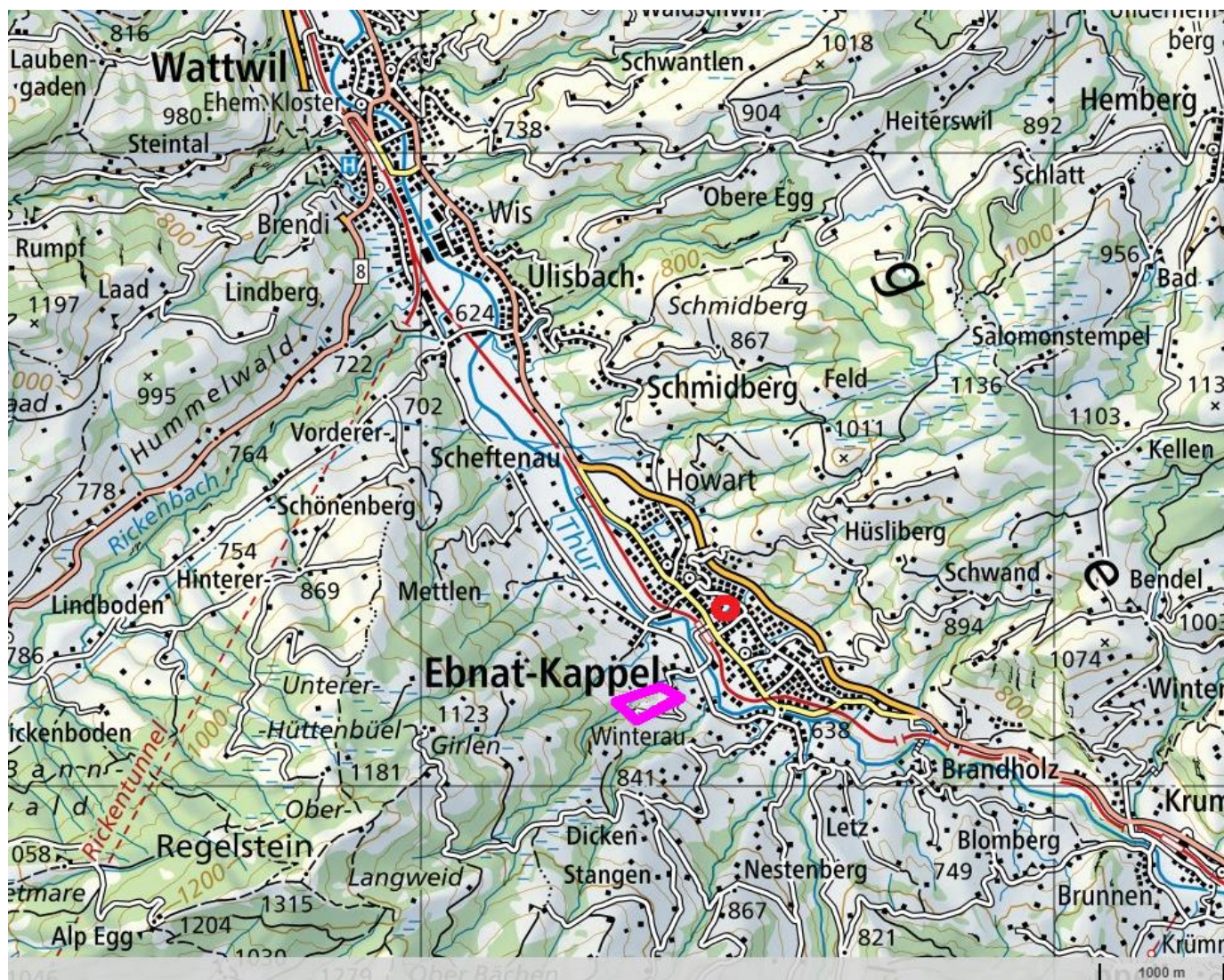


Abb. 2: Übersichtskarte Ebnet-Kappel im Toggenburg, Messstandorte: Kreis Rot „Ebnet-Kappel Gillstrasse“, Fläche in Pink: Gebiet in dem sechs Sensoren zur Erfassung der Temperatur eingesetzt wurden.

3.2 Standortklassierung

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

| Standort | m ü.M. | Standorttyp |
|------------------------------|--------|-------------|
| Ebnet-Kappel, Gillstrasse | 630 | |
| Wald Höhenklinik | 910 | |
| Vaduz, Landesbibliothek (FL) | 455 | |
| Zürich, Stampfenbachstrasse | 445 | |
| Opfikon, Balsberg | 430 | |

Tab.1: OSTLUFT Standortklassierungs-Piktogramme. Eine genaue Beschreibung der Standorttypen unter: www.ostluft.ch.

3.3 Messparameter

| | | Jahr 2020 | | | | | | | | | | | | Jahr 2021 | | | | | | | | | | | |
|---------------------------------|---|-----------------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|-----------------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | N | D |
| Ebnat-Kappel Gillstrasse | Gas: NO _x , O ₃ CO Aerosol: PM10 und PM2.5 Hivol, Fidas Aethalometer EC2.5 SMPS Meteo: T, p, Hr, Wind, Regen, StrGlo | [Measurement data for 2020] | | | | | | | | | | | | [Measurement data for 2021] | | | | | | | | | | | |
| Wald Höhenlinik | Gas: O ₃ , NO ₂ Passivsammler Aerosol: PM10 Hivol, Fidas Meteo: T, p, Hr, Wind usw. | [Measurement data for 2020] | | | | | | | | | | | | [Measurement data for 2021] | | | | | | | | | | | |

Tab. 2: Messeinsatz der Messgeräte an den Stationen

Tab. 2 zeigt den Einsatz der Messgeräte in Ebnat-Kappel und Wald Höhenlinik. Die Messreihen aller Geräte wurden mit der der Jahreszeit entsprechenden Sommer- bzw. Winterzeit berechnet und sind daher miteinander vergleichbar.

4 Ergebnisse

4.1 Windsituation



Abb.3: Windrose für Ebnat-Kappel (2020/21), Windgeschwindigkeit ws in [m/s].

Abb. 3 zeigt die ganzjährige Windrosen für den Standort Ebnat-Kappel. Die Ausrichtung des Tals verläuft in diesem Teil des Toggenburgs grob von Nordwest/West nach Ost/Südost. Der Wind ist durch die Tallage kanalisiert und verläuft jeweils parallel zu den Berghängen. Die Windgeschwindigkeiten im Ort liegen überwiegend unter 0.5 m/s und sind damit sehr gering. Grund dafür ist die Lage am Hangfuss.

Abb.4 (links) zeigt die Auftrittshäufigkeit der Windrichtungen in Abhängigkeit von der Tageszeit am Standort Ebnat-Kappel Gillstrasse. Nachts weht der Wind meist aus Ost/Südost und resultiert aus den Talabwinden.

Tagsüber weht der Wind aus Nord/Nordwest. Die Windrichtungen wurden separat für Sommer und Winter analysiert. Der jahreszeitbedingte Unterschied im Tagesverlauf ist dabei gering: Im Winter ist der Tagesverlauf etwas schwächer ausgeprägt und es gibt eine leichte zeitliche Verschiebung (Nordwestwind von 10-16 Uhr statt wie im Sommer von 8-17 Uhr). In Abb. 4 (rechts) ist die Auftrittshäufigkeit der Windgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Tageszeit dargestellt. Nachts treten die niedrigsten (meist unter 0.25 m/s) und tagsüber die höchsten Windgeschwindigkeiten (0.25 – 0.5 m/s) auf.

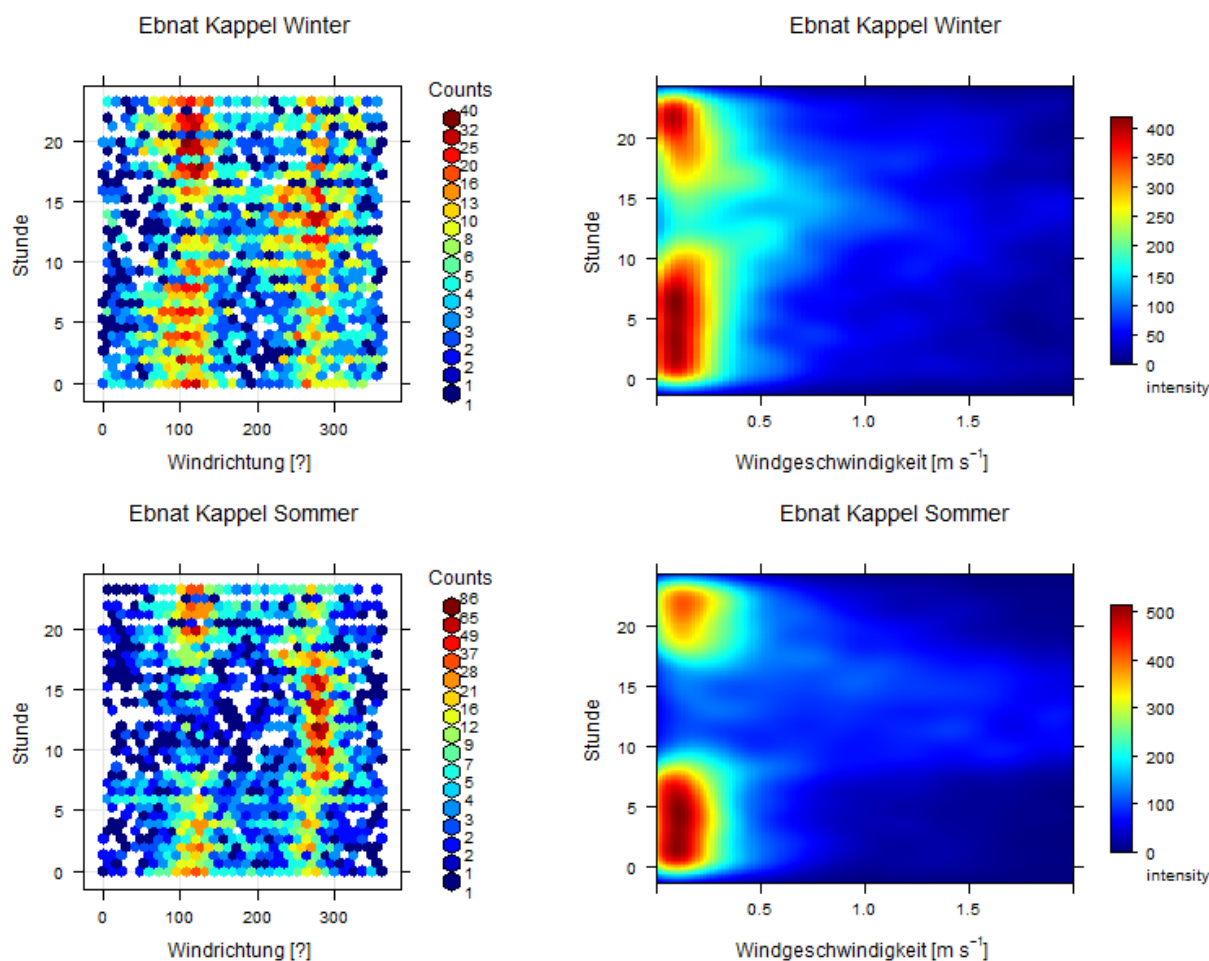


Abb. 4: Links: Durchschnittliche Auftrittshäufigkeit der Windrichtungen in Abhängigkeit von der Tageszeit, Winter (oben) und Sommer (unten). Rechts: Durchschnittliche Auftrittshäufigkeit der Windgeschwindigkeiten in Abhängigkeit von der Tageszeit (farbkodiert interpolierte Intensität der Messdatenpunkte), Winter (oben) und Sommer (unten).

4.2 Luftschadstoffe

Nachfolgend werden die Immissionen der Jahre 2020 und 2021 betrachtet. Dabei muss berücksichtigt werden, dass die Verkehrszahlen während des Lockdowns (Sars-CoV-2 Pandemie) im Frühling 2020 zeitweilig verringert waren. Parallel zum reduzierten Verkehrsaufkommen sanken auch die Stickstoffdioxid-Belastungen, insbesondere an Strassenstandorten. Zudem war das Jahr 2020 sehr mild und stürmisch, so

dass auch die Russbelastung und die Feinstaubbelastung verhältnismässig tief waren. Im OSTLUFT-Gebiet lagen die NO₂-Jahresmittelwerte 2020 an Hintergrundstandorten wie Ebnat-Kappel, knapp 10% und an den verkehrsbeeinflussten Messstandorten rund 15% tiefer als im Vorjahr. 2021 war das Verkehrsaufkommen wieder im "Normalzustand".

4.2.1 Übersicht und Grenzwerte

Abb. 5 zeigt die Jahresmittelwerte für 2020-2021 von NO₂, Feinstaub PM10 und PM2.5, CO, Russ EC2.5 (elemental carbon) und Ozon an den Messstationen in Ebnat-Kappel. Für NO₂, PM10, PM2.5 und CO liegen Immissionsgrenzwerte gemäss LRV vor. Die NO₂ Konzentrationen liegen mit 10 µg/m³ deutlich unter dem Jahresmittelgrenzwert von 30 µg/m. Die PM10 Konzentrationen liegen mit 11 µg/m³ ebenfalls deutlich unter dem Grenzwert von 20 µg/m³ im Jahresmittel. Auch für PM2.5 liegen die Belastungen mit 8 µg/m³ unter dem Jahresmittelgrenzwert von 10 µg/m³. Die Russbelastung ist mit etwa 0.5 µg/m³ deutlich höher als der Richtwert der EKL von 0.1 µg/m³. Der Jahresmittelwert für CO lag 2021 bei 0.27 µg/m³.

Weitere Immissionsgrenzwerte gemäss LRV für 24h-Mittelwerte (dürfen höchstens einmal pro Jahr überschritten werden) sind für NO₂: 80 µg/m³, PM10: 50 µg/m³ und CO: 8 µg/m³. Die Tagesmittelgrenzwerte für NO₂ und CO wurden im gesamten Messzeitraum eingehalten. Der Tagesmittelgrenzwert für PM10 wurde 2020 eingehalten, 2021 gab es drei Überschreitungen. Grund dafür waren zwei starke Saharastaubepisoden im Februar 2021. Saharastaubpartikel gehören zur gröberen Fraktion des Feinstaubs PM10 (siehe Anhang, Abb. A8).

Für Ozon wurden maximale Stundenmittelwerte zwischen 141 und 156 µg/m³ gemessen. Der Stundenmittelgrenzwert von 120 µg/m³ wurde während 147 Stunden (2020) und 99 Stunden (2021) überschritten. Die Unterschiede lassen sich durch die Witterung erklären. Der Sommer 2020 war sehr sonnig, der 2021 hingegen sehr niederschlagsreich.

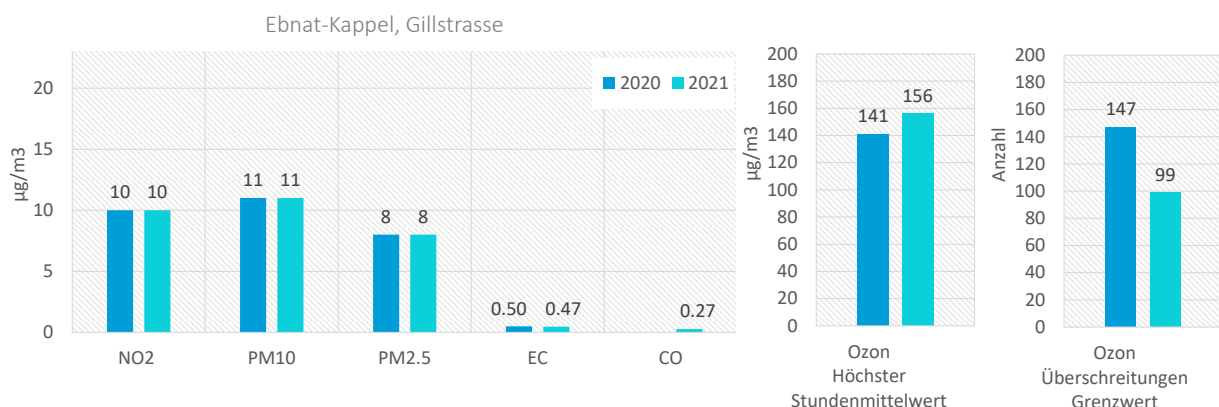


Abb. 5: Links: Jahresmittelwerte für NO₂, PM10, PM2.5, EC und CO in Ebnat-Kappel für die Jahre 2020/21. Rechts: Höchster Stundenmittelwert Ozon und Anzahl Stunden über dem Kurzzeitgrenzwert von 120 µg/m³ in Ebnat-Kappel.

In Abb. 6 sind die Jahresmittelwerte aus Ebnat-Kappel für NO₂, PM₁₀ und EC im Vergleich zu weiteren Messorten im OSTLUFT-Gebiet, Wald Höhenklinik, Zürich Stampfenbachstrasse, und Opfikon Balsberg dargestellt. Da die Messungen im Zeitraum 2010-2012 in Ebnat-Kappel nur das Kalenderjahr 2011 vollständig abdecken, ist in den nachfolgenden Abbildungen nur dieser Jahresmittelwert abgebildet.

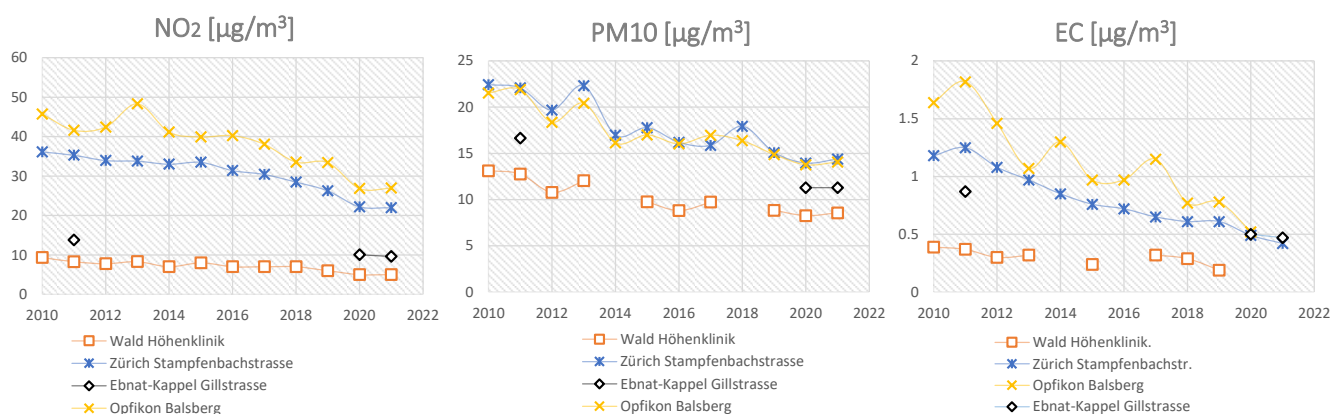


Abb. 6: Langjährige Reihen der Jahresmittelwerte (nur vollständige Messjahre) für NO₂, PM₁₀ und EC an Standorten in Ebnat-Kappel, Wald Höhenklinik, Zürich und Opfikon soweit vorhanden (EC: teilweise unvollständige Messreihe).

Die NO₂ Belastungen in Ebnat-Kappel sind seit 2011 um rund ein Viertel gesunken und lagen 2021 bei 10 µg/m³, das ist etwa doppelt so hoch wie am Standort Wald Höhenklinik. Auch die Feinstaubbelastungen für PM₁₀ sanken in den letzten 10 Jahren deutlich. Während 2010 in Ebnat-Kappel noch 17 µg/m³ gemessen wurden, sind die Belastungen heute mit 11 µg/m³ rund ein Drittel tiefer. Die Abnahme verlief proportional zu den anderen Standorten in der Ostschweiz. Die Konzentrationen am Hintergrundstandort Wald Höhenklinik lagen 2021 bei rund 9 µg/m³.

Die EC Belastungen in Ebnat-Kappel lagen 2020/ 2021 bei rund 0.5 µg/m³. Dies entspricht der Konzentration an den verkehrsbelasteten Standorten Zürich Stampfenbachstrasse und Opfikon Balsberg. In den letzten zehn Jahren sind die Immissionen in der ganzen Ostschweiz massiv gesunken, besonders seit Einführung der Dieselpartikelfilter. Am Autobahnstandort Opfikon Balsberg sanken die Konzentrationen um 75%, im durch Holzfeuerungen belasteten Ebnat-Kappel jedoch nur um rund 45%. Dies zeigt deutlich den grossen Einfluss der Holzfeuerungen auf die Luftbelastung in Ebnat-Kappel.

Kappel lagen 2020/2021 bei rund 0.5 µg/m³. Dies entspricht der Konzentration an den verkehrsbelasteten Standorten

4.2.2 Feinstaub PM₁₀, Tagesgänge

Abb. 7 zeigt die Feinstaubkonzentrationen PM₁₀ in Ebnat-Kappel für alle Jahreszeiten in verschiedener Zeitauflösung. Die Hintergrundbelastung liegt bei rund 9 µg/m³. Je nach Jahreszeit und Uhrzeit nimmt die Feinstaubbelastung weiter zu: Im Winter bewegen sich die Konzentrationen zwischen 12 und 17 µg/m³ und

liegen im Tagesmittel bei $13 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Im Sommer liegen die Konzentrationen zwischen $9\text{-}10 \mu\text{g}/\text{m}^3$, ebenso der Tagesmittelwert. Die Konzentrationsunterschiede zwischen Sommer und Winter lassen sich durch die unterschiedliche Grenzschichthöhe und das Auftreten von Bodeninversionen erklären. Die höchsten PM10 Konzentrationen werden ganzjährig während der Hauptverkehrszeiten erreicht. Die nächtliche Abnahme lässt sich durch Berg- oder Hangabwinde und abendliche Kaltluftabflüsse erklären, wie sie häufig in Tälern auftreten. Der Wochengang zeigt eine leichte Konzentrationssteigerung über die Werkstage und eine Abnahme über das Wochenende.

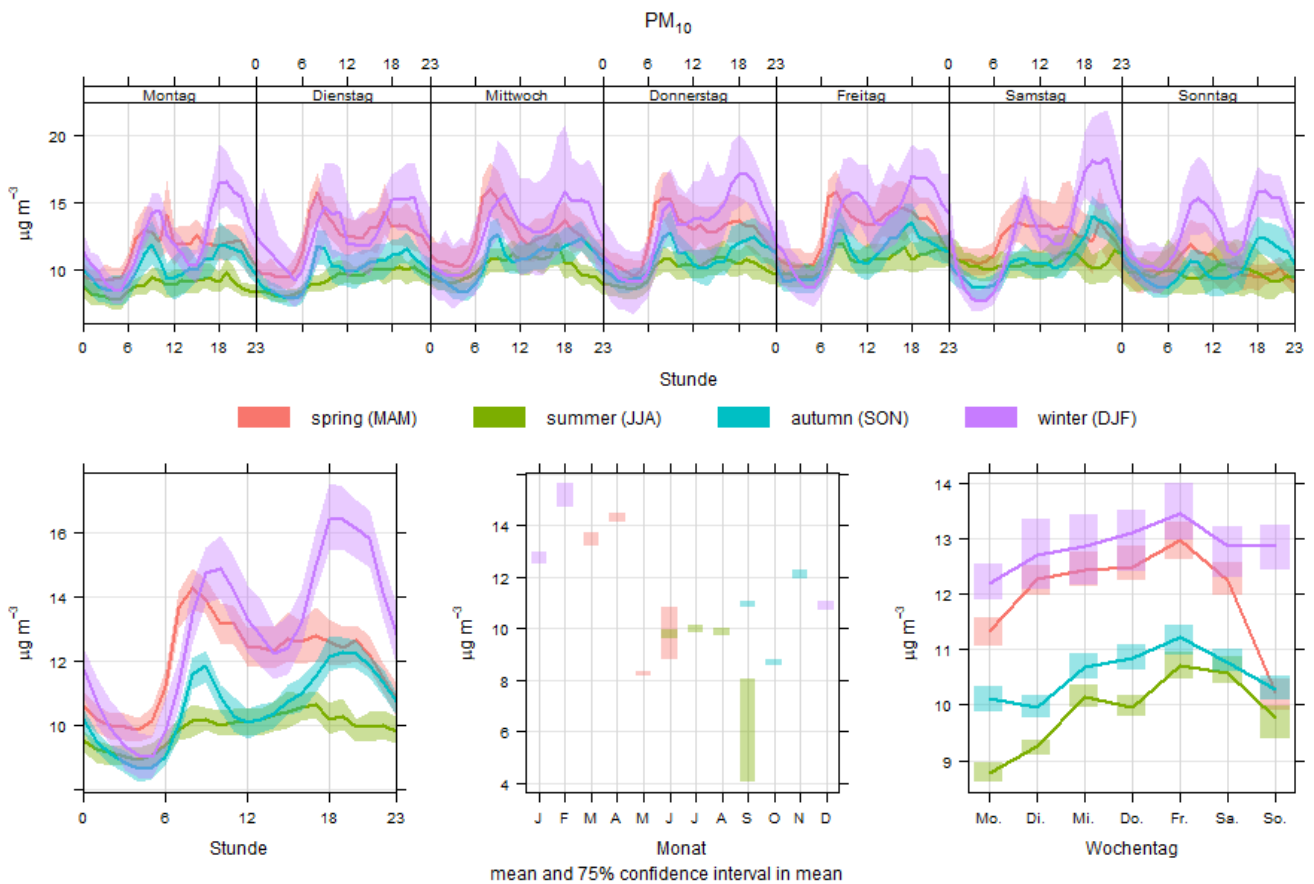


Abb. 7: Vergleich der PM10-Belastung in Ebnat-Kappel, mittlerer Wochengang in Stundenauflösung (oben), Tagesgang (unten links), Jahresgang (unten Mitte) und Wochengang in Tagesauflösung (unten rechts).

4.2.3 Russ (EC), Tagesgänge und Quellen

Als Russ wird der elementare Kohlenstoff (EC) im Feinstaub bezeichnet, dieser ist krebserregend (WHO, 2012). Die Hauptquellen für Russ sind das Verbrennen von Treibstoff (Verkehr) sowie Holzheizungen. Der Richtwert für Russ gemäss EKL liegt bei $0.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ im Jahresmittel.

In Ebnat-Kappel wurde ein Aethalometer zur kontinuierlichen Messung von Russ eingesetzt. Die Messdaten optischer Messverfahren (wie auch des Aethalometers) messen schwarzen Kohlenstoff (BC, black carbon)

und werden basierend auf parallelen EC-Vergleichsmessungen (thermochemische Messungen, Referenzverfahren) in EC umgerechnet. Dieses Verfahren hat sich schweizweit und international etabliert. In den nachfolgenden Abbildungen werden alle Russmessungen als EC bezeichnet.

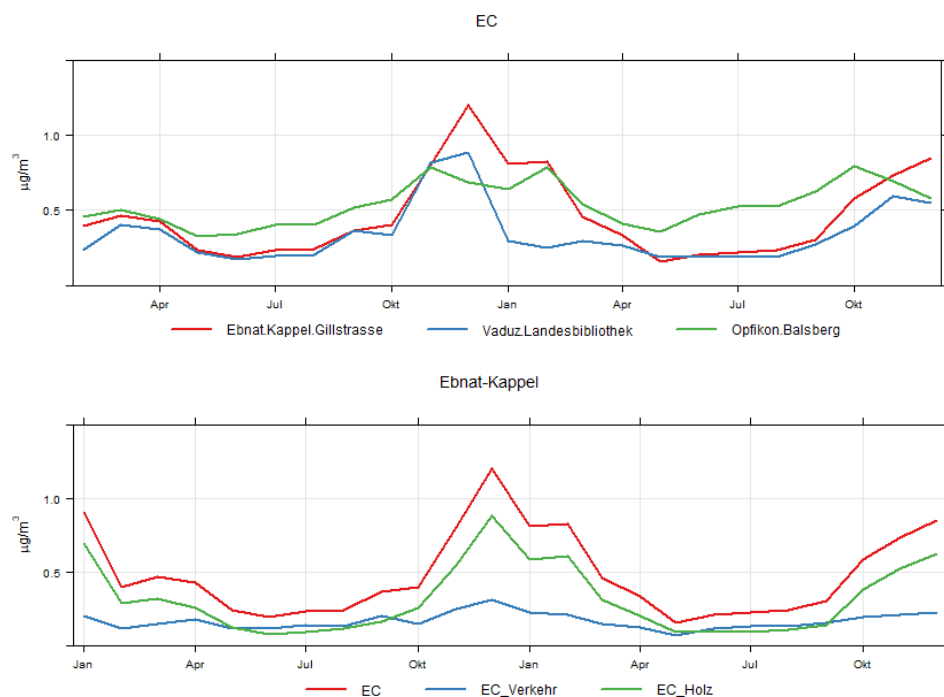


Abb. 9: Oben: Monatsmittel 2020/2021 der EC-Konzentrationen in Ebnat-Kappel, Vaduz Landesbibliothek und Opfikon Balsberg.. Unten: Monatsmittel der EC-Konzentrationen in Ebnat-Kappel, aufgeteilt nach Quellen (Gesamtes EC, EC Anteil Verkehr und EC Anteil Holz).

Aethalometer messen die Russbelastung parallel mit verschiedenen Wellenlängen (von nahem UV bis nahem Infrarot). Da Russ aus Holzfeuerungen und Dieselmotoren mit unterschiedlichen PAKs behaftet ist, absorbieren die Russpartikel dieser beiden Quellen je nach Wellenlänge unterschiedlich stark. Somit kann eine ungefähre Quellenzuordnung für EC (Holzfeuerungen versus Dieselmotoren) vorgenommen werden¹. Nachfolgend werden diese Russbeiträge als EC_{Holz} und EC_{Verkehr} bezeichnet.

Die Messungen aus Ebnat-Kappel werden nachfolgend mit anderen Standorten verglichen: Für die Stationen Vaduz Landesbibliothek und Opfikon Balsberg liegen ebenfalls kontinuierliche EC Messungen vor (MAAP Messgerät, PM_{2.5}, in Vaduz bis 2020 Betastaubmeter PM₁₀), diese erlauben jedoch keine Quellenaufteilung.

¹ Quellenzuordnung analog zu: Zotter, et al. (2017). Evaluation of the absorption Ångström exponents for traffic and wood burning in the Aethalometer-based source apportionment using radiocarbon measurements of ambient aerosol. Atmospheric Chemistry and Physics, 17(6), 4229-4249.

<https://doi.org/10.5194/acp-17-4229-2017>

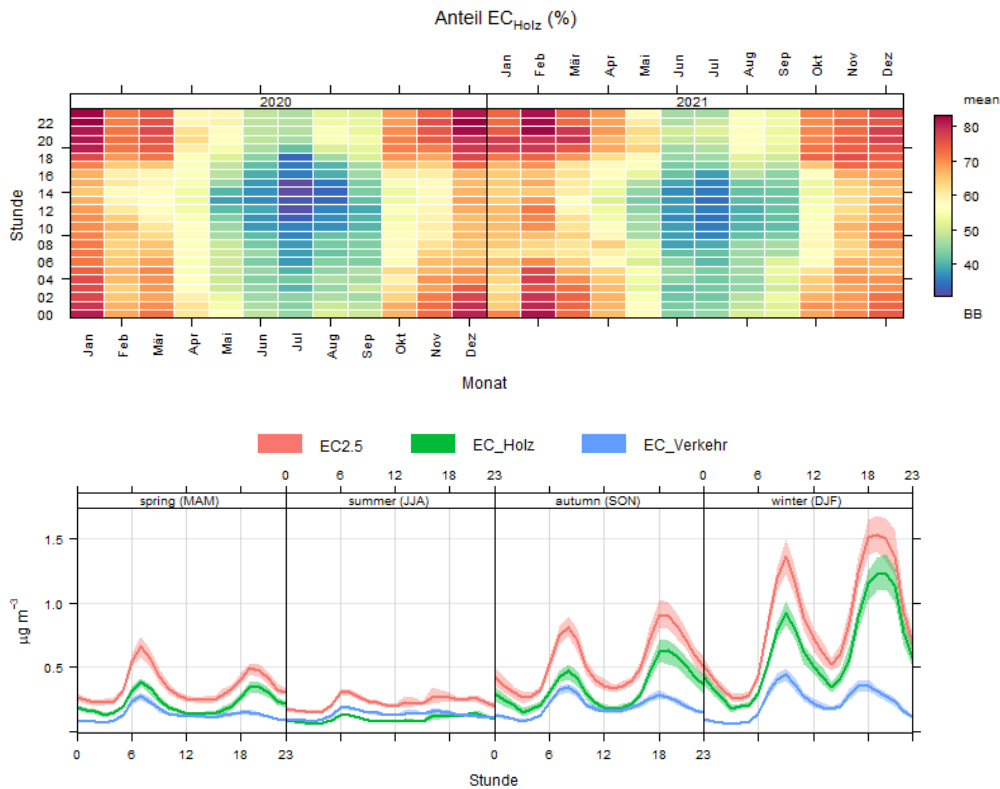


Abb. 10: Oben: Mittlerer Beitrag von EC_{Holz} zur EC -Konzentration in Abhängigkeit von der Jahres- und Uhrzeit. **Unten:** Tagesgänge der EC -Konzentrationen in Ebnat-Kappel (gesamtes EC , EC Anteil Holz und EC Anteil Verkehr) nach Jahreszeit.

Abb. 9 (oben) zeigt die EC Belastung als Monatsmittel in Ebnat-Kappel im Vergleich zu Vaduz Landesbibliothek und Opfikon Balsberg². Der Autobahnstandort in Opfikon repräsentiert dabei einen ausschliesslich durch Verkehr geprägten Standort (vergl. Abb. 6). Der Standort Vaduz repräsentiert einen dörflichen Hintergrund im Rheintal. Alle drei Standorte zeigen einen ausgeprägten Jahresgang mit höchsten Konzentrationen im Winter und tiefen Konzentrationen im Sommer, dies lässt sich wie beim Feinstaub durch die unterschiedliche Grenzschichthöhe und Bodeninversionen im Tal erklären. Im Sommer sind die Konzentrationen an den Standorten Ebnat-Kappel und Vaduz fast gleich und nur halb so hoch wie am Autobahnstandort Opfikon Balsberg. Im Winter liegen die Belastungen in Ebnat-Kappel hingegen deutlich höher als in Vaduz und übertreffen sogar die am Autobahnstandort in Opfikon. Dies zeigt, dass in Ebnat-Kappel im Winter die Holzfeuerungen die Hauptquelle für Russ sind. Abb. 9 (unten) zeigt den Monatsgang der Russanteile aus dem Verkehr und der Holzverbrennung. Im Winter stammen rund drei Viertel des Russes aus den Holzfeuerungen.

² Quellenzuordnung: Die EC Konzentration in den Grössenfraktionen $PM_{2.5}$ und PM_{10} ist nicht identisch, aber an Strassenstandorten sehr ähnlich. In Bezug auf den Stationsvergleich in Abb. 9 (oben) wird auf eine Umrechnung/Korrektur verzichtet, da sich die Werte kaum verändern würden und die Aussagen gleichbleiben.

In Abb. 10 (oben) ist der mittlere Anteil von Russ aus Holzfeuerungen in Ebnat-Kappel in Abhängigkeit von der Tages- und Jahreszeit dargestellt. Im Winter wird die Mehrheit des Russes aus Holzverbrennungen emittiert, abends beträgt der Anteil durchschnittlich mehr als 80%. Im Sommer liegt der Anteil des Russes aus Holzverbrennungen unter 40%. Die absoluten EC Belastungen als mittlerer Tagesgang nach Jahreszeit sind in Abb. 10 (unten) dargestellt. Die Konzentrationen von EC_{Holz} und EC_{Verkehr} sind im Winter deutlich höher als im Sommer (Gründe sind Grenzschichthöhe, Bodeninversionen, s.o.). Die Belastung durch EC_{Holz} steigt aber im Vergleich zum EC_{Verkehr} überproportional stark an, das verdeutlicht erneut den zusätzlichen Anteil der Holzfeuerungen im Winter. Der Tagesgang von EC_{Holz} und EC_{Verkehr} mit Peaks am Morgen und am Abend ist ähnlich, aber etwas zeitversetzt. Während EC_{Verkehr} am Abend eher vor 18 Uhr ansteigt, treten die höchsten Konzentrationen von EC_{Holz} erst am späteren Abend auf. Über den gesamten Messzeitraum lag der Beitrag der Holzfeuerungen zur EC-Belastung bei 71% im Winter und 43% im Sommer. Der Verkehrsbeitrag lag bei 29% respektive 57%, siehe Abb. 11.

In Abb. A7 im Anhang ist der Verlauf von EC im Vergleich zu den anderen Schadstoffen (normiert) in verschiedenen Zeitaufösungen dargestellt.

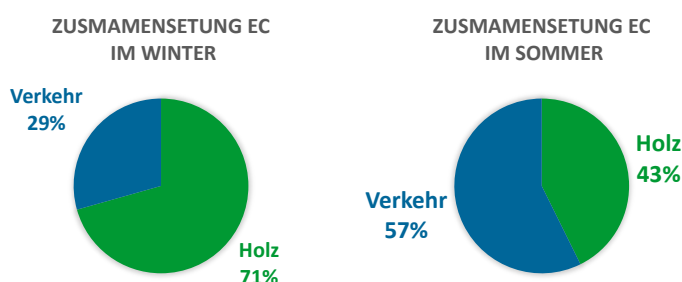


Abb. 11: Durchschnittlicher Beitrag der Quellen Holz und Verkehr zur EC-Konzentration in Ebnat-Kappel im Winter und Sommer.

4.2.4 Stickstoffdioxid (NO_2), Tagesgänge

In Abb. 12 sind die NO_2 -Konzentrationen in Ebnat-Kappel Gillstrasse in verschiedenen Zeitaufösungen dargestellt. Ganzjährig ist der stark verkehrsabhängige Tagesverlauf mit den höchsten Konzentrationen während der Hauptverkehrszeiten erkennbar. Die Konzentrationen folgen einem Wochengang, am Wochenende sind die Konzentrationen deutlich geringer als an Werktagen. Im Monatsmittel bewegen sich die NO_2 Konzentrationen bei bis zu $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ im Sommer und $10\text{-}20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ im Winter. Die Tageshöchstwerte liegen während der Hauptverkehrszeiten durchschnittlich bei $9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ im Sommer und $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ im Winter. Im Sommer ist der morgendliche Hauptverkehrspeak am stärksten ausgeprägt, im Winter sind der morgendliche und abendliche Hauptverkehrspeak etwa gleich hoch. Ein Grund dafür sind die Windgeschwindigkeiten (vergl. Abb. 4), im Sommer ist das Tal abends besser durchlüftet als im Winter.

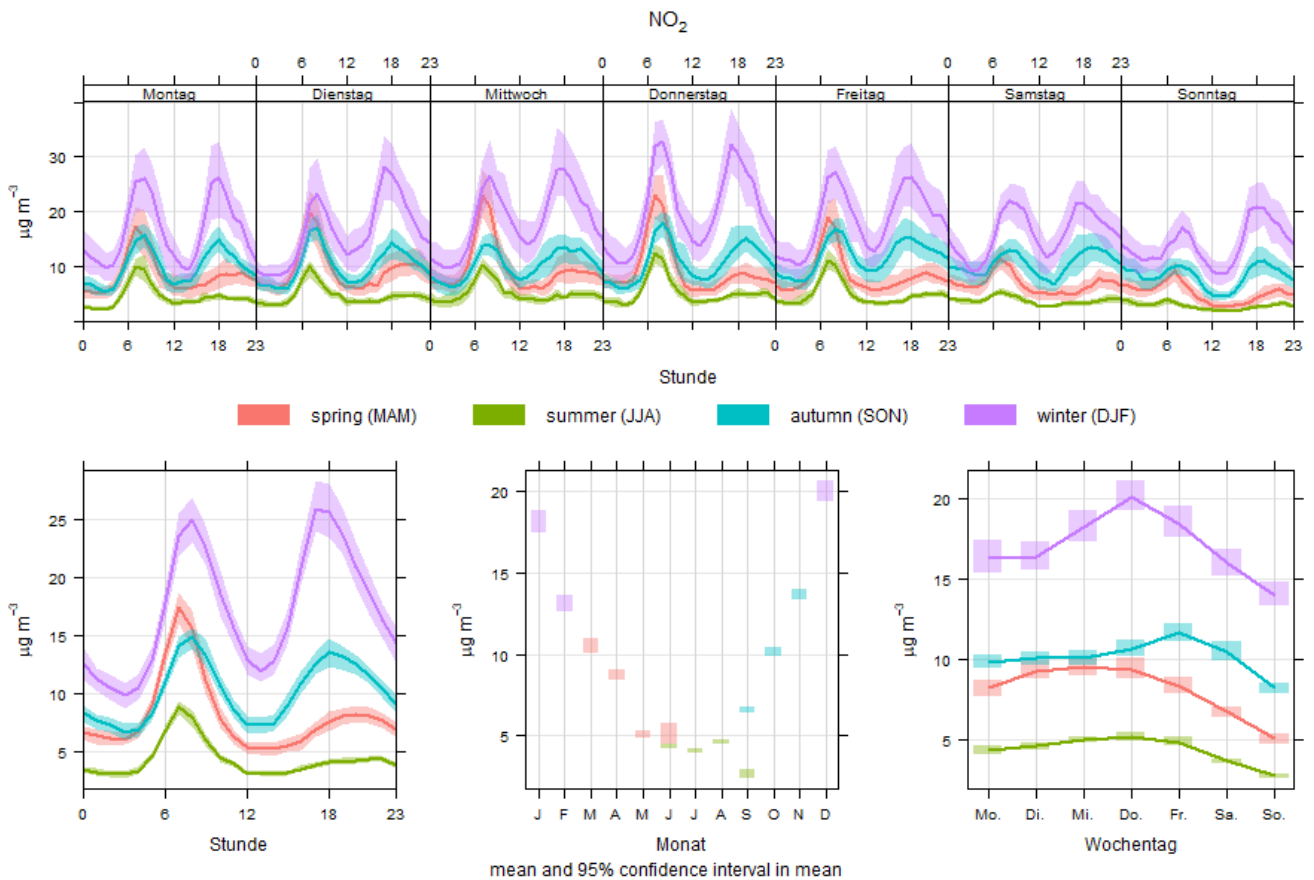


Abb. 12: Vergleich der Stickstoffdioxidbelastung in Ebnet-Kappel Gillstrasse. Mittlerer Wochengang in Stundenaufösung (oben), Tagesgang (unten links), Jahresgang (unten Mitte) und Wochengang in Tagesaufösung (unten rechts).

4.2.5 Kohlenmonoxid (CO)

Die CO-Emissionen in der Schweiz haben in den letzten Jahrzehnten stark abgenommen (technische Fortschritte, Katalysatoren usw.), heute kommen schweizweit keine Überschreitungen des Jahresmittel-Grenzwertes von $8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ mehr vor. Die Hauptquellen von CO sind sowohl der Strassenverkehr als auch Feuerungsanlagen. Entsprechend ähnelt der Tages- und Wochengang eher dem von EC als dem von NO_2 , siehe Abb. 13. Im Tagesgang tritt der abendliche Konzentrationsanstieg von CO deutlich später und länger auf (Indikator für die Holzverbrennung), als zur Hauptverkehrszeit (vergl. NO_2). Zudem ist der Wochengang deutlich schwächer ausgeprägt.

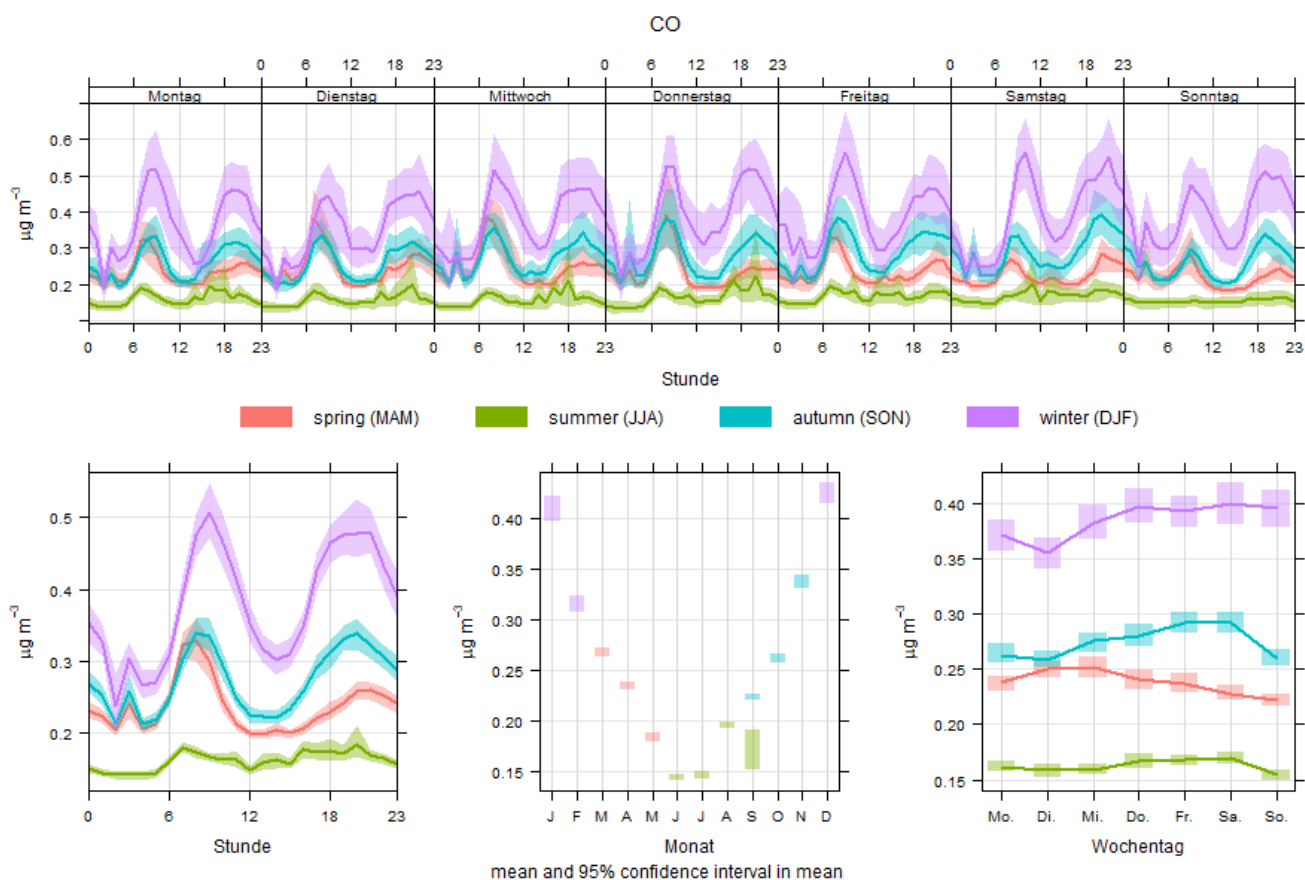


Abb. 13: Vergleich der CO Belastung in Ebnet-Kappel Gillstrasse. Mittlerer Wochengang in Stundenaufösung (oben), Tagesgang (unten links), Jahresgang (unten Mitte) und Wochengang in Tagesaufösung (unten rechts).

4.2.6 Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK)

Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) entstehen bei unvollständiger Verbrennung von organischen Materialien (z.B. Holz, Treibstoffe etc.). Zahlreiche PAK sind nachweislich krebserregend. In der Schweiz gibt es für karzinogene Substanzen keine Immissionsgrenzwerte, es gilt das Minimierungsgebot. Für das krebserregende Benzo(a)pyren (BaP) im PM₁₀ liegt gemäss EU-Kommission 2004 ein Zielwert von 1 ng/m³ vor. Am Standort Ebnet-Kappel wurde der Gehalt von zehn verschiedenen PAK im Feinstaub (PM₁₀) bestimmt. Die Analyse wurde analog zu den PAK Messungen des NABEL (EMPA, PAK Bericht 2021) durchgeführt. Es wurden die gleichen PAK gemessen und die Konzentrationen wurden ebenfalls als Quartalsmittelwert bestimmt.

Abb. 16 zeigt die relativen Beiträge einzelner PAK zum PM₁₀ für Ebnet-Kappel sowie an anderen Schweizer Standorten (Daten aus PAK-Bericht 2021, Empa). Die Zusammensetzung der PAK am Standort Ebnet-Kappel ist vergleichbar wie an anderen städtischen/ dörflichen Standorten im Mittelland (Zürich, Tänikon, Dübendorf) und nicht wie an den holzfeuerungsbeeinflussten Südschweizer Standorten San Vittore und Magadino. Benzo(a)pyren ist an allen Messorten für mindestens 60% der Toxizität der PAK im Feinstaub verantwortlich.

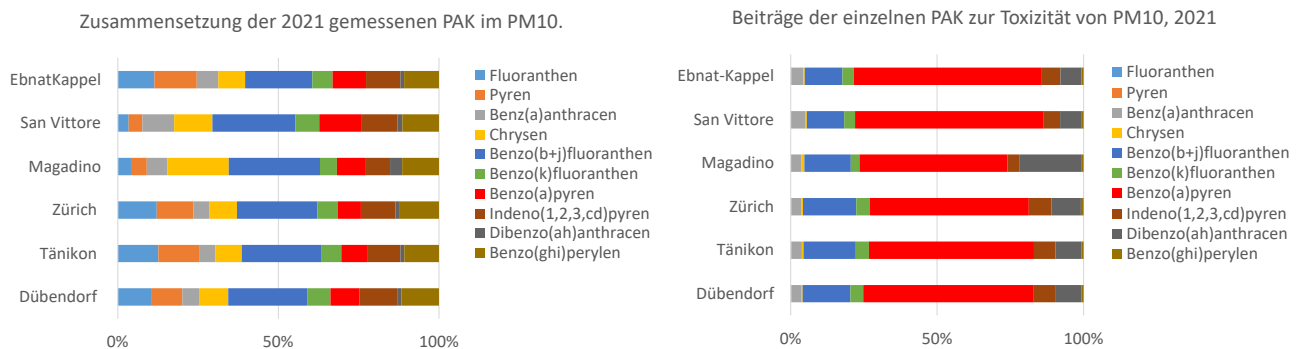


Abb. 16: Relative PAK Zusammensetzung und relative Toxizität der PAK in Ebnat-Kappel und an verschiedenen ANU Graubünden/ NABEL-Standorten (Empa, PAK Messbericht 2021).

Abb. 17 zeigt die Jahresmittelwerte von B(a)P an verschiedenen Schweizer Standorten und Ebnat-Kappel (Grafik entnommen aus Empa, PAK Messbericht, 2021). Die absoluten B(a)P Konzentrationen sind an den meisten Messstandorten in den letzten zehn Jahren gesunken und lagen 2021, mit Ausnahme von San Vittore, unter dem Zielwert der EU. Grund dafür sind meist heiztechnische Modernisierungen und Veränderungen (z.B. der Ort Grabs wurde zwischenzeitlich durch Fernheizung erschlossen).

In Ebnat-Kappel ist die B(a)P Belastung seit 2010/2012 stabil geblieben. Sie ist zudem im Vergleich zu anderen Schweizer Standorten stark erhöht, nur der Standort San Vittore im Misox weist höhere Konzentrationen auf. Schweizweit wurden ähnliche Konzentrationen sonst nur noch im Muotathal gemessen (innet Umweltmonitoring, 2011 und 2018).

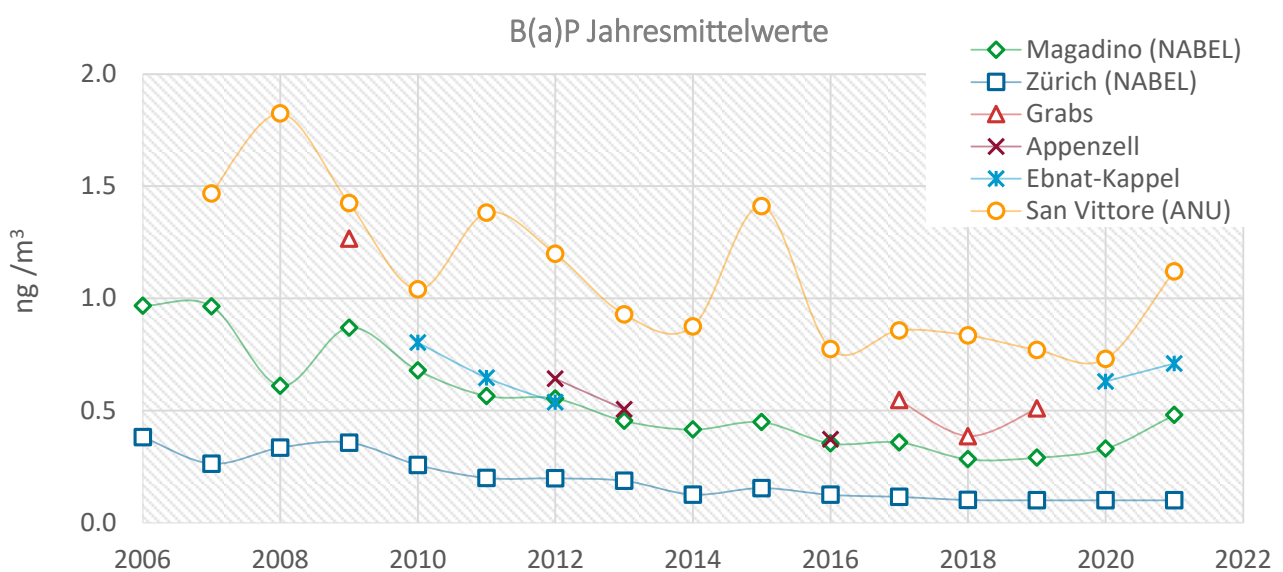


Abb. 17: Jahresmittelwerte 2006 bis 2021 der Konzentration von Benzo(a)pyren in Ebnat-Kappel und an verschiedenen Schweizer Standorten, Daten entnommen aus: Empa PAK Messberichten. (Der JMW 2012 für Ebnat-Kappel ist unvollständig, Messung nur bis Okt.)

4.3 Luftschadstoffe und Emissionsquellen

4.3.1 Schadstoffausbreitung

Abb. 18 zeigt die zuvor betrachteten Luftschadstoffe am Standort Ebnat-Kappel in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit und der Windrichtung im Windrosenformat. Für EC und für NO₂ liegen die Quellen im südlichen Dorfzentrum. O₃ weist vor allem hohe Konzentrationen auf, wenn die Luftmassen aus dem Umland herbeiverfrachtet werden. Hohe PM₁₀ Werte entstehen im geringen Ausmass durch lokale Quellen, vor allem wird langlebiger Feinstaub jedoch weit herbei transportiert, in Ebnat-Kappel wurden die höchsten Konzentrationen bei Wind aus Südwest gemessen.

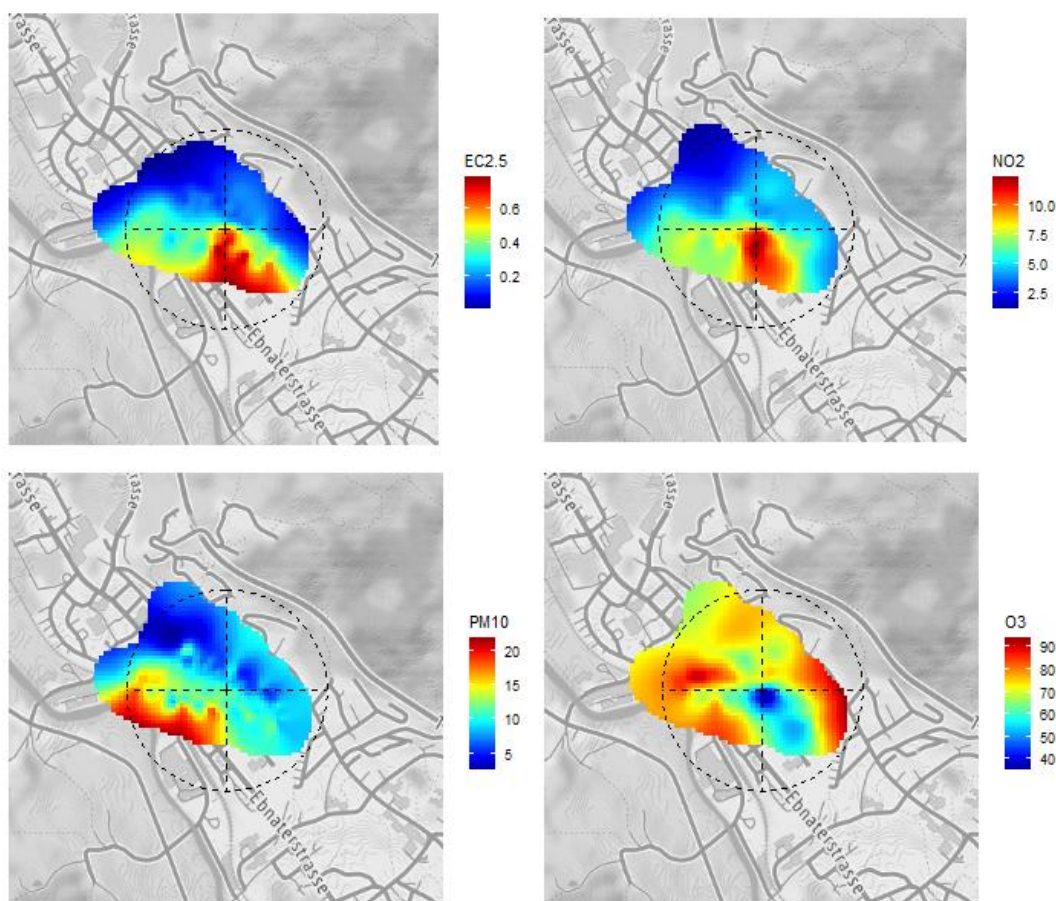


Abb. 18: Verschiedene Luftschadstoffkonzentrationen (mittlere 1h Mittelwerte, farbkodiert) am Standort Ebnat-Kappel in Abhängigkeit von Windgeschwindigkeit [m/s] und Windrichtung. Im Zentrum der Windrose entspricht die Windgeschwindigkeit Null.

4.3.2 Feinstaub in SMPS-Partikelgrößenklassen

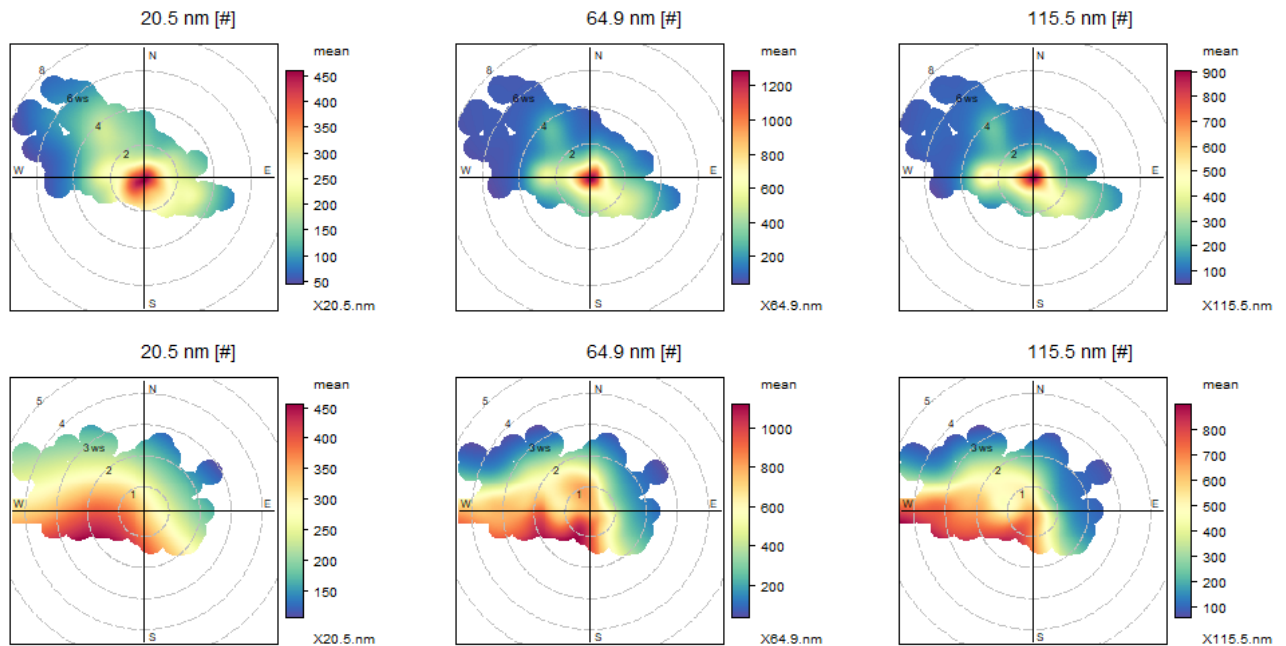


Abb. 19: Konzentrationen in drei Partikelgrößenklassen (mittlere 1h Mittelwerte, farbkodiert) am Standort Ebnat-Kappel in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit [m/s] und Windrichtung. Obere Reihe: Messwerte Aug./Sep. 2020, untere Reihe: Messwerte Dez./Jan./Feb. 2020 bzw. 2021. Im Zentrum der Windrose entspricht die Windgeschwindigkeit Null.

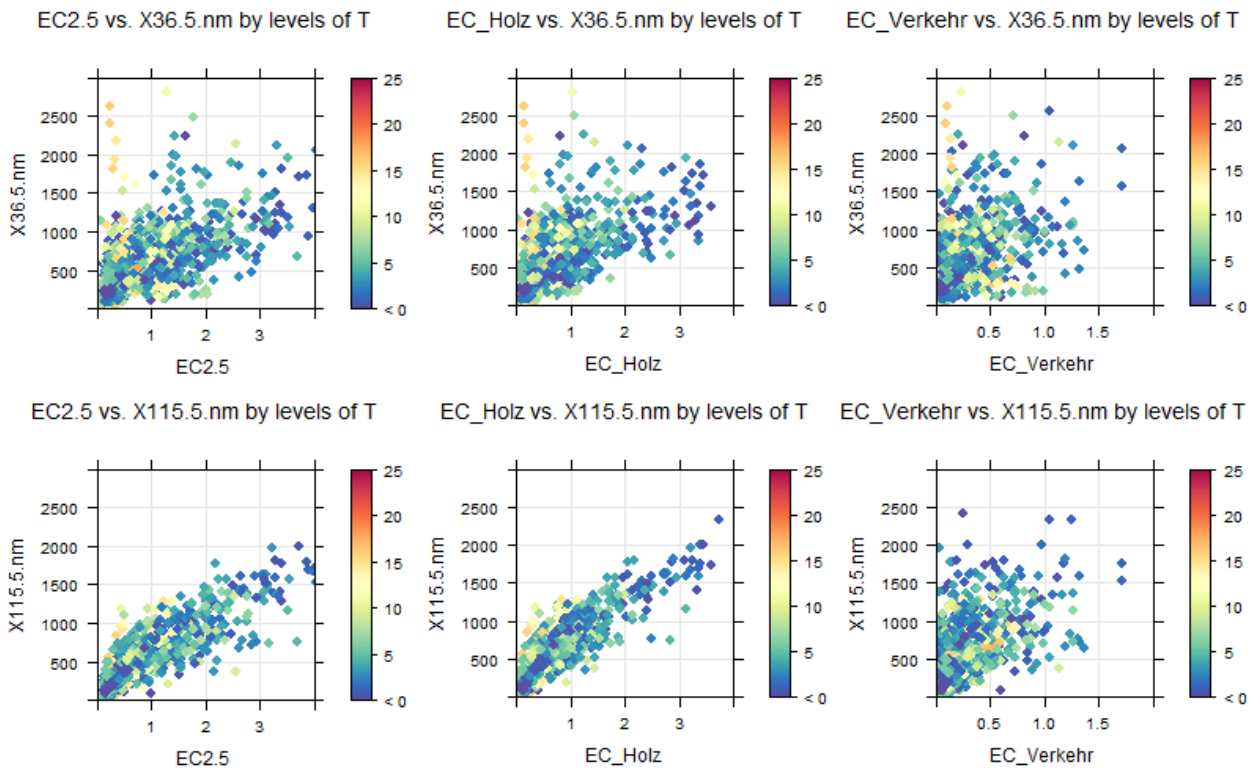


Abb. 20: Konzentration zwei verschiedener Partikelgrößenklassen, 36.5 nm und 115.5 nm (mittlere 1h Mittelwerte, farbkodiert nach Temperatur), am Standort Ebnat-Kappel gemessen von Aug. 2020 – Feb. 2021 in Abhängigkeit von der EC Konzentration.

Von Januar bis März 2020 sowie August 2020 bis Februar 2021 (unvollständige Messreihen) liegen für die kleinste Fraktion des Feinstaubes auch Informationen zu den Partikelgrössenklassen vor (Grössenbereich ca. 15 nm – 154 nm) Die Messdaten des SMPS wurden als Konzentration nach Windrichtung analysiert. Die Ergebnisse für drei Grössenklassen sind in Abb. 19 dargestellt. Dabei wurde, soweit der Messzeitraum es erlaubt, nach Sommer (Aug./Sep.) und Winter (Dez./Jan./Feb.) unterschieden. Im Winter stammt die Partikelfraktion der drei betrachteten Grössenklassen vor allem aus Südwest (Richtung Kapplerstrasse), ähnlich wie EC und PM10, siehe Abb. 18. Im Sommer stammen die Feinstaubpartikel >60 nm überwiegend aus der lokalen Umgebung der Messstation, während die kleinsten Partikel <60 nm auch aus der nahen Umgebung herbeitransportiert werden, vergl. Abb. 18 und NO₂. Ein Vergleich der Konzentrationen für zwei Grössenklassen (36.5 nm und 115.5 nm) mit den Konzentrationen von EC, EC_{Holz} und EC_{Verkehr} (siehe Abb. 20) zeigt, dass die 115.5 nm Partikel gut mit EC korrelieren, insbesondere mit EC_{Holz}. Die Korrelation ist insbesondere bei tiefen Temperaturen gegeben (Zeitraum, wenn geheizt wird). Die Partikel stammen daher vermutlich aus Holzfeuerungen.

4.4 Jahrgang und Inversionen

Im Herbst und Winter kommt es in Gebirgstälern aufgrund ihrer Topographie oft zu Inversionswetterlagen. Bei Inversionen ist die vertikale Durchmischung der Luftschichten durch Turbulenz gering und es entsteht eine stabile Schichtung bei der die Temperatur mit der Höhe zunimmt. Da es keinen Luftaustausch zwischen den Luftschichten gibt, kommt es zur Akkumulierung von Schadstoffen in bodennahen Schichten (Smog).

Zur Erfassung der Inversionswetterlagen (Höhe und Häufigkeit) wurden in von Ebnat-Kappel am nördlichen bewaldeten Hang rund um den Eichbach kontinuierliche Temperaturmessungen mit Temperatursensoren (siehe Abb. 2) während mehrerer Monate durchgeführt. Dazu wurden analog zu früheren Projekten (z.B. Grabs, Flums) vier Sensoren in unterschiedlichen Höhen zwischen ca. 660 m und 770 müM. montiert. Die Temperaturmessungen erlauben eine Inversionserfassung in drei Schichten und werden zur Klassierung von Inversionswetterlagen herangezogen. Eine Inversion lag vor bei einem Temperaturunterschied von >1°C je 100 m. Nachfolgend beschreibt die Anzahl der Inversionen die Inversionsanzahl (Inv) innerhalb der drei möglichen Luftschichten.

Die Ergebnisse der Inversionserfassung sind punktuell geeignet, um die Schadstoffmessungen zu interpretieren. Diverse Schadstoffkonzentrationen, meteorologischen Parameter sowie die Inversionsanzahl über den gesamten Messzeitraum in Abhängigkeit von der Tageszeit sind vollständigshalber im Anhang dargestellt.

Im gemessenen Zeitraum 2020/ 2021 traten in Ebnat-Kappel weder mehrtägige noch übermässig starke Inversionen auf, vergl. Abb. A1 im Anhang, und ebenso keine dadurch bedingten Grenzwertüberschreitungen

von PM₁₀. Die einzige Ausnahme mit überhöhten Feinstaubkonzentrationen waren die Saharastaubepisoden im Februar 2021, vergl. Abschnitt 4.2.1, sowie Abb. A2 im Anhang.

Abb. 21 zeigt eine typische Wintersituation der Luftbelastung in Ebnat-Kappel im Februar 2020 mit relativ hohen Feinstaubkonzentrationen. Zu sehen ist der Verlauf der PM₁₀ und NO₂ Konzentrationen, der Temperatur, der Inversionsanzahl, der Windrichtung und Windgeschwindigkeit im Januar 2020 in Stundenaufösung. Die Anzahl der Inversionsschichten lag teilweise bei bis zu drei Lagen, diese wurden aber durch regelmässige erhöhte Windgeschwindigkeiten immer wieder unterbrochen. In der zweiten Monatshälfte wurden Feinstaubkonzentrationen von über 30 µg/m³ erreicht, nach dem Einsetzen von höheren Windgeschwindigkeiten und Regen zum Monatsende traten keine Inversionen mehr auf und die PM₁₀ Konzentrationen sanken.

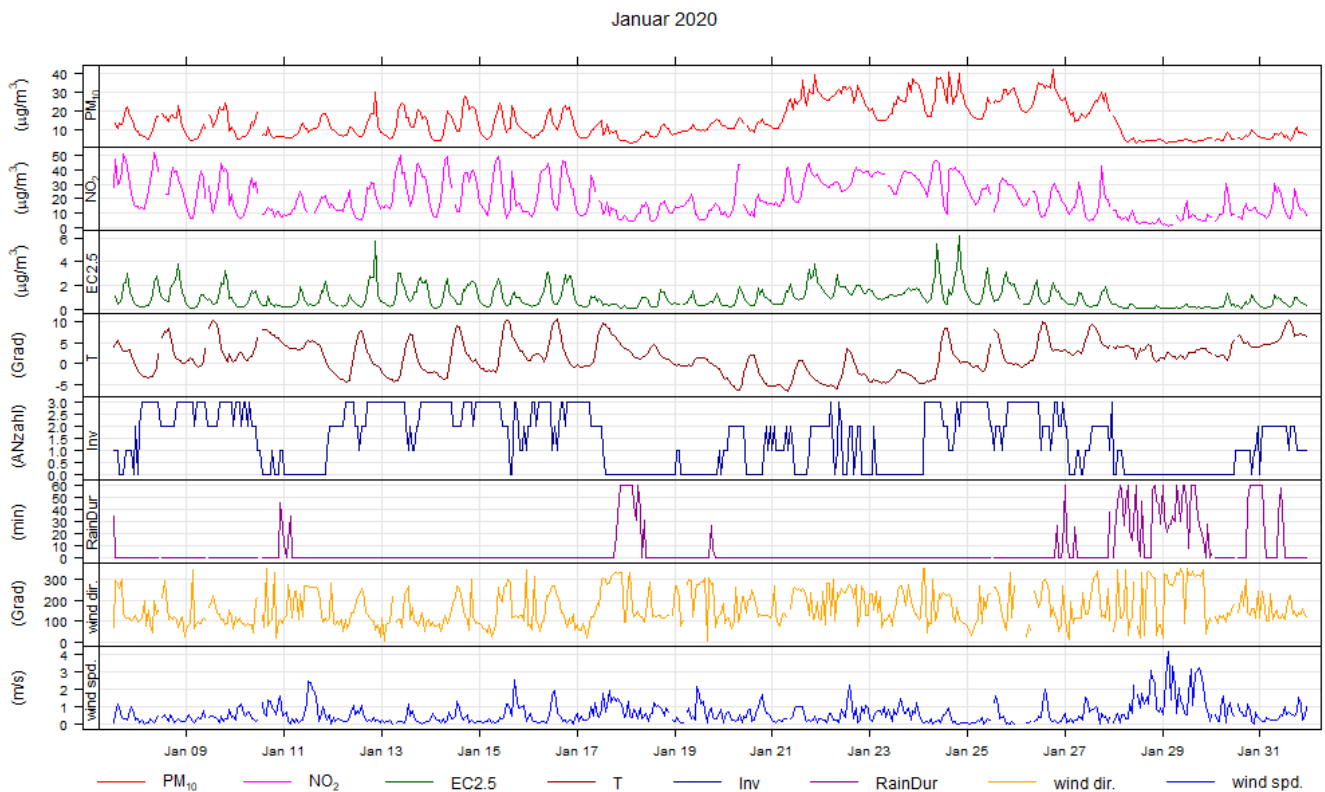
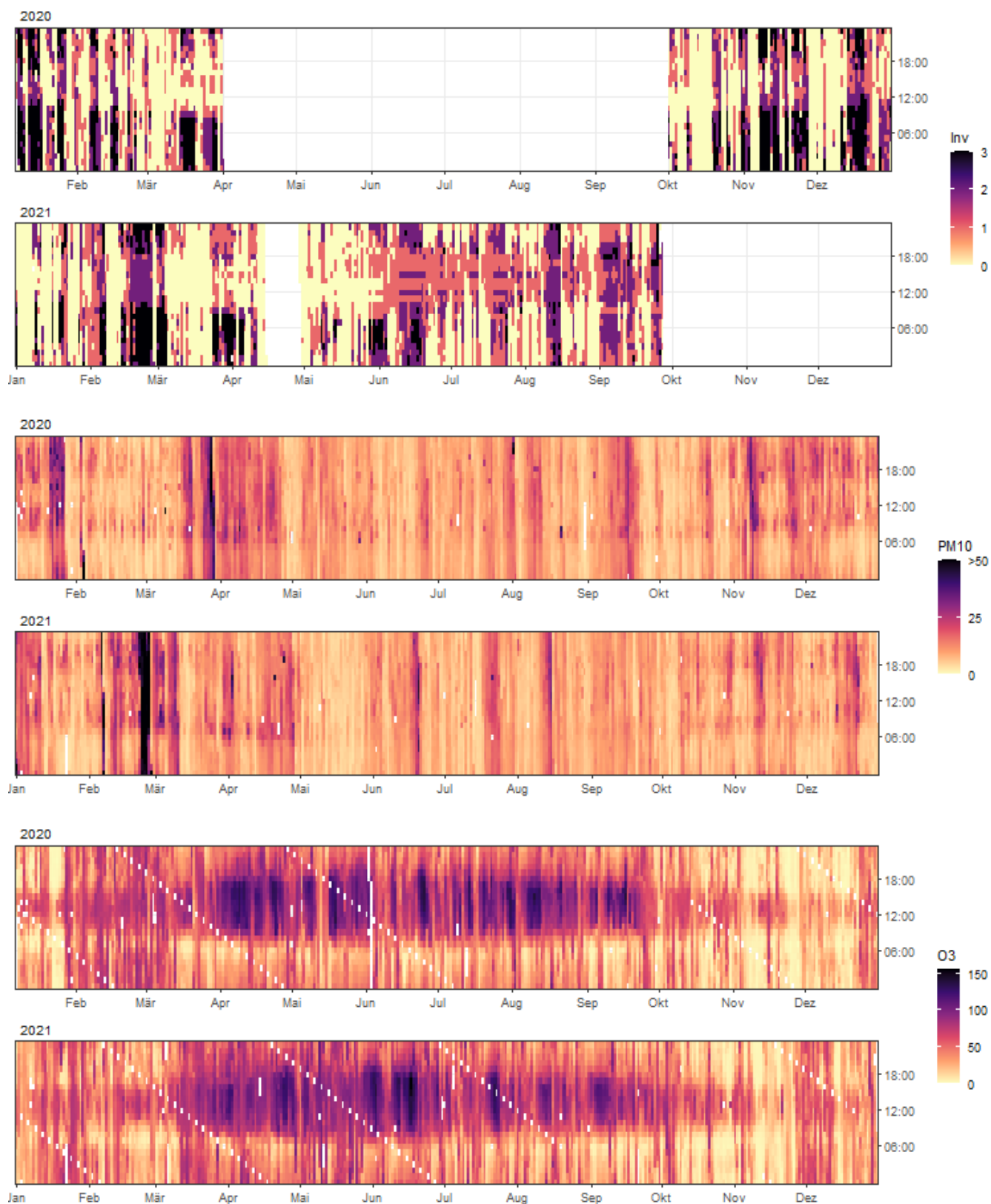


Abb. 21: Verlauf verschiedener Schadstoffe, Meteoparameter und Inversionsmarker im Januar 2020 (Stundenmittelwerte).

Anhang Jahresgänge



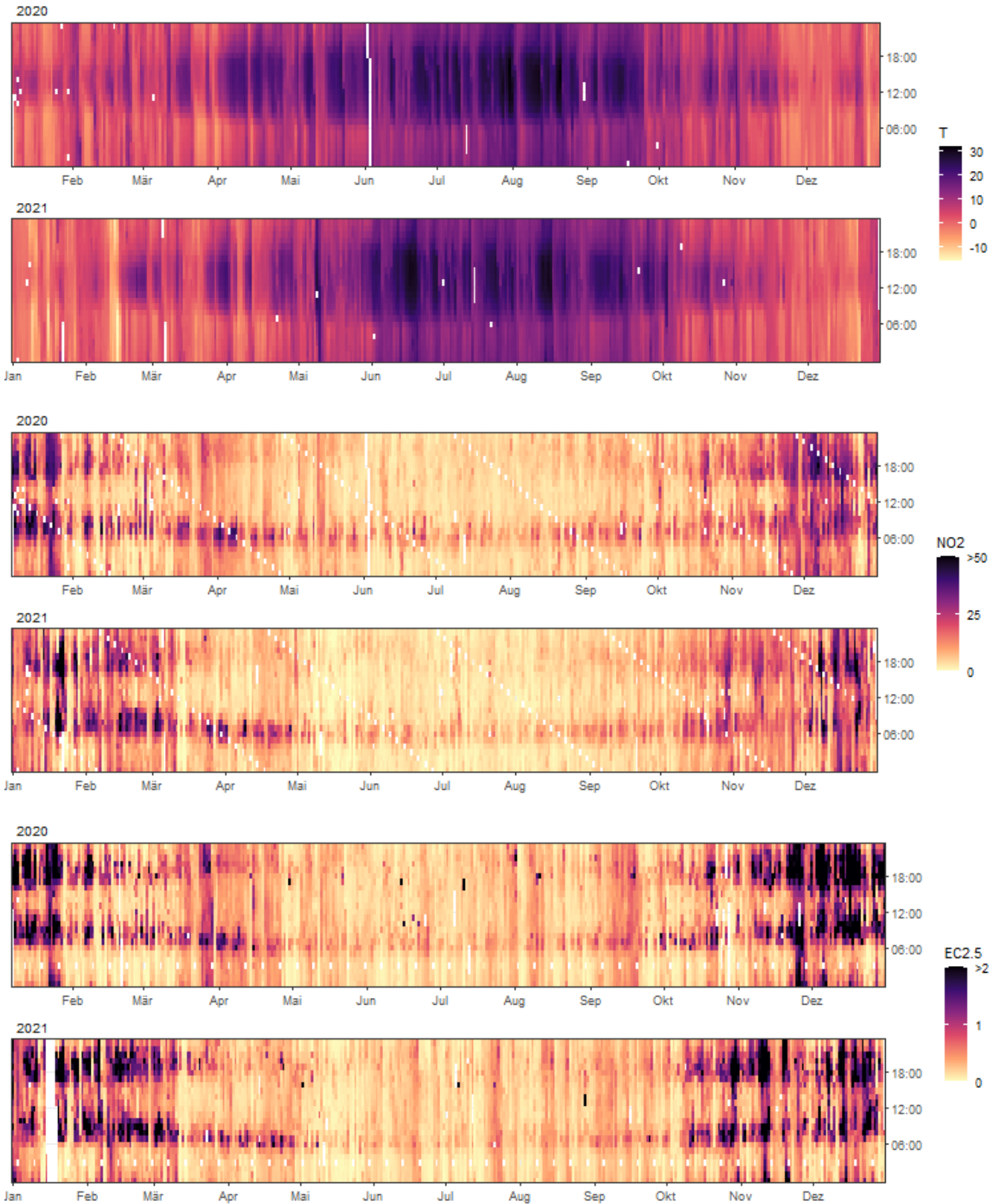


Abb. A1-A6: Farbkodierter Tagesgang als Jahrgang für Inv, PM₁₀, O₃, T, NO₂ und EC, im Zeitraum Januar 2020 bis Dezember 2021 am Standort Ebnat-Kappel Gillstrasse, alle Schadstoffmesswerte in [µg/m³], Temperatur in [°C] und Inv als Anzahl Inversionsschichten.

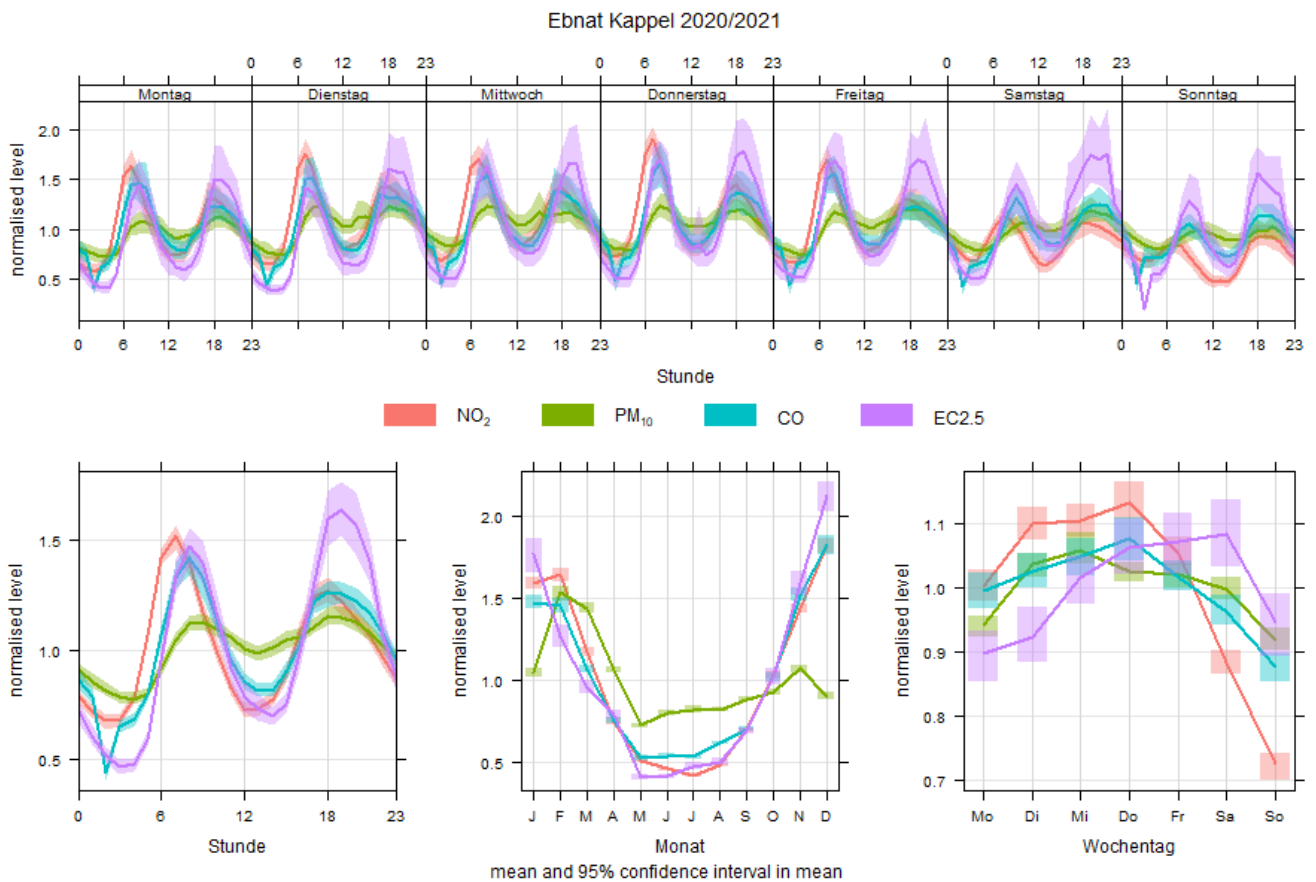


Abb. A7: Vergleich der normierten NO₂, PM₁₀, EC und CO Belastung in Ebnat-Kappel Gillstrasse. Mittlerer Wochengang in Stundenaufösung (oben), Tagesgang (unten links), Jahresgang (unten Mitte) und Wochengang in Tagesaufösung (unten rechts).

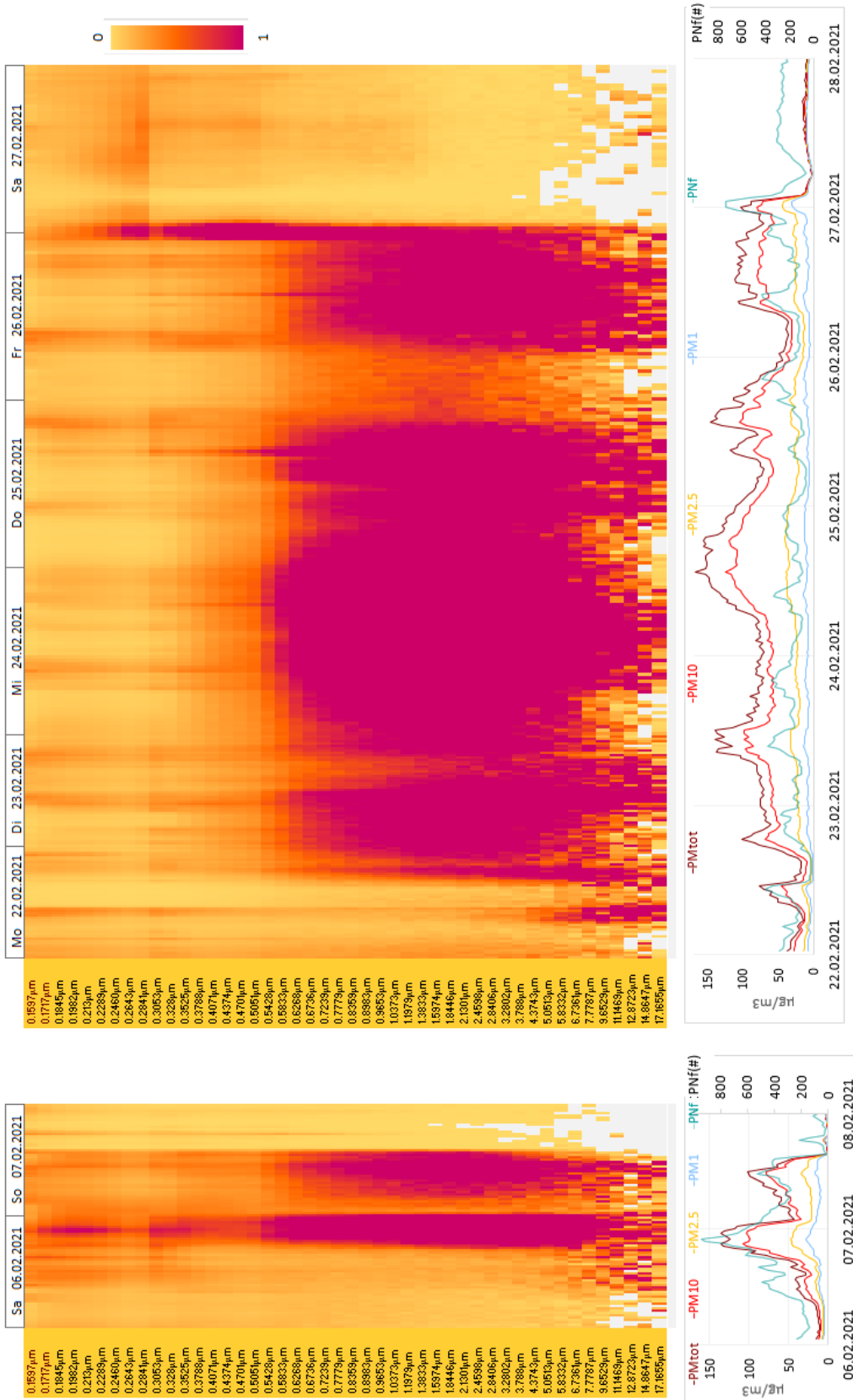


Abb. A8: Saharastaubpartikel gehören zur größeren Fraktion des Feinstaubs PM10. Die einzelnen Messkanäle des Fidas Messgeräts zeigen den Verlauf der Saharastaubereignisse in Ebnet-Kappel im Februar 2021.