

Zur Entwicklung der Häufigkeit atmosphärischer Inversionen im Alpenraum 1997 – 2023



Dr. Jürg Thudium
Dr. Carine Chélala
26.09.2024 / 5996.40

Oekoscience AG

Postfach 452
CH - 7001 Chur

Telefon: +4181 250 3310
Thudium@oekoscience.ch

Impressum

Diese Studie wurde von Oekoscience erstellt.

Autoren: Dr. Jürg Thudium, Dr. Carine Chélala.

Finanzielle Unterstützung:

Bundesland Vorarlberg

Bundesland Tirol

Amt für Umweltschutz Uri

Amt für Natur und Umwelt Graubünden

Titelbild: Inversion über der Leutasch, Tirol, sichtbar gemacht durch den Schnee auf den Bäumen im unteren Höhenbereich, währenddem die Bäume im oberen Höhenbereich bis gegen die Waldgrenze schneefrei sind. Die Temperatur liegt im unteren Höhenbereich unter dem Gefrierpunkt, im oberen darüber.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	3
2. Zur Immissionsrelevanz der Inversionen	3
3. Geografische Lage der Temperaturprofile	10
4. Entwicklung der Inversionshäufigkeiten 1997 – 2023	11
4.1. Zeitreihen der Inversionshäufigkeiten 1997 – 2023	11
4.2. Inversionen im Sommer	17
4.3. Diskussion der Spitzen in den Inversionshäufigkeiten 2011 und 2015	19
4.4. Beispiel langanhaltender Inversionen auf der Alpensüdseite im Dezember 2021	20
4.5. Vergleich der Inversionshäufigkeiten in den TP Unterinntal (Tirol) und Radfeld für 2023	23
4.6. Zusammenfassung der Inversionshäufigkeiten bis 2023	26
4.7. Entwicklung der Inversionshäufigkeiten bis 2023	28
5. Inversionen und Wetterlagen	31
6. Fazit	34

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1: Mittlerer Tagesgang (2016) und Jahresmittelwerte (2013-2016) der NOx-Immissionen bei Kundl (A12) je Inversionsauftreten im Winter (Januar, Februar und Dezember).	4
Abbildung 2.2: Mittlerer Tagesgang der NOx-Immissionen bei Kundl (A12) nach Inversionsauftreten je Jahreszeit 2018. Inversionen bestimmt im Temperaturprofil Radfeld.	4
Abbildung 2.3: Mittlerer Tagesgang der Inversionshäufigkeit im Winter (Januar, Februar, November und Dezember) bei Dornbirn, Vorarlberg, 2016.	5
Abbildung 2.4: Mittlerer Tagesgang der NOx-Immissionen bei Dornbirn, Lustenau Zollamt und Sulzberg je Inversionsauftreten im Temperaturprofil Dornbirn im Winter (Januar, Februar, November und Dezember) 2016.	6
Abbildung 2.5: Mittlerer Tagesgang der PM10- und PM2.5-Immissionen bei Dornbirn, und PM10-Immissionen bei Sulzberg je Inversionsauftreten im Temperaturprofil Dornbirn im Winter (Januar, Februar, November und Dezember) 2016.	7
Abbildung 2.6: Mittlerer Tagesgang der NOx-Immissionen bei Vomp (A12) nach Inversionsauftreten im Herbst (oben; September-November) und Winter (unten; Januar, Februar und Dezember) 2021. Inversionen bestimmt im Temperaturprofil Unterinntal.	8
Abbildung 2.7: Mittlerer Tagesgang der Windgeschwindigkeit bei Vomp (A12) nach Inversionsauftreten im Herbst (oben; September-November) und Winter (unten; Januar, Februar und Dezember) 2021. Inversionen bestimmt im Temperaturprofil Unterinntal.	9
Abbildung 3.1: Lage der Temperaturprofile.	10
Abbildung 4.1: Inversionshäufigkeiten je Jahr für verschiedene Orte im Alpenraum und Vorland für bodennahe (oben) bzw. hochreichende Schichten (unten), 1997-2023. Gestrichelte Linien: Orte auf der Alpensüdseite.	12
Abbildung 4.2: Inversionshäufigkeiten je Jahreszeit für verschiedene Orte im Alpenraum und Vorland für bodennahe Schichten, 1997-2023. Gestrichelte Linien: Orte auf der Alpensüdseite.	13
Abbildung 4.3: Inversionshäufigkeiten je Jahreszeit für verschiedene Orte im Alpenraum und Vorland für hochreichende Schichten, 1997-2023. Gestrichelte Linien: Orte auf der Alpensüdseite.	15

Abbildung 4.4: Temperaturdifferenz zum Tagesmaximum am Talboden (jeweils oben) und Inversionsauftreten (jeweils unten) bei Radfeld/Tiroler Inntal, Sommer 2017-2019.	18
Abbildung 4.5: Lage der Temperaturprofile (Kennzeichnung als rote Linien) bei Moleno (Tessin) und San Vittore (Graubünden).	20
Abbildung 4.6: Mittlere Tagesgang (oben) und Tagesmittel (unten) von Temperaturen je Sensor bei Moleno und San Vittore, Dezember 2021.	21
Abbildung 4.7: Differenz in den Inversionshäufigkeiten der TP Unterinntal und Radfeld je Jahreszeit, 2007-2023.	23
Abbildung 4.8: Mittlerer Tagesgang (MEZ) der Inversionshäufigkeit, TP Unterinntal und Radfeld, 2023.	24
Abbildung 4.9: Mittlerer Tagesgang (MEZ) der Inversionshäufigkeit je Jahreszeit, TP Unterinntal und Radfeld, 2023.	25
Abbildung 4.10: Mittlere Inversionshäufigkeiten auf der Alpennordseite (ANS; bodennah und hochreichend) bzw. Alpensüdseite (ASS; bodennah) je Luftschicht und Jahr, 2007-2023.	26
Abbildung 4.11: Mittlere Inversionshäufigkeiten auf der Alpennordseite (ANS; bodennah und hochreichend) bzw. Alpensüdseite (ASS; bodennah) je Luftschicht und je Jahreszeit, 2007-2023.	27
Abbildung 4.12: Trends der Inversionshäufigkeiten als mittlere Änderung der Inversionsdauer in Stunden pro Jahr bzw. pro Jahreszeit ($\Delta h/y$) über den Zeitraum 2002-2014 (oben) bzw. 2014-2023 (unten), für Gesamtjahr und die vier Jahreszeiten. Zusammenfassungen: ANS: Alpennordseite (bodennah und hochreichend); ASS: Alpensüdseite (bodennah).	29

1. Einleitung

Die atmosphärischen Inversionen führen zu einer erheblichen Erhöhung der Luftschadstoff-Immissionen und spielen auch bei der Lärmausbreitung eine grosse Rolle. Die Inversionshäufigkeiten variieren stark von Ort zu Ort und auch von Jahr zu Jahr. Zwischen einzelnen Jahreszeiten oder gar Monaten sind die Unterschiede noch grösser. Variationen in Immissionskonzentrationen von Luftschadstoffen können ohne Betrachtung von Inversionssituationen deshalb kaum erklärt werden. Es liegen Messreihen von insgesamt 17 Temperaturprofilen vor, bei neun für den Zeitraum bis 2023. Im Einzelfall gehen die Messungen bis 1997 zurück. Es ist von grossem Interesse, ob sich bei den Inversionshäufigkeiten ein genereller Trend zeigt.

Die Inversionen wurden zumeist anhand von Temperaturprofilen in steilen schattseitigen Hängen bestimmt, manchmal anhand der Differenz von zwei Temperaturmesspunkten von Wetterdiensten oder Umweltbehörden.

2. Zur Immissionsrelevanz der Inversionen

Der grosse Einfluss der Inversionen auf die Luftschadstoffkonzentrationen wird anhand von **drei Beispielen** für Kundl (Tiroler Inntal; TP Radfeld), Dornbirn (Rheintal; TP Dornbirn) und Vomp (Tiroler Inntal; TP Unterinntal) aufgezeigt.

Beispiel 1: Über den ganzen Tag (mit Ausnahme der Mittagszeit) sind die NO_x-Immissionen bei **Kundl an der Tiroler A12** bei Vorliegen einer Inversion (im Temperaturprofil bei Radfeld) im Mittel höher als ohne Inversion, besonders ausgeprägt im Winter. Die gesamten Wintermittel von NO_x zeigen in jedem Jahr einen markanten Inversionseinfluss.

NOx je Inversionsauftreten bei Kundl A12 im Winter (Januar, Februar und Dezember)

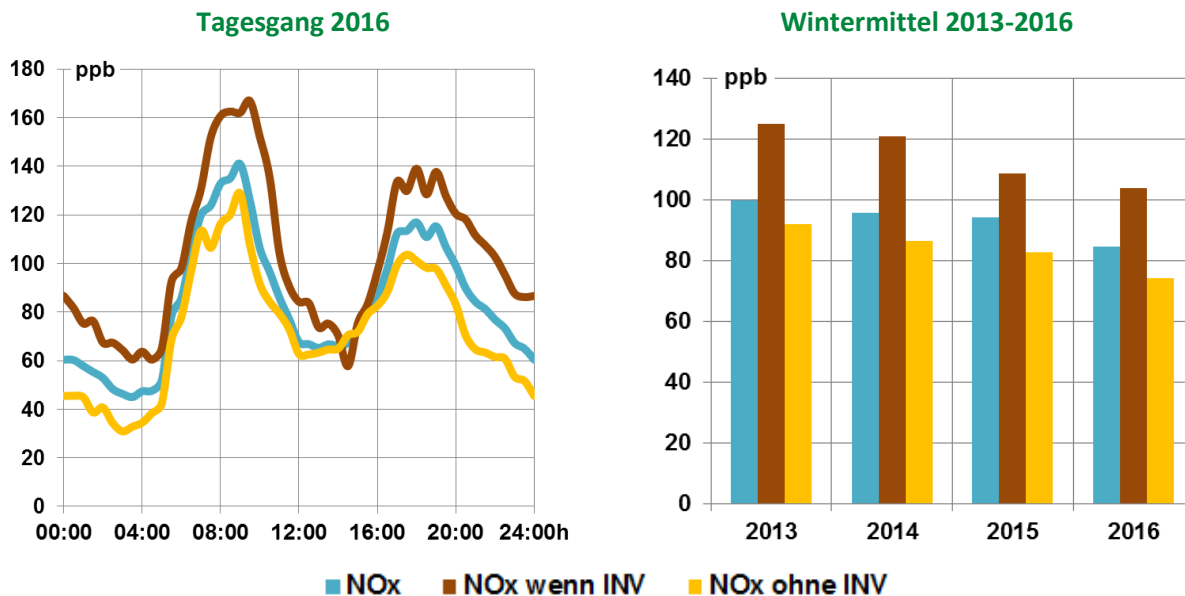


Abbildung 2.1: Mittlerer Tagesgang (2016) und Jahresmittelwerte (2013-2016) der NOx-Immissionen bei Kundl (A12) je Inversionsauftreten im Winter (Januar, Februar und Dezember).

NOx-Immissionen 2018 bei Kundl (A12) und Inversionen im Temperaturprofil Radfeld

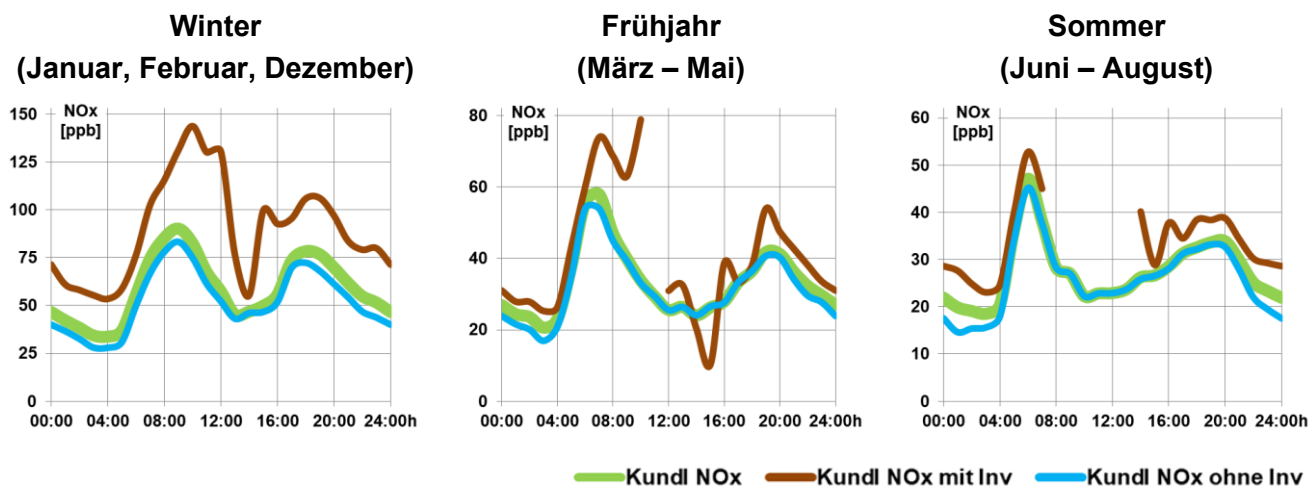


Abbildung 2.2: Mittlerer Tagesgang der NOx-Immissionen bei Kundl (A12) nach Inversionsauftreten je Jahreszeit 2018. Inversionen bestimmt im Temperaturprofil Radfeld.

Beispiel 2: Die NO_x-Immissionen an den **Vorarlberger Stationen Dornbirn, Lustenau Zollamt und Sulzberg** (1000m ü.M.) hängen vom Inversionsgeschehen über dem Rheintal ab. Die am Rheintalboden liegenden Stationen Dornbirn und Lustenau Zollamt zeigen bei Inversion erhöhte Immissionen, weil die im Rheintal freigesetzten Emissionen durch die atmosphärische Stagnation in Bodennähe zurückgehalten werden.

Die erhöht liegende Station Sulzberg jedoch zeigt bei Inversion niedrigere Immissionen, vor allem nachts, weil dann eben die Immissionen aus dem Rheintal zurückgehalten werden und nicht bis Sulzberg vordringen können (s.  in den Abbildungen). Es gibt natürlich auch in Sulzberg lokale Emissionen.

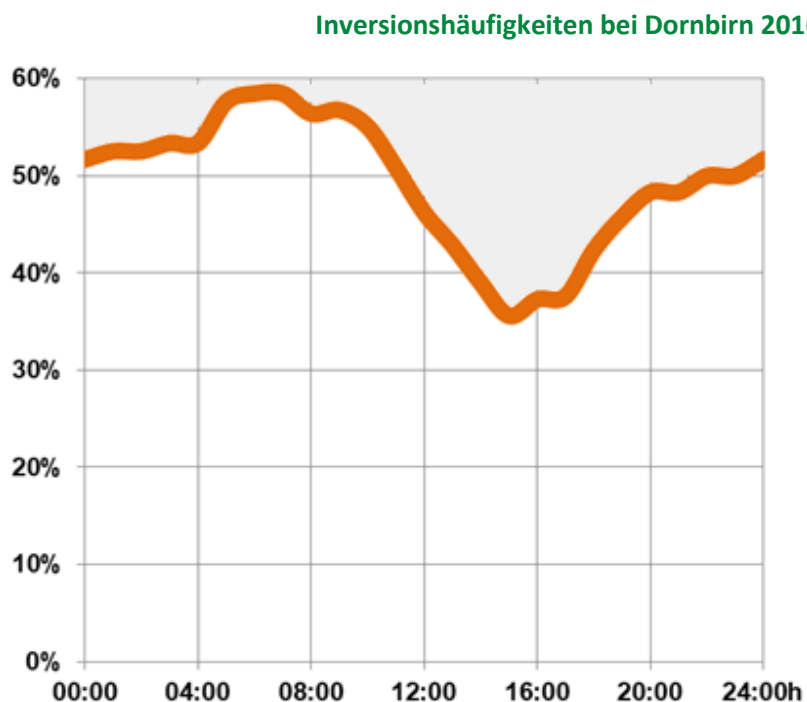


Abbildung 2.3: Mittlerer Tagesgang der Inversionshäufigkeit im Winter (Januar, Februar, November und Dezember) bei Dornbirn, Vorarlberg, 2016.

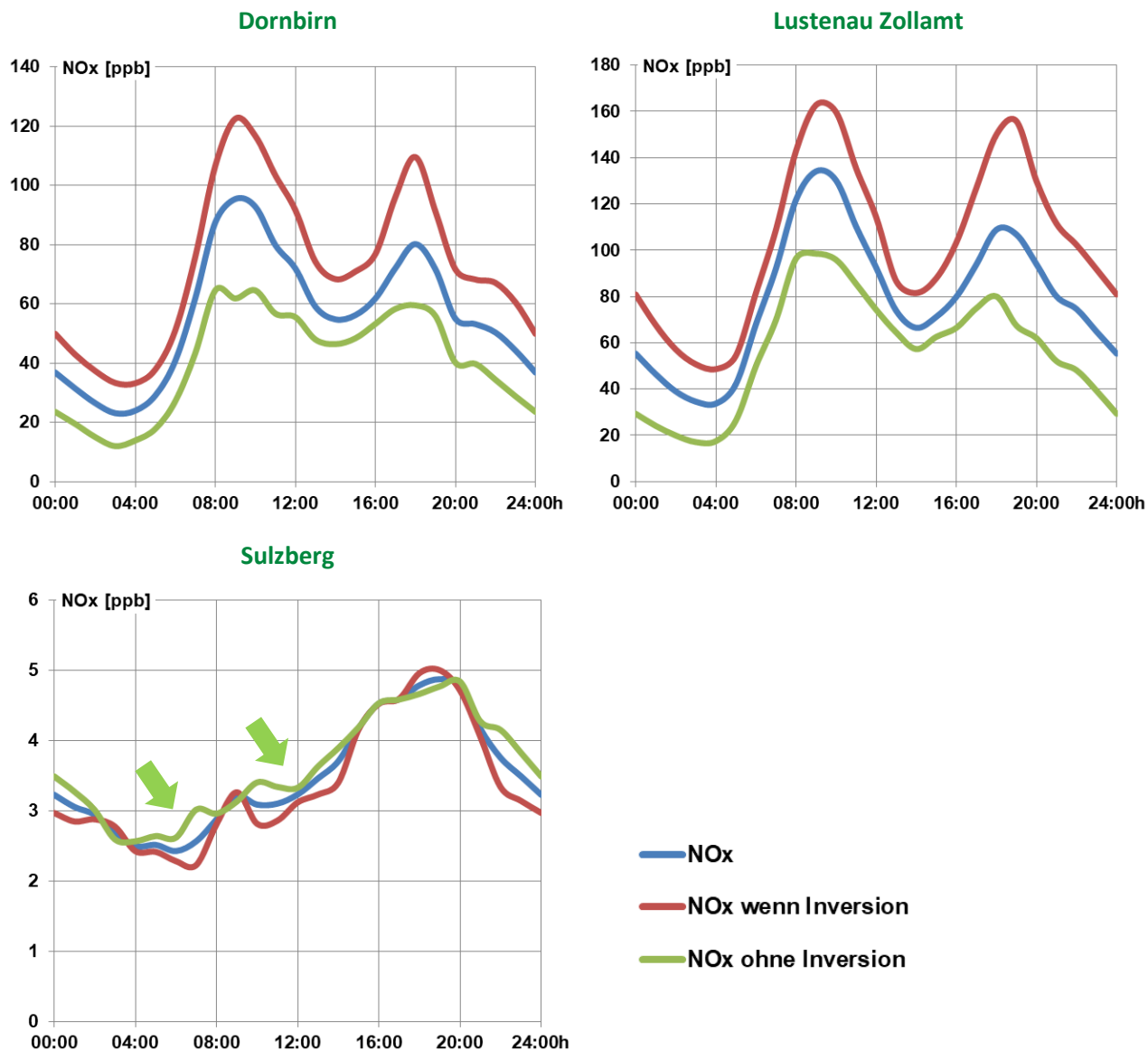
NO_x-Immission je Inversionsauftreten im Winter 2016

Abbildung 2.4: Mittlerer Tagesgang der NO_x-Immissionen bei Dornbirn, Lustenau Zollamt und Sulzberg je Inversionsauftreten im Temperaturprofil Dornbirn im Winter (Januar, Februar, November und Dezember) 2016.

Die Empfindlichkeit der Partikelmassenkonzentration (PM) gegenüber Inversionen ist ähnlich wie beim NO_x.

PM10 und PM2.5 je Inversionsauftreten im Winter 2016

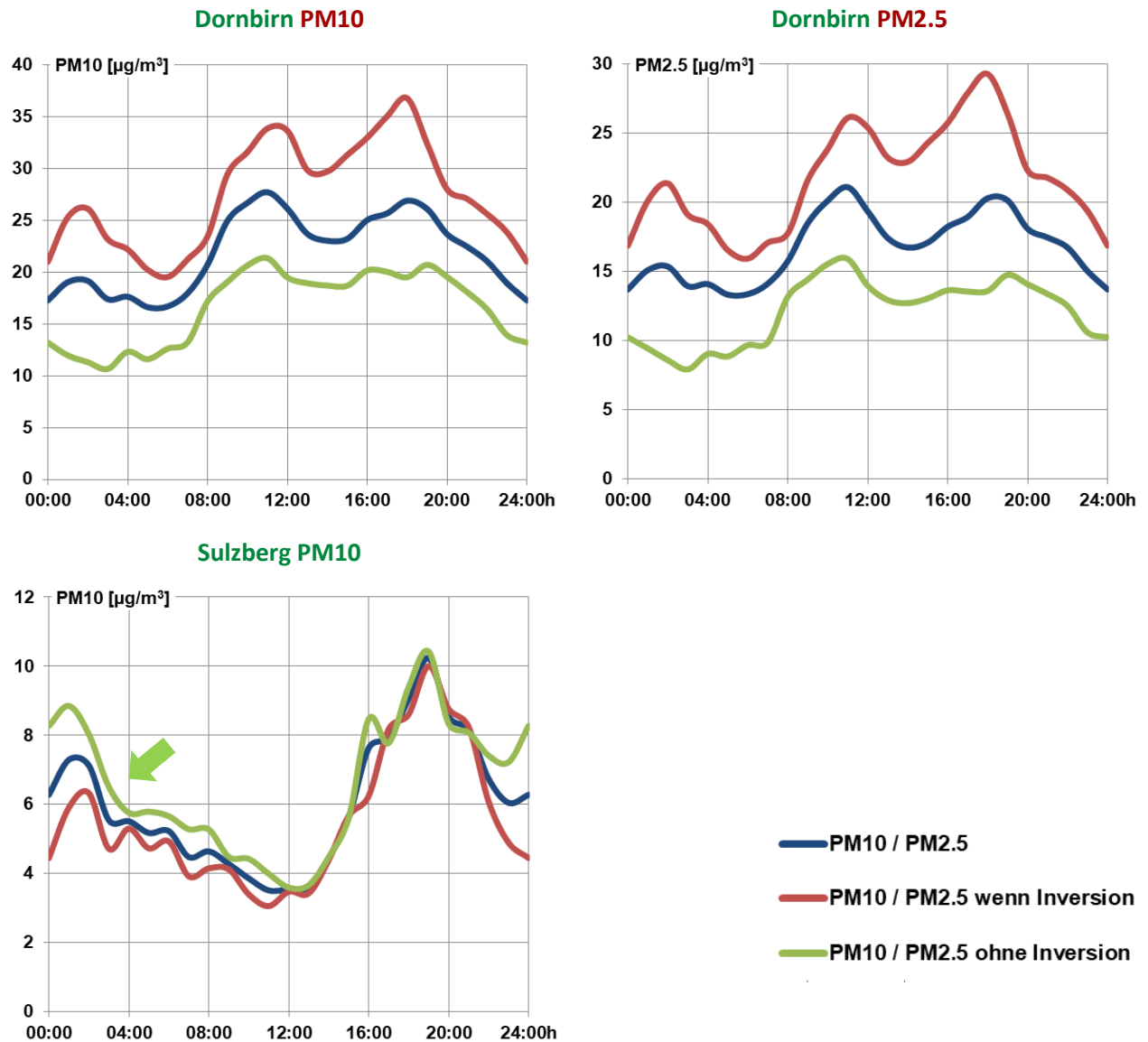


Abbildung 2.5: Mittlerer Tagesgang der PM10- und PM2.5-Immissionen bei Dornbirn, und PM10-Immissionen bei Sulzberg je Inversionsauftreten im Temperaturprofil Dornbirn im Winter (Januar, Februar, November und Dezember) 2016.

Beispiel 3: Die Windgeschwindigkeit und die NO_x-Immissionen bei Vomp (nahe Autobahn A12) reagierten auch im Jahr **2021** deutlich auf das Vorhandensein einer Inversion. Eine Inversion führt grundsätzlich zu erhöhter NO_x-Immission und zu niedrigerer Windgeschwindigkeit. Im Winter 2021 (Januar, Februar und Dezember) war der Unterschied mit/ohne Inversion bei den **NO_x-Immissionen** allerdings nicht so gross wie aufgrund früherer Untersuchungen erwartet und deutlich geringer als im Herbst 2021 (September-November), was im Rahmen dieser Kurzbetrachtung nicht weiter untersucht werden kann. Eine hochreichende Inversionsschicht wirkte sich etwas stärker auf die NO_x-Immission bei Vomp A12 aus als eine bodennahe. Die stärkste Inversionswirkung zeigte sich in der zweiten Tageshälfte.

NO_x je Inversionsauftreten bei Vomp A12 im Herbst und Winter 2021

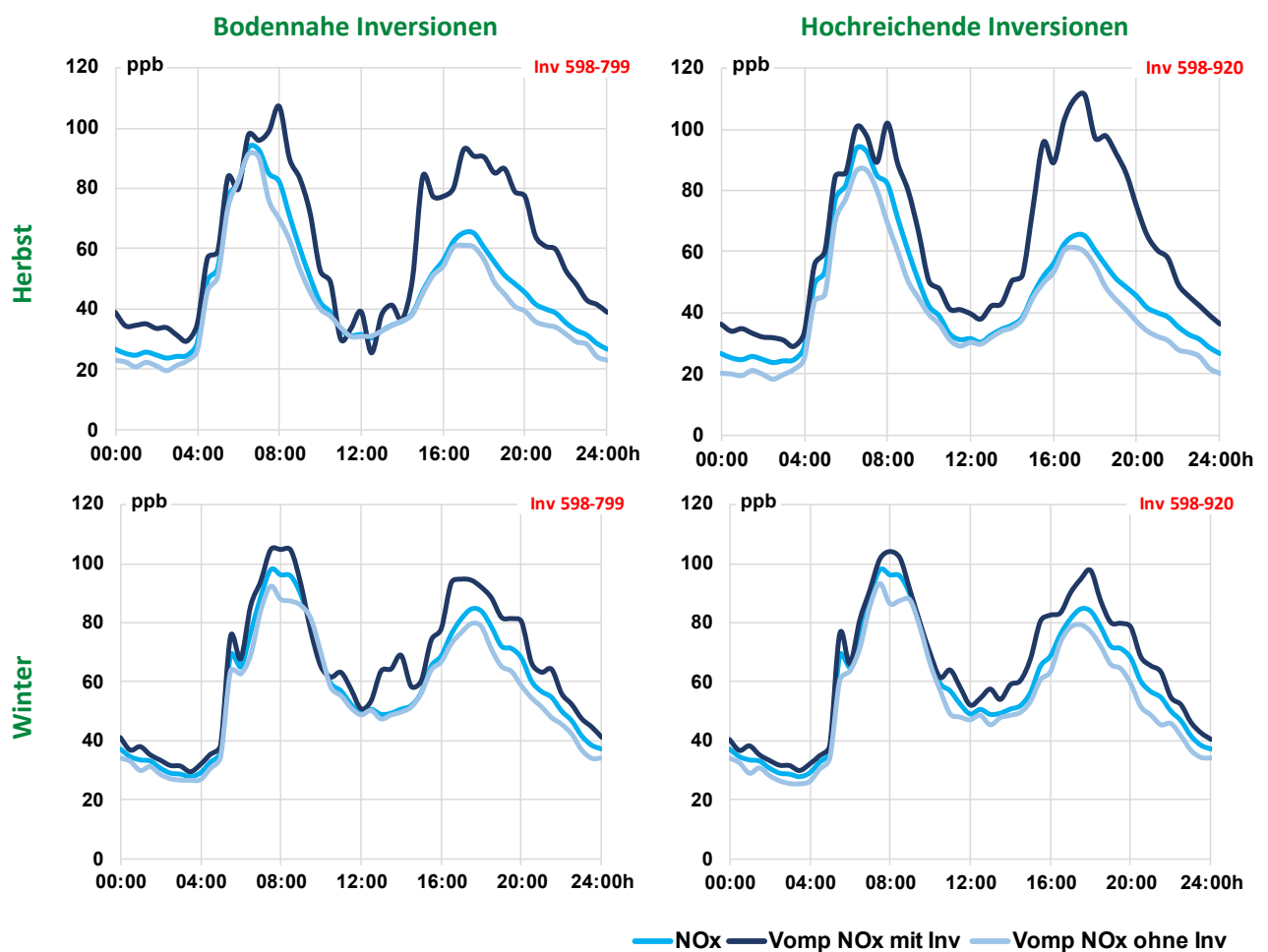


Abbildung 2.6: Mittlerer Tagesgang der NO_x-Immissionen bei Vomp (A12) nach Inversionsauftreten im Herbst (oben; September-November) und Winter (unten; Januar, Februar und Dezember) 2021. Inversionen bestimmt im Temperaturprofil Unterinntal.

Die **Windgeschwindigkeit** zeigte vor allem in der zweiten Tageshälfte des Herbstes bei Inversion ein anderes Bild als ohne Inversion. Bis etwa 16 Uhr blieb eine tageszeitlich erhöhte Geschwindigkeit erhalten, dann fiel sie rasch ab; damit ging eine deutlich erhöhte NO_x-Immission einher. Die thermisch bedingte Windgeschwindigkeitsspitze am Nachmittag, welche auch der Herbst ohne Inversion noch zeigt, fehlte vor allem bei hochreichender Inversion ansatzweise bis ca. 15 Uhr noch zeigte, fehlte vor allem bei bodennaher Inversion. Im Winter fehlte diese Spitze ganz, dennoch war die Windgeschwindigkeit auch im Winter bei Inversion durchwegs niedriger als ohne. Allerdings war die nächtliche Windgeschwindigkeit gerade bei Inversion im Winter höher als im Herbst, was auf einen häufigen Tal- auswind hinweist, welcher auch für die geringe Immissionserhöhung bei Inversion in diesem Winter verantwortlich sein könnte.

Windgeschwindigkeit je Inversionsauftreten bei Vomp A12 im Herbst und Winter 2021

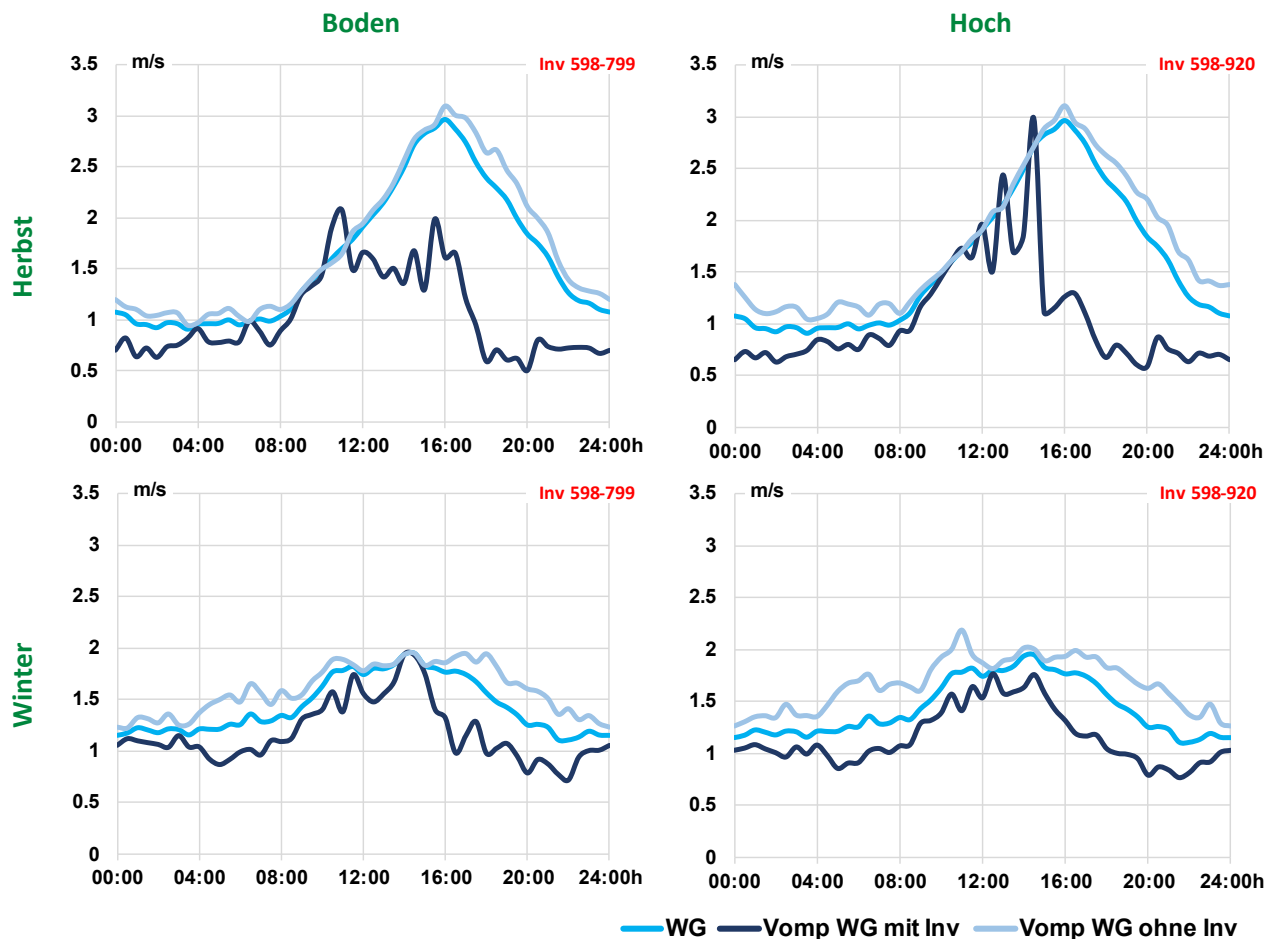


Abbildung 2.7: Mittlerer Tagesgang der Windgeschwindigkeit bei Vomp (A12) nach Inversionsauftreten im Herbst (oben; September-November) und Winter (unten; Januar, Februar und Dezember) 2021. Inversionen bestimmt im Temperaturprofil Unterinntal.

3. Geografische Lage der Temperaturprofile

Die untersuchten Temperaturprofile erstrecken sich von Aosta in den italienischen Westalpen bis Radfeld im Tiroler Inntal. Vier Profile befinden sich auf der Alpensüdseite: Aosta, Moleno, San Vittore und Bozen.

Es wurde zwischen bodennahen und hochreichenden Luftschichten unterschieden. Bodennahe Luftschichten erstrecken sich für diese Auswertung vom Boden bis etwa 170 m Höhe, hochreichende bis mehr als 300 m.

Für diese Studie wurden Inversionsbestimmungen in folgenden Regionen gemacht; fettgedruckte Standorte sind 2023 noch aktiv.

- Inversionsbestimmungen für bodennahe *und* hochreichende Schichten: Aosta, Attinghausen, **Erstfeld**, **Unterinntal**.
- Bodennahe Schichten: Andermatt, **Moleno**, **San Vittore**, **Rothenbrunnen**, Illanz, **Radfeld**.
- Hochreichende Schichten: **Dornbirn**, Bozen und MuttENZ.

Die Daten stammen von lokalen Umweltbehörden, bei Radfeld von Oekoscience, bei MuttENZ (Chrischonaturm) von MeteoSchweiz.



Abbildung 3.1: Lage der Temperaturprofile.

4. Entwicklung der Inversionshäufigkeiten 1997 – 2023

Die Inversionen wurden in allen Luftschichten nach der gleichen Methode bestimmt. Eine Inversion wurde detektiert, wenn eine vertikale Erwärmung unter Einschluss eines quasiadiabatischen Gradienten von $-0.5\text{ °C}/100\text{m}$ vorlag, welche die Toleranzmarge von 1.5 °C übertraf. Die Toleranzmarge wurde eingeführt als Kriterium der 'Immissionsrelevanz'; schwächere Inversionen zeigten kaum Einfluss auf bodennah emittierte Luftschadstoffe.

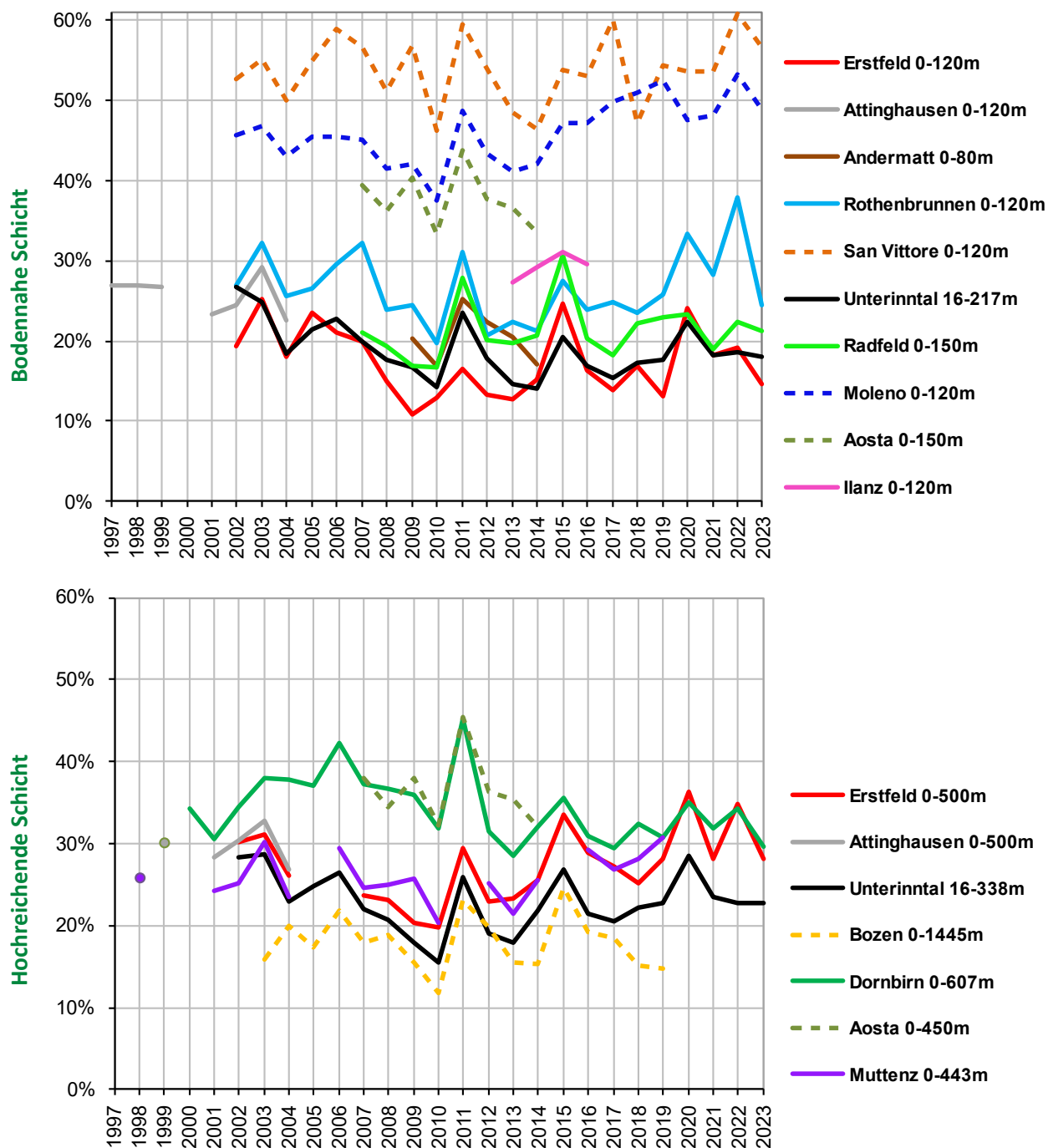
4.1. Zeitreihen der Inversionshäufigkeiten 1997 – 2023

Die folgenden Grafiken zeigen die Inversionshäufigkeiten in den bodennahen bzw. hochreichenden Luftschichten, zunächst im Jahresmittel, sodann in den vier Jahreszeiten Winter (Januar, Februar, Dezember), Frühjahr (März – Mai), Sommer (Juni – August) und Herbst (September – November).

In den bodennahen Luftschichten der Alpensüdseite sind die Inversionshäufigkeiten generell höher als auf der Alpennordseite. Für hochreichende Schichten ist die Datenlage zu knapp für eine solche Aussage, zumal im Falle von Bozen mit einer Höhendifferenz von mehr als 1400 m und einem Bodenmesspunkt in der Stadt die Aussagekraft vor allem im Sommer limitiert ist.

Jahreshäufigkeiten: Von 2002 bis 2014 haben die Inversionshäufigkeiten in den bodennahen und hochreichenden Schichten generell abgenommen. Bei der deutlichen Abnahme der Inversionshäufigkeit vor allem auf der Alpensüdseite von 2011-2014 handelte es sich nicht nur um einen Trend, sondern um eine Abfolge von lufthygienisch immer günstigeren Grosswetterlagen im Herbst und Winter. In den Jahren 2011, 2015, 2020 und 2022 kam es zu Spitzen in den Inversionshäufigkeiten. Davon waren fast alle Stationen betroffen; bei San Vittore und Moleno gilt dies nur eingeschränkt, da dort in einer ausgeprägten Beckenlage lokale Gegebenheiten das Inversionsgeschehen dominieren. Der Spitze im 2022 betraf alle Jahreszeiten ausser den Herbst. Im 2023 verringerte sich die Inversionshäufigkeit bei den meisten untersuchten Profilen wieder, alle Jahreszeiten waren davon betroffen.

Inversionshäufigkeiten je Jahr



Aosta 2011: Datenausfall vom 06.06 bis 23.09.2011 (für beide Profile).

Moleno 2012: Datenausfall vom 13.06 bis 04.10.2012.

Muttenz 2005 und 2011: Datenausfall vom 3.6. bis 8.11.2005 und vom 1.1. bis 20.2.2011.

Erstfeld 2017 (0-500m): Datenausfall vom 14.09. bis 05.11.2017.

Erstfeld 2019 (0-500m): Datenausfall vom 06.01. bis 14.02.2019.

Rothenbrunnen und San Vittore: Datenausfall vom 23.09. bis 14.11.2018.

Abbildung 4.1: Inversionshäufigkeiten je Jahr für verschiedene Orte im Alpenraum und Vorland für bodennahe (oben) bzw. hochreichende Schichten (unten), 1997-2023. Gestrichelte Linien: Orte auf der Alpensüdseite.

Inversionshäufigkeiten nach Jahreszeiten: Die Entwicklung je Jahreszeit war unterschiedlich. Grundsätzlich stellte sich auch in den Jahreszeiten eine Abnahme der Inversionshäufigkeit bis 2014 ein, danach eine Wiederanstiegs- bzw. Stabilisierungsphase. Die Spitzen, welche sich im Verlauf der jährlichen Inversionshäufigkeiten finden, zeigen sich jeweils nur bei einem Teil der Jahreszeiten (oder nur bei einer).

Inversionshäufigkeiten je Jahreszeit, bodennahe Schichten

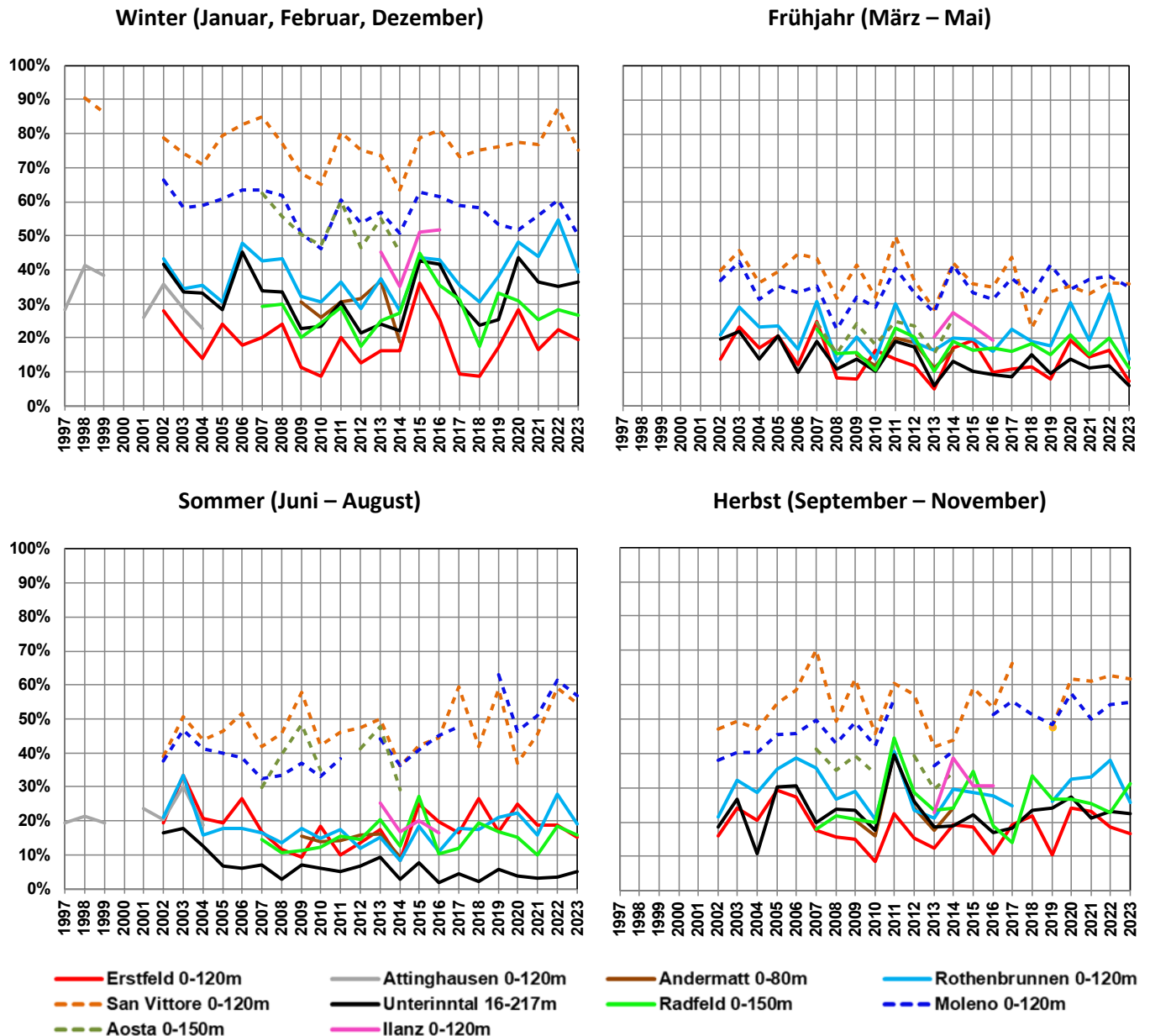


Abbildung 4.2: Inversionshäufigkeiten je Jahreszeit für verschiedene Orte im Alpenraum und Vorland für bodennahe Schichten, 1997-2023. Gestrichelte Linien: Orte auf der Alpensüdseite.

Die Inversionen in den bodennahen Schichten sind auf der Alpensüdseite zu allen Jahreszeiten z.T. deutlich häufiger als auf der Alpennordseite.

Bemerkungen zu einzelnen Profilen

Ab 2018 wurden in **Moleno** neue Sensoren eingesetzt. Auf Grund einer etwa sieben Monate langen Parallelmessung im 2017 konnten die neuen Sensoren auf die alten abgeglichen werden. Zwar besteht bei diesem Abgleich eine gewisse tageszeitliche Schwankung, die aber kaum 0.15 °C übersteigt. Aufgrund messtechnischer Probleme mit einem Sensor wurde bei Moleno die Inversionsbestimmung für die gesamte Zeitdauer von 2002-2023 geändert: Anstelle des Sensors am Hangfuss am Rande der Talebene bei Moleno wurde der Sensor in der Mitte der Talebene (nahe der Autobahn A2) verwendet. Die ermittelten Inversionshäufigkeiten sind dadurch leicht häufiger geworden und beziehen sich nicht mehr auf den Hangfuss (mit dem Dorf Moleno), sondern auf die weite Talebene.

Die Temperaturprofile **Rothenbrunnen** und **San Vittore** in Graubünden wiesen **2022** in allen Jahreszeiten häufige Inversionen auf, besonders ausgeprägt im Sommer und im Winter. Dies hängt sicher auch mit den häufigen, langanhaltenden Hochdrucklagen zusammen (wovon auch der Januar 2022 geprägt war). So ergaben sich an beiden Standorten die höchsten seit 2002 gemessenen Jahreshäufigkeiten an Inversionen. In den einzelnen Jahreszeiten wurde bei Rothenbrunnen die höchste Inversionshäufigkeit seit 2002 im Winter und Frühjahr gemessen. Auf 2023 hat die Inversionshäufigkeit bei Rothenbrunnen in allen Jahreszeiten wieder abgenommen, in San Vittore im Winter und Sommer.

Die jahreszeitlichen Verläufe der Inversionshäufigkeit in den **hochreichenden Schichten** ähneln denjenigen in den bodennahen Schichten.

Inversionshäufigkeiten je Jahreszeit, hochreichende Schichten

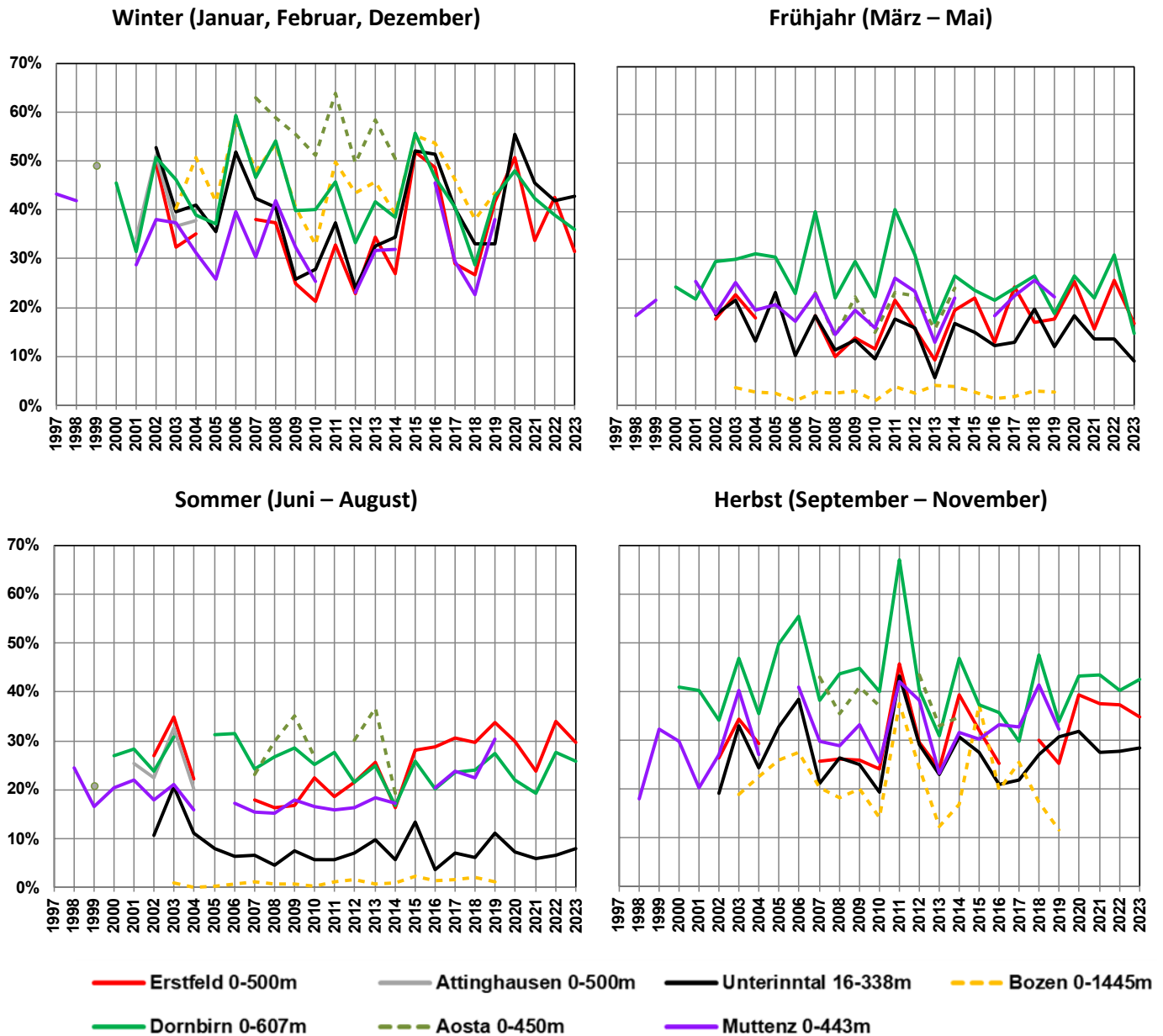


Abbildung 4.3: Inversionshäufigkeiten je Jahreszeit für verschiedene Orte im Alpenraum und Vorland für hochreichende Schichten, 1997-2023. Gestrichelte Linien: Orte auf der Alpensüdseite.

Änderungen in den Temperaturprofilen

Das Profil 'Schwaz' wurde durch 'Unterinntal' ersetzt. Seit 2014 gab es gewisse Artefakte durch Eingriffe wie Holzschlägerungen, Bau von Straßen und Stützmauern etc. Für 2014 und 2015 wurden die Inversionshäufigkeiten korrigiert. Ab 2016 wird das TP Innsbruck der ZAMG für die Inversionsbestimmung im oberen

Unterinntal verwendet. In einem Quervergleich mit dem TP Schwaz konnte die Eignung des TP Innsbruck festgestellt werden.

Beim **Temperaturprofil Dornbirn** (Vorarlberg) wurde die Bergstation Gäbris (1240 m ü.M.) für die gesamte Zeitdauer seit dem Jahr 2000 durch Sulzberg (1018 m ü.M.) ersetzt. Die detektierten Inversionshäufigkeiten und die Reaktion der Immissionen auf das Vorhandensein einer Inversion sind bei beiden Profilen sehr ähnlich.

Im Falle des **Temperaturprofils bei Bozen** wurde der Bodensensor ab dem Jahr 2013 vom Dach eines Gebäudes in den daneben liegenden Garten versetzt (Höhenunterschied 10 m). Die Inversionsbestimmung nach beiden Messpunkten für ein Jahr mit Parallelmessung ergab im Jahresmittel die praktisch gleiche Inversionshäufigkeit mit leichten Unterschieden in einzelnen Monaten. Von daher wurde dieses Profil weiterverwendet.

Im **Temperaturprofil bei Erstfeld** wurde der Bodensensor Im April 2013 an einen Standort verschoben, an welchem die Einstrahlung am Morgen und Mittag geringer ist, was sich in einer Parallelmessung an tieferen mittleren Temperaturen von 10-14 Uhr gezeigt hat. ("Bericht zu den Parallelmessungen mit HOBO-Sensoren an den 7 Messpunkten des Temperaturprofils Erstfeld", innet, Dezember 2015). Entsprechend sind die Inversionen zu dieser Tageszeit etwas häufiger geworden.

Im September 2016 wurde der Sensor in 120 m Höhe leicht verschoben. Dadurch verringerte sich die Inversionshäufigkeit abends etwas, vermutlich durch grössere Exposition gegenüber hangabfließender Kaltluft. Nachdem die Standortverschiebung des Bodensensors im 2013 die Inversionshäufigkeit etwas erhöht hatte, wurde sie nun in der 0-120m-Schicht etwas verringert.

Schätzungen von Jahresmittelwerten der Inversionshäufigkeiten

In den **Temperaturprofilen von Erstfeld für 2017 und 2019** sowie **Rothenbrunnen und San Vittore für 2018** mussten die Jahresmittelwerte der Inversionshäufigkeit aufgrund von grösseren Datenausfällen geschätzt werden. Dies geschah mittels einer Regression aus mehreren früheren Jahren ohne und mit (simuliertem) Datenausfall.

4.2. Inversionen im Sommer

Inversionslagen werden oft mit winterlichen Witterungsbedingungen in Verbindung gebracht. Tagsüber ist dies richtig, während des Tages können sich Inversionen im Sommer nicht halten. Am Abend und in der Nacht hingegen kommen Inversionen auch im Sommer z.T. häufig vor. Dabei handelt es sich um Strahlungsinversionen, die also lokal durch langwellige Ausstrahlung des Erdbodens erzeugt werden; dadurch kühlt sich die bodennahe Luftschicht ab und wird kälter als die darüber liegende Schicht, was nach Definition eine Inversion darstellt. Die absoluten Temperaturen, dass es im Sommer wärmer ist als im Winter, spielen dabei keine Rolle, nur die Temperaturdifferenz zwischen Boden und Höhe zählt.

Die Abstrahlungsleistung des Erdbodens ist im Sommer durchschnittlich etwa einen Drittel grösser als im Winter, da sie mit der Temperatur stark zunimmt (Stefan-Boltzmann-Gesetz). Von daher ist die Ausbildung einer Inversion im Sommer rascher möglich als im Winter. Ein Teil der Abstrahlung wird durch Wasserdampf, Spurengase, Aerosolteilchen und insbesondere Wolken wieder zurückgeworfen, so dass es nachts vor allem bei klarem Himmel stark auskühlt.

Die Ausbildung von sommerlichen Strahlungsinversionen wird am Beispiel des Temperaturprofils bei Radfeld (Tiroler Inntal) illustriert. Für die drei Sommer 2017, 2018 und 2019 werden je zwei Piktogramme gezeigt:

- Die Differenz der Temperatur am Talboden zum jeweiligen Tagesmaximum; hohe Differenzen (= starke Auskühlung) entstehen nur in klaren Nächten.
- Das Auftreten von Inversion in der Schicht bis 150 m über Grund.

Die hohe Koinzidenz zwischen hoher Temperaturdifferenz zum Maximum und Inversion ist augenscheinlich, unabhängig von den absoluten Temperaturen.

Die grösste Auskühlung erfolgt in den frühen Morgenstunden, aber auch spät-abends kann sie in Einzelfällen recht gross sein.

Inversion und Temperaturdifferenz zum Tagesmaximum, Sommer bei Radfeld

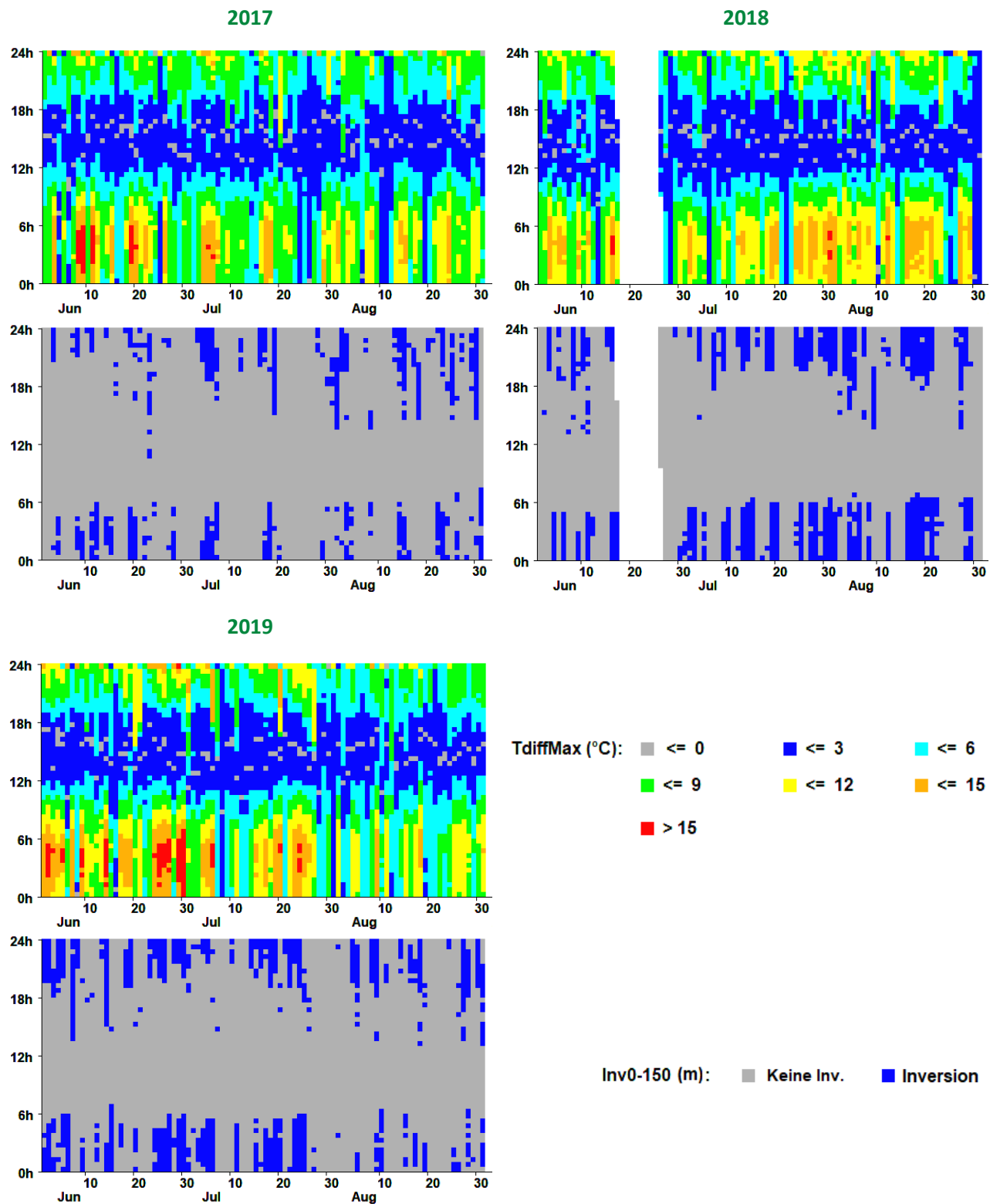


Abbildung 4.4: Temperaturdifferenz zum Tagesmaximum am Talboden (jeweils oben) und Inversionsauftreten (jeweils unten) bei Radfeld/Tiroler Inntal, Sommer 2017-2019.

4.3. Diskussion der Spitzen in den Inversionshäufigkeiten 2011 und 2015

Die Jahre 2011 und 2015 zeigten hohe Inversionshäufigkeiten auf der Alpen-nord- und –Südseite sowohl in den bodennahen als auch in den hochreichenden Schichten.

Für 2011 kann dieses Phänomen mit der **Häufigkeit bestimmter Wetterlagen** erklärt werden. Eine Studie für den Kanton Graubünden ("Trends in den Inversionshäufigkeiten und Wetterklassen CAP9 und GWT10", Oekoscience, 2012) hat gezeigt, dass die Abnahme der Inversionshäufigkeit von 2002-2010 bei Erstfeld und Rothenbrunnen mit einer Abnahme der Häufigkeit hochdruckbestimmter Wetterlagen über Mitteleuropa einhergegangen ist, dass aber auch die Inversionshäufigkeit innerhalb der einzelnen Wetterlagen zurückgegangen ist.

Zur Klassierung der Wetterlagen wurden die 9 'CAP'-Klassen herangezogen ("Cluster Analysis of Principal Component"): Die Wetterlagenklassen basieren auf den Analyse- und Vorhersagedaten des ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) und werden automatisch mit Hilfe der Klassifikationssoftware "cost733class" bestimmt, die im Rahmen der Cost Aktion 733 "Harmonization and Applications of Weather Type Classifications for European Regions" entwickelt wurde.

Im Jahre 2011 waren die CAP-Klassen 3 (Westlage über Nordeuropa) und 5 (Hoch über den Alpen) markant häufiger als im Mittel von 2002-2010, wohingegen die CAP-Klassen 6 (Zyklonale Nordlage) und 9 (Zyklonale Westlage über Südeuropa) deutlich seltener waren. Die im Jahr 2011 häufigeren Klassen 3 und 5 wiesen in der erwähnten Studie von 2002-2010 40-45% Inversionshäufigkeit auf, die selteneren Klassen 6 und 9 lediglich 7-14%. Dadurch erklärt sich der Wiederanstieg der Inversionshäufigkeit im Jahr 2011, welcher vor allem im Herbst deutlich war.

Ebenfalls kam es im Jahr 2015 zu hohen Inversionshäufigkeiten. In diesem Fall waren vor allem anhaltende Inversionslagen im Winter die Ursache.

4.4. Beispiel langanhaltender Inversionen auf der Alpensüdseite im Dezember 2021

Der Dezember 2021 wies auf der Alpensüdseite sehr viele Inversionen auf. Die beiden Profile Moleno und San Vittore liegen relativ nahe beieinander (s. Karte) und zeigen dennoch einen markanten Unterschied: Die Inversionshäufigkeit betrug in Moleno 68%, in San Vittore 97.5%, was als ausserordentlich hoch bezeichnet werden muss.

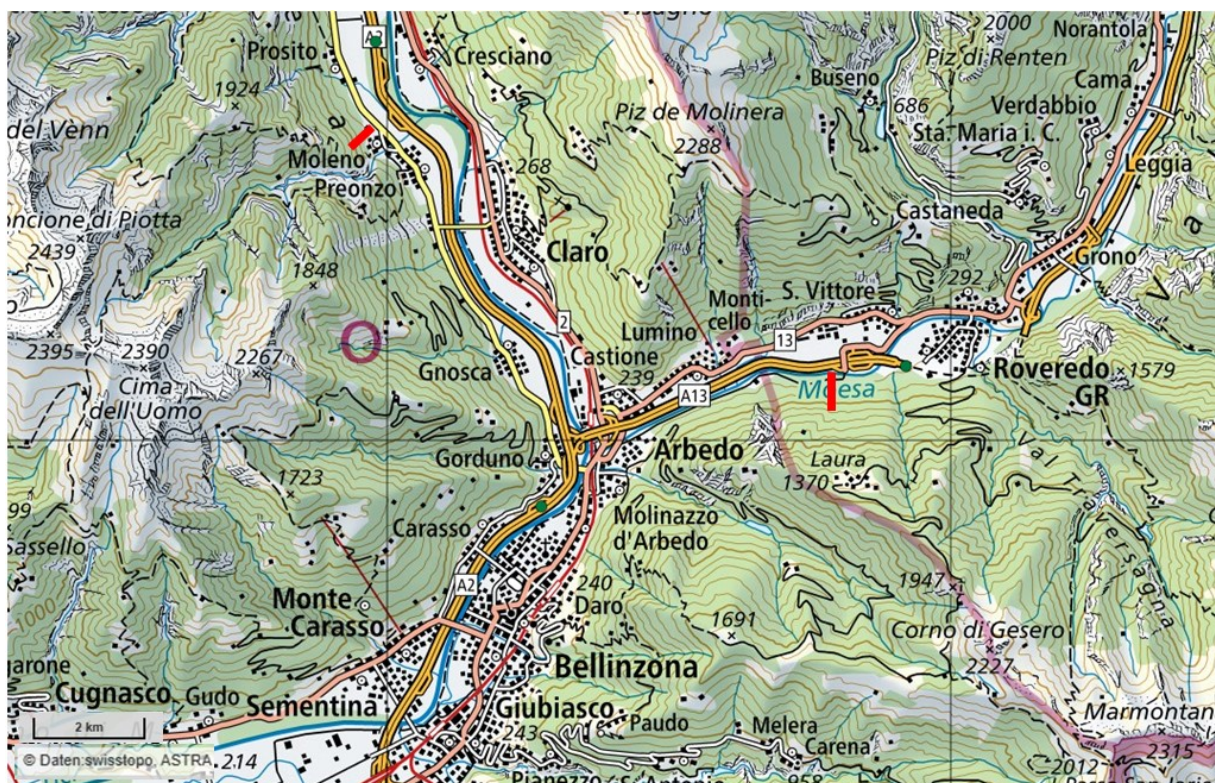


Abbildung 4.5: Lage der Temperaturprofile (Kennzeichnung als rote Linien) bei Moleno (Tessin) und San Vittore (Graubünden).

Der Unterschied in den Inversionshäufigkeiten erschliesst sich durch eine Betrachtung der Temperaturverläufe in den verschiedenen Sensorhöhen, sowohl im mittleren Tagesgang als auch in den Tagesmitteln (s. nächste Abbildung). Der Fusspunkt des Profils liegt bei Moleno (255 m ü.M.) nur leicht tiefer als bei San Vittore (266 m ü.M.).

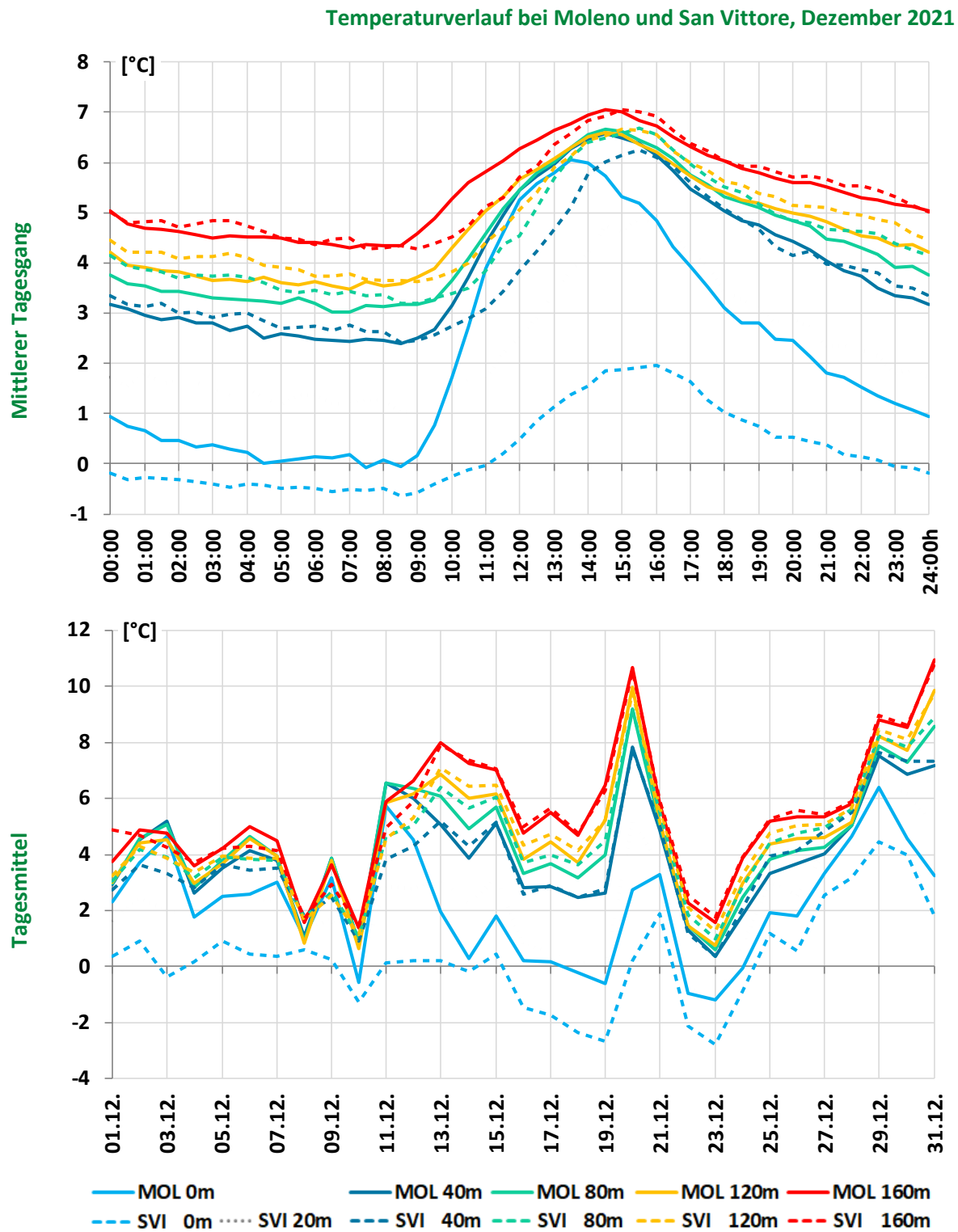


Abbildung 4.6: Mittlere Tagesgang (oben) und Tagesmittel (unten) von Temperaturen je Sensor bei Moleno und San Vittore, Dezember 2021.

Auf 80, 120 und 160 m ü.Gr. sind die Temperaturen in den beiden Profilen sowohl im mittleren Tagesgang als auch in den Tagesmitteln praktisch identisch; die

beiden Talabschnitte lagen also in der gleichen Luftmasse, wobei in beiden Profilen galt: Je weiter oben, desto wärmer. Dies galt weitgehend auch für die Höhe 40 m ü.Gr. Nur von 10 – 15 Uhr war es in dieser Luftschicht bei Moleno mehr als 1 °C wärmer als bei San Vittore. Die grosse Temperaturdifferenz stellte sich am Talboden ein: In der Nacht war es bei San Vittore im Durchschnitt 0.5 – 1 °C kälter, von 10 – 17 Uhr mehr 2 °C kälter als bei Moleno.

Von 10-16 Uhr war bei Moleno der Bodensensor durchschnittlich nicht mehr als 1.5°C kälter, es kam über Mittag zu einer deutlichen Erwärmung auch am Talboden. Bei San Vittore war der Bodensensor *im Mittel über den ganzen Monat Dezember 2021* hingegen ganztags 3-4 °C kälter als der Sensor in 40 m ü.Gr. Dies erklärt die höhere Inversionshäufigkeit bei San Vittore, wo es hauptsächlich tagsüber zu mehr Inversionen kam.

Über der Ebene bei San Vittore liegt im Winter oft ein lokaler Kaltluftsee innerhalb der regionalen Inversionsschicht, welcher weniger als 40 m, bisweilen weniger als 20 m Mächtigkeit aufweist (man beachte den Temperaturverlauf des 20m-Sensors bei San Vittore).

4.5. Vergleich der Inversionshäufigkeiten in den TP Unterinntal (Tirol) und Radfeld für 2023

Das Profil 'Radfeld' liegt in einem steilen NNW-Hang. Das Profil 'Schwaz' (NW-Hang) wurde 2014 durch '**Unterinntal**' ersetzt. Seit 2014 gab es gewisse Artefakte durch Eingriffe wie Holzschlägerungen, Bau von Straßen und Stützmauern etc. Für 2014 und 2015 wurden die Inversionshäufigkeiten korrigiert. Ab 2016 wird das TP Innsbruck (Südhang oberhalb Innsbruck) der GeoSphere Austria für die Inversionsbestimmung im oberen Unterinntal verwendet. In einem Quervergleich mit dem TP Schwaz konnte die Eignung des TP Innsbruck festgestellt werden.

Die beiden hier betrachteten Profile Radfeld und Unterinntal sind etwa 30 km auseinander. Das TP Radfeld weist generell etwas häufigere Inversionen auf, deutlich im Sommer, vor allem in den Hitzesommern 2015, 2018 und 2022. Die starke sommerliche Einstrahlung verstärkte den 'Urban Heat Island'-Effekt Innsbrucks bis weit in den Abend hinein, was die Inversionsausbildung verglichen mit Radfeld verringerte.

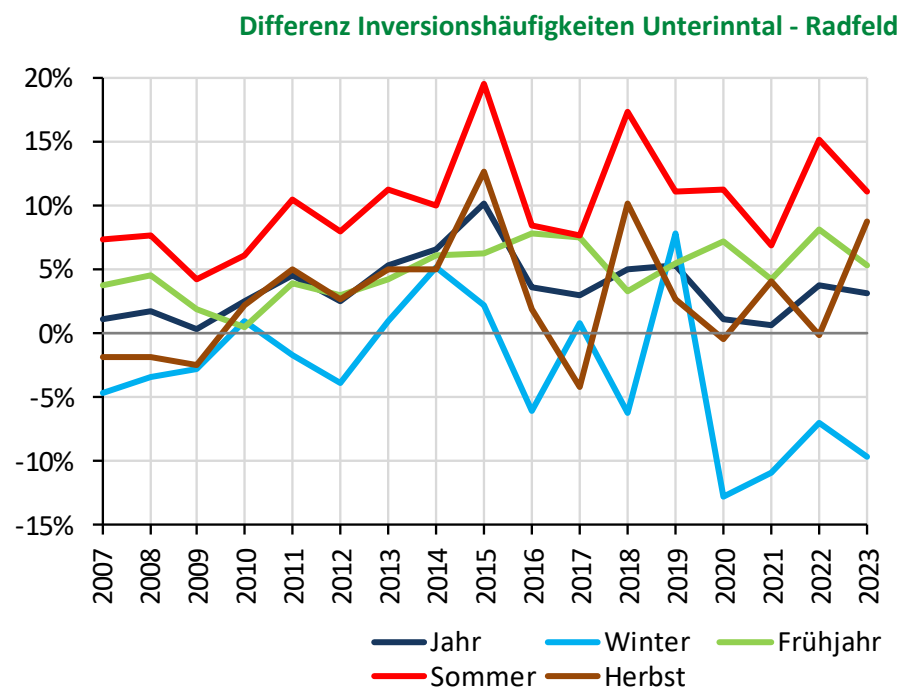


Abbildung 4.7: Differenz in den Inversionshäufigkeiten der TP Unterinntal und Radfeld je Jahreszeit, 2007-2023.

Seit 2014 (dem Jahr des Wechsels von 'Schwaz' auf 'Innsbruck') hat sich die Differenz in den Inversionshäufigkeiten der beiden Profile trotz Fluktuationen

insgesamt nicht verändert, außer im Winter 2020-2023, was im Rahmen dieser Studie nicht weiter untersucht werden kann. Ein messtechnischer Fehler kann ausgeschlossen werden, denn die übrigen Jahreszeiten zeigen dieses Verhalten nicht.

Beide Profile zeigen den typischen Tagesgang der Inversionsausbildung, wobei das Minimum im TP Unterinntal etwa 3 Stunden später erfolgt als beim TP Radfeld.

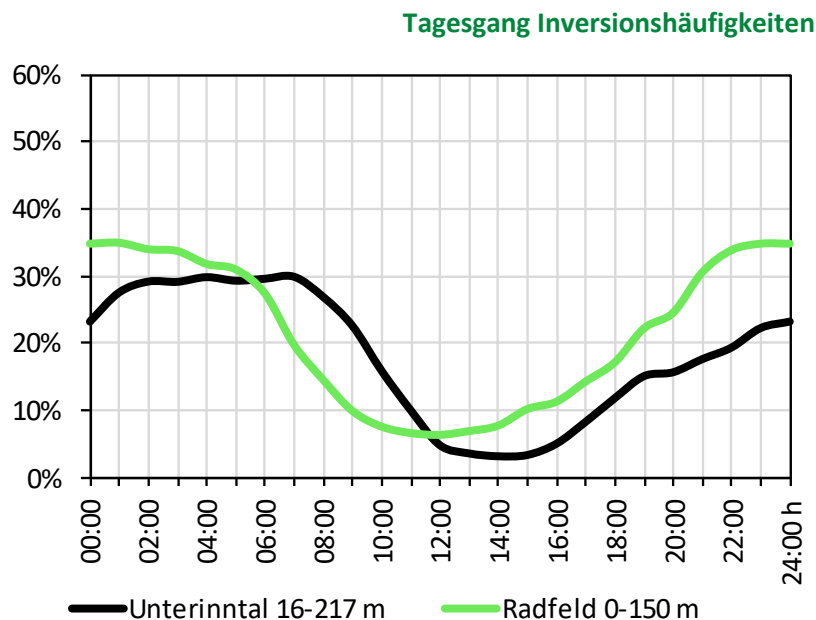


Abbildung 4.8: Mittlerer Tagesgang (MEZ) der Inversionshäufigkeit, TP Unterinntal und Radfeld, 2023.

In den einzelnen Jahreszeiten sind deutliche Unterschiede im Tagesgang der Inversionshäufigkeit in den beiden Profilen zu sehen. Jedoch gilt für beide Profile und alle Jahreszeiten, dass Inversionen vor allem nachts auftreten. Eine Rolle spielt auch, dass das TP Radfeld auf der Höhe des Inntalbodens startet, das TP Unterinntal 16 m oberhalb des Talbodens, entsprechend der Lage der Messstelle Vomp.

Hohe Inversionshäufigkeiten herrschen im TP Radfeld im Winter von 19 – 7 Uhr, im Sommer von 22 – 5 Uhr. Zu diesen Zeiten sind die lufthygienischen Ausbreitungsbedingungen besonders schlecht.

Tagesgang Inversionshäufigkeiten je Jahreszeit

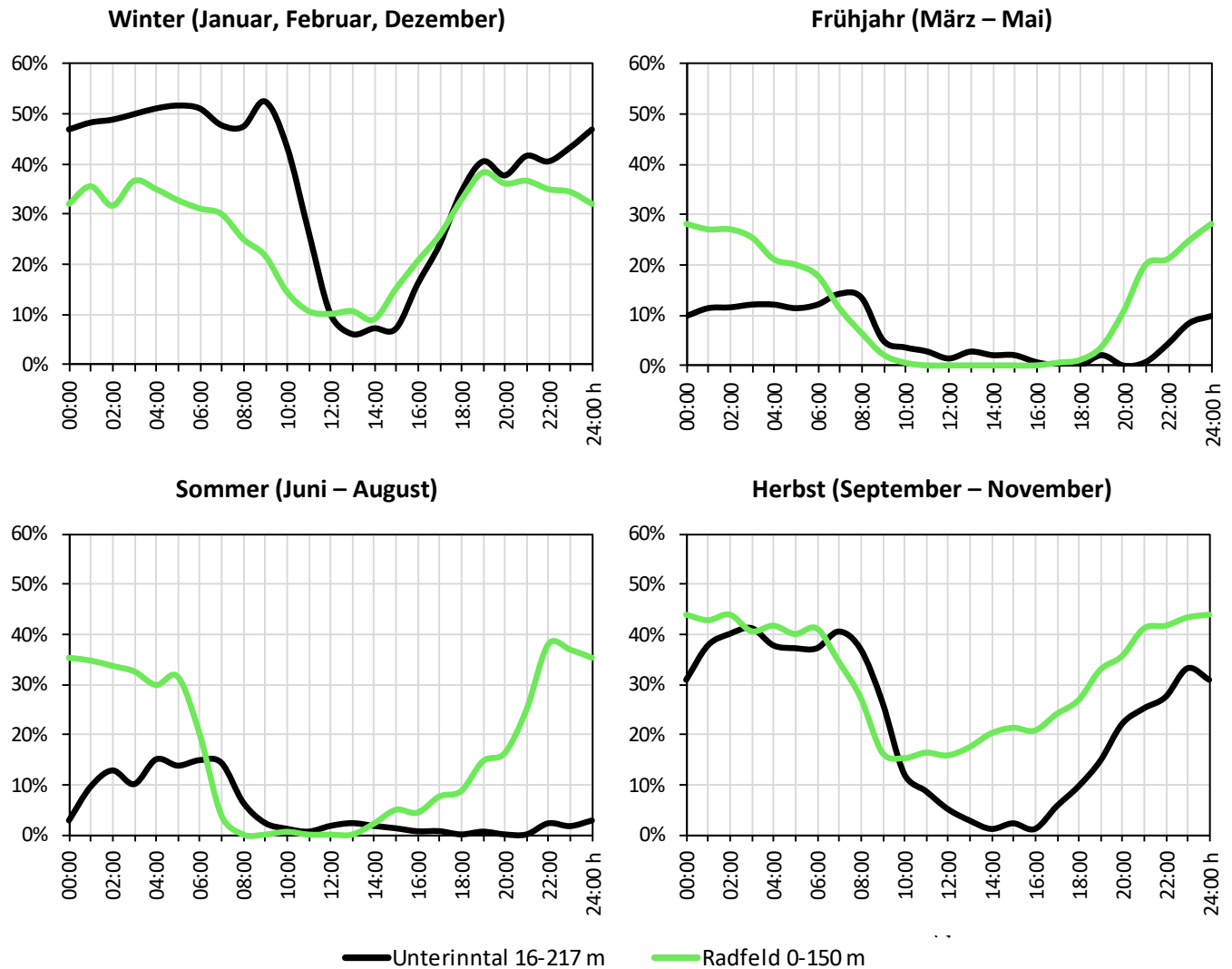


Abbildung 4.9: Mittlerer Tagesgang (MEZ) der Inversionshäufigkeit je Jahreszeit, TP Unterinntal und Radfeld, 2023.

Währenddem das TP Unterinntal (Schwaz/Innsbruck) eher repräsentativ für eine leicht erhöhte Hanglage ist (wie die Station Vomp), ist das TP Radfeld für die Inn-talebene repräsentativ, in welcher viele Emissionen stattfinden.

4.6. Zusammenfassung der Inversionshäufigkeiten bis 2023

Um Schwankungen an einzelnen Standorten etwas auszugleichen, wurden die Profile in drei Gruppen zusammengefasst. Dabei wurde nach Alpennordseite (ANS) und Alpensüdseite (ASS) unterschieden. Die für die Zusammenfassung in diesem Bericht bis 2023 verwendeten Profile sind:

- Bodennahe Schicht ANS: Erstfeld 0-120 m ü.Gr., Rothenbrunnen 0-120 m ü.Gr., Radfeld 0-150 m ü.Gr., Unterinntal 16-217 m ü.Gr.
- Hochreichende Schicht ANS: Erstfeld 0-500 m ü.Gr., Unterinntal 16-338 m ü.Gr., Dornbirn 0-607 m ü.Gr.
- Bodennahe Schicht ASS: Moleno 0-120 m ü.Gr., San Vittore 0-120 m ü.Gr.

Inversionshäufigkeit von Stationsgruppen pro Jahr je Schicht

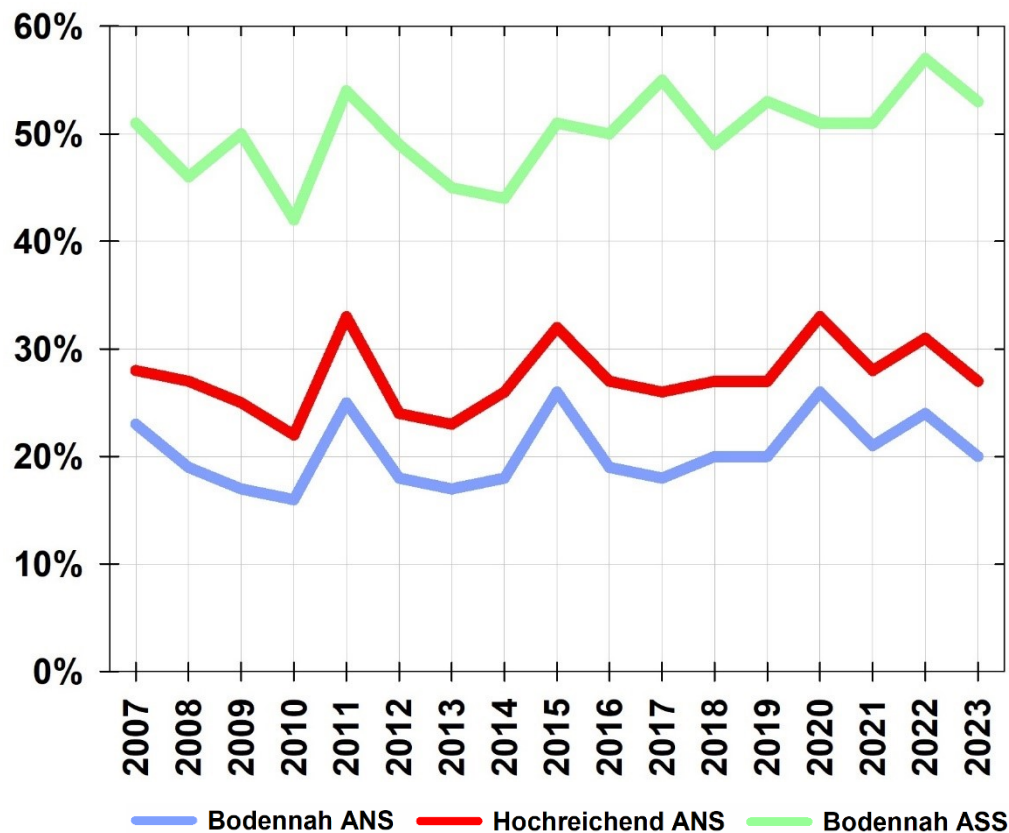


Abbildung 4.10: Mittlere Inversionshäufigkeiten auf der Alpennordseite (ANS; bodennah und hochreichend) bzw. Alpensüdseite (ASS; bodennah) je Luftschicht und Jahr, 2007-2023.

Die relativen Verläufe der Inversionshäufigkeit auf der Alpennordseite weisen über die Jahre bzw. Jahreszeiten für die bodennahen und die hochreichenden Luftschichten grosse Ähnlichkeiten auf. Die Jahreshäufigkeiten verlaufen weitgehend parallel. Die Inversionshäufigkeiten sind in den hochreichenden Schichten in allen

Jahreszeiten höher als in den bodennahen, weil die abgehobenen Inversionen noch dazu kommen und weil schwache Inversionen bisweilen erst über eine grössere Luftschicht die Toleranzmarge übertreffen.

Inversionshäufigkeiten von Stationsgruppen je Jahreszeit und Schicht

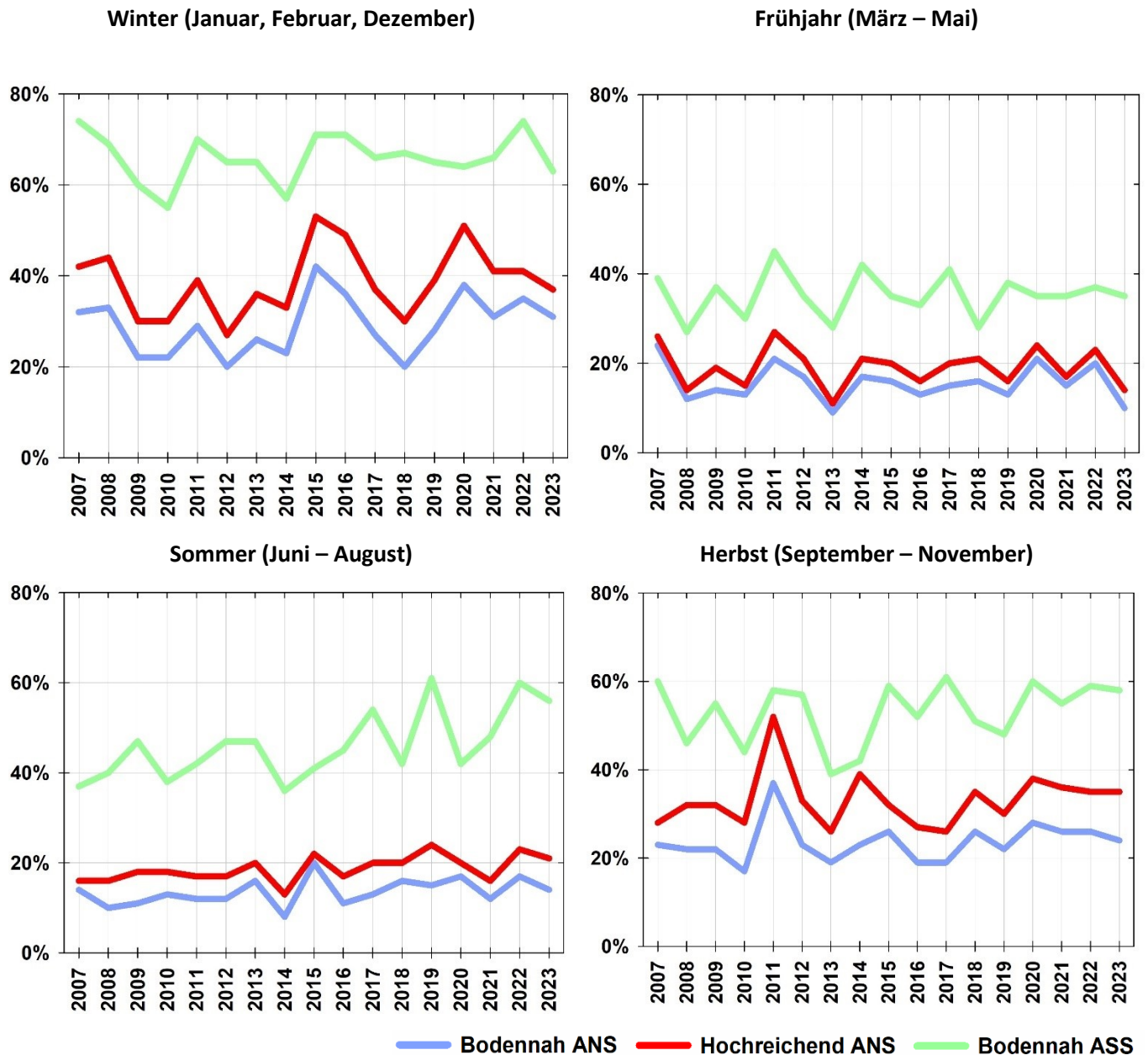


Abbildung 4.11: Mittlere Inversionshäufigkeiten auf der Alpennordseite (ANS; bodennah und hochreichend) bzw. Alpensüdseite (ASS; bodennah) je Luftschicht und je Jahreszeit, 2007-2023.

Die Verläufe der Inversionshäufigkeit auf der Alpensüdseite weisen eine eingeschränkte Ähnlichkeit mit der Alpennordseite auf. Am ehesten ist dies im Winter

der Fall, wenn europäische Wetterlagen einen grossen Einfluss auf das lokale Inversionsgeschehen haben.

Die Aussagen zum Verlauf der Inversionshäufigkeiten auf S. 9/11 (*kursive Textpassagen*) gelten auch für die Zusammenfassungen.

Auch in dieser zusammenfassenden Darstellung zeigt sich die Spitze 2015 und 2020 vor allem im Winter, diejenige im 2011 vor allem im Herbst, diejenige vom 2022 im Frühjahr und Sommer.

Die Inversionshäufigkeiten bewegen sich in den hochreichenden Schichten in allen Jahreszeiten grundsätzlich auf einem höheren Niveau, vor allem im Herbst und Winter. Hochreichende Inversionen hängen bisweilen mit einer Heranführung von Kaltluft zusammen (z.B. aus dem mittelländischen Kaltluftsee in der Schweiz), welche in den untersten Luftschichten neutral oder nur leicht stabil geschichtet sein kann. Ausserdem kann im Herbst noch vorhandene Bodenwärme zur Auflösung bzw. Nichtbildung bodennaher Inversionen beitragen.

4.7. Entwicklung der Inversionshäufigkeiten bis 2023

Der **Entwicklung** der Inversionshäufigkeit wird ausgedrückt als mittlere Änderung der jährlichen Inversionsdauer pro Jahr bzw. pro Jahreszeit. Die Abbildung 4.9 zeigt die Entwicklung der Trends der Inversionshäufigkeit (als Änderung der Anzahl Stunden mit Inversion pro Jahr) von 2002-2014 (oben) bzw. von 2014-2023 (unten) für die Orte, für welche aktuell bis 2023 genügend Messdaten vorliegen.

Bis ins Jahr 2014 zeigte sich ein deutlicher Trend zu abnehmenden Inversionshäufigkeiten in praktisch allen Profilen. Nachfolgend ergab sich eine Stabilisierung und ein verbreiteter Wiederanstieg. Von 2002-2014 waren die Trends in den Inversionshäufigkeiten durchwegs negativ mit Ausnahme des Herbstes. Von 2014-2023 hingegen waren sie überwiegend positiv in teilweise ähnlicher Grössenordnung. Allerdings umfasste die erste Periode 12 Jahre, die zweite nur 9 Jahre; die Gesamtänderung ist in der ersten Periode also deutlich grösser. So bedeuten die -58 h/Jahr Abnahme der Inversionsdauer in den bodennahen Profilen der Alpennordseite eine Abnahme von -696 h über die 12 Jahre von 2002-2014, also 29 volle Tage, um die sich die jährliche Inversionsdauer von 2002 bis 2014 verringert hat.

Trends der Inversionshäufigkeiten

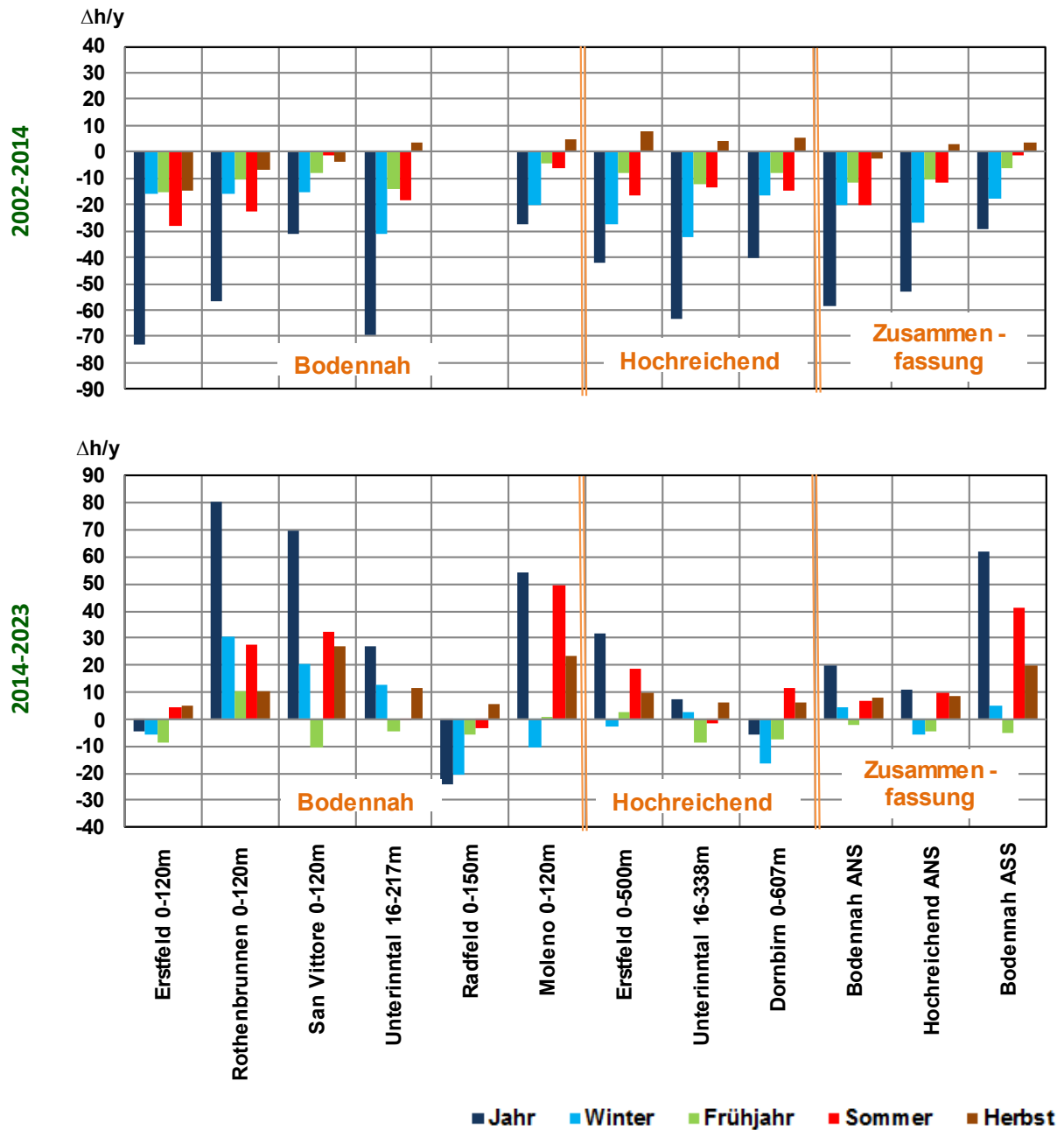


Abbildung 4.12: Trends der Inversionshäufigkeiten als mittlere Änderung der Inversionsdauer in Stunden pro Jahr bzw. pro Jahreszeit ($\Delta h/y$) über den Zeitraum 2002-2014 (oben) bzw. 2014-2023 (unten), für Gesamtjahr und die vier Jahreszeiten. Zusammenfassungen: ANS: Alpennordseite (bodennah und hochreichend); ASS: Alpensüdseite (bodennah).

Über die gesamte Beobachtungsperiode von 2002-2023 ergaben sich keine signifikanten Änderungen in der Inversionshäufigkeit. Auch in der Untersuchung "Thermische Inversionen in der Zentralschweiz 1981-2014", Oekoscience, im Auftrag

des Amtes für Umweltschutz Uri, 2015 ergaben sich keine Trends über die gesamte Beobachtungsdauer von 34 Jahren.

Insgesamt macht es den Anschein, dass nach einer Phase abnehmender Inversionshäufigkeiten von etwa 12 Jahren nun eine Stabilisierungs- und Wiederanstiegsphase folgt. In der Atmosphäre können sich natürliche Variabilitäten über viele Jahren oder Jahrzehnte ergeben, die jeweils kurzfristig durchaus signifikante Änderungen zeigen, welche aber nicht als 'endgültig' betrachtet werden dürfen.

Der Blick auf die Trends in den Jahreszeiten zeigt einen wesentlichen Unterschied zwischen den beiden Phasen: Währenddem in der Abnahmephase von 2002-2014 der Winter die grössten Abnahmen zeigte, sind es in der folgenden Anstiegsphase von 2014-2023 vor allem Sommer und Herbst, die vom Anstieg der Inversionshäufigkeit betroffen sind. Der Grund dafür ist nicht bekannt, die mittlere Bewölkung hat sich kaum verändert in diesem Zeitraum.

Aus der Tatsache, dass es keinen signifikanten Trend gibt, darf keinesfalls geschlossen werden, dass Änderungen in der Inversionshäufigkeit keinen Einfluss auf eine bestimmte Immissionssituation gehabt hätten. Auch zufällige Schwankungen der Inversionshäufigkeit beeinflussen die jeweiligen Immissionen.

5. Inversionen und Wetterlagen

Eine Studie vom Dezember 2023 befasste sich mit dem Zusammenhang zwischen Wetterlage und Inversionsauftreten sowie den daraus abzuleitenden Folgen für die Immissionen ("Einfluss der Wetterlagen auf Inversionen und Immissionen", Oeko-science, im Auftrag der Kantone Uri und Graubünden sowie der Bundesländer Vorarlberg und Tirol, Dezember 2023).

Wetterlagenklassifikation

Zur Klassifikation von Wetterlagen hat sich die sogenannte CAP-Klassifizierung ("Cluster Analysis of Principal Component") gut im Zusammenhang mit Inversionsauftreten bewährt. Diese Wetterlagenklassen basieren auf den Analyse- und Vorhersagedaten des ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) und werden automatisch von MeteoSchweiz mit Hilfe der Klassifikations-software "cost733class" bestimmt, die im Rahmen der Cost Aktion 733 "Harmonization and Application of Weather Type Classifications for European Regions" entwickelt wurde.

Es wurde die CAP-Klassifizierung mit 9 Klassen verwendet.

CAP 9	Beschreibung
1	Indifferente Nordostlage
2	Zyklonale West-Südwestlage, strömungsschwach
3	Nördliche Westlage
4	Indifferente Ostlage
5	Hoch über den Alpen
6	Zyklonale Nordlage
7	Zyklonale West-Südwestlage
8	Hoch über Mitteleuropa
9	Südliche Zyklonale Westlage

Die Häufigkeit der verschiedenen CAP-Klassen variiert stark von Jahr zu Jahr, besonders bei den Jahreszeiten. Es gibt aber kaum signifikante Trends, ausser dass die CAP-Klasse 5 (Hoch über den Alpen) im Winter markant seltener geworden ist (-8%).

Inversionshäufigkeit und CAP

In allen Jahreszeiten variiert die **mittlere** Inversionshäufigkeit stark mit der CAP-Klasse. Aber von Jahr zu Jahr gibt es innerhalb jeder CAP-Klasse starke Schwankungen in der mittleren jahreszeitlichen Inversionshäufigkeit. Infolgedessen kann man die resultierenden Inversionshäufigkeiten je Jahreszeit nicht aus der Verteilung der CAP-Klassen berechnen, so dass deren Variabilität

mit genügend kleinem Fehler wiedergegeben wird. Die Wetterlage hat im langzeitlichen Mittel einen dominierenden Einfluss auf das Inversionsgeschehen, aber in der einzelnen Jahreszeit haben andere Variablen offenkundig auch einen grossen Einfluss.

NO_x & PM₁₀ und CAP

Grundsätzlich treten die höchsten Immissionen an NO_x und PM₁₀ in den CAP-Klassen mit der höchsten Inversionshäufigkeit auf (Klassen 5 (H Alpen) und 8 (H M-Europa), auch 3 (Nördl. W)). Die deutlichen Abnahmen sind in allen CAP-Klassen zu erkennen.

Ozon und CAP

Beim mittleren täglichen Ozonmaximum tritt insgesamt gesehen die Klasse 3 als Spitzenreiter auf, aber nicht sehr ausgeprägt. Es gibt nur wenige signifikante Änderungen, welche sowohl Zunahmen als auch Abnahmen sein können – insgesamt also keine wesentlichen Änderungen im mittleren täglichen Ozonmaximum von 2002-2021, wobei die erhöht liegenden Stationen Sulzberg (Dornbirn), Rigi-Seebodenalp (Erstfeld) und Angerberg (Innsbruck) im Frühjahr und Sommer verbreitet Abnahmen ohne Signifikanz aufweisen.

Die mittleren täglichen Ozonmaxima an der Nordkette (1958 m ü.M.) oberhalb Innsbruck sind in allen Jahreszeiten und CAP-Klassen höher als bei Angerberg (602 m ü.M.; ca. 90 m über Talboden); beide Stationen liegen an der gegen S-SE exponierten Talflanke des Tiroler Inntals. Die Unterschiede zwischen den beiden Stationen sind über alle CAP-Klassen im Herbst und Winter am größten und im Sommer am kleinsten.

Temperatur & Niederschlag und CAP Übers ganze Jahr gesehen zeigen die CAP-Klassen 5 und 8 (Hoch über den Alpen bzw. über Mitteleuropa) überdurchschnittliche Erwärmungen an den Standorten Dornbirn und Innsbruck. Ihr Anteil an der gesamten Erwärmung von 0.8-0.9 °C von 2002-2021 beträgt 0.5-0.6 °C, also rund zwei Drittel, obwohl diese beiden Klassen nur 16% Zeitanteil haben. Die übrigen 7 CAP-Klassen mit 84% Zeitanteil haben einen Anteil von etwa 0.3 °C an der gesamten Erwärmung (ein gutes Drittel). Die Temperaturverteilungen nach CAP-Klasse ähneln sich an den beiden Standorten sehr; lokale Temperatureffekte scheinen da nur eine untergeordnete Rolle zu spielen.

Eine wesentliche Rolle beim stark überdurchschnittlichen Anteil der beiden Hochdrucklagen (CAP 5 und 8) an der globalen Erwärmung dürfte die Zunahme der Globalstrahlung am Boden in Mitteleuropa seit den 80er Jahren gespielt haben; dies hat sich vor allem in Hochdrucklagen ausgewirkt.

(→ <https://doi.org/10.1127/metz/2024/1201>)

Die mittleren Niederschlagsmengen nach CAP-Klasse unterscheiden sich deutlich. Wenig überraschend zeigen die beiden Hochdrucklagen 5 und 8 am wenigsten Niederschlag. Am meisten Niederschlag fällt in den CAP-Klassen 6, 7 und 9 (zyklonale Lagen). Es gibt kaum signifikante Änderungen.

Sommerinversionen

Von 2014-2021 wurde allgemein ein leichter Anstieg der Inversionshäufigkeit im Sommer beobachtet. Diese Zunahme wurde dem Verlauf der Bewölkung gegenübergestellt, denn ein klarerer Himmel führt nachts zu mehr Abstrahlung und damit zu einer verstärkten Möglichkeit einer Inversionsbildung. Im Gesamtjahr und auch je Jahreszeit betrachtet zeigten sich keine grossen Änderungen in der Bewölkung; vor allem im Winter und im Sommer hat sich die mittlere Bewölkung je CAP-Klasse in den letzten 20 Jahren nicht geändert. Für den leichten Anstieg der Inversionshäufigkeit im Sommer von 2014-2021 müssen andere Einflüsse als die Bewölkung verantwortlich sein.

Tau und CAP

Der Faktor $\tau = I_NOx \text{ [strassennahe Station]} / E_NOx \text{ [Strasse]}$ ist ein Mass für die Ausbreitungsbedingungen der Luftschadstoffe. Er hängt von der Wetterlage und der Topografie ab. Somit ist zu erwarten, dass er von der CAP-Klasse abhängt. In allen Jahreszeiten entspricht die Verteilung der Tau-Werte über die CAP-Klassen derjenigen bei den Inversionshäufigkeiten: Spitzenreiter sind die CAP-Klassen 5 (H Alpen) und 8 (H M-Europa), sodann 3 (Nördl. W). Die Inversionen bestimmen also ganz wesentlich über die Ausbreitungsbedingungen für die Luftschadstoffe.

6. Fazit

Von 2002 - 2014 zeigte sich ein deutlicher Trend zu abnehmenden Inversionshäufigkeiten in praktisch allen Profilen mit Ausnahme des Herbstes. Nachfolgend ergab sich eine Stabilisierung und ein verbreiteter Wiederanstieg in teilweise ähnlicher Grössenordnung. Über die gesamte Beobachtungsperiode von 2002-2023 ergaben sich keine signifikanten Änderungen in der Inversionshäufigkeit.

Insgesamt macht es den Anschein, dass nach einer Phase abnehmender Inversionshäufigkeiten von etwa 12 Jahren nun eine Stabilisierungs- und Wiederanstiegsphase folgt. In der Atmosphäre können sich natürliche Variabilitäten über viele Jahre oder gar Jahrzehnte ergeben, die jeweils kurzfristig durchaus signifikante Änderungen zeigen, welche aber nicht als 'endgültig' betrachtet werden dürfen.

Der Blick auf die Trends in den Jahreszeiten zeigt einen wesentlichen Unterschied zwischen den beiden Phasen: Währenddem in der Abnahmephase von 2002-2014 der Winter die grössten Abnahmen in der Inversionshäufigkeit zeigte, sind es in der folgenden Anstiegsphase von 2014-2023 vor allem Sommer und Herbst, die vom Anstieg der Inversionshäufigkeit betroffen sind. Der Grund dafür ist nicht bekannt, die mittlere Bewölkung hat sich kaum verändert in diesem Zeitraum.

Die weitere Beobachtung des Inversionsauftretens wird jedenfalls aufschlussreich sein, zumal die Inversionen einen deutlichen Einfluss auf die resultierenden Immissionen an Luftschadstoffen haben und auch ein Resultat des Strahlungshaushalts der bodennahen Luftschicht sind.