ökoscience

Zur Entwicklung der Häufigkeit atmosphärischer Inversionen im Alpenraum 1997 - 2019

Dr. Jürg Thudium
Dr. Carine Chélala
29.06.2020 / 5993.00

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:
Kanton Graubünden
Kanton Uri
Bundesland Vorarlberg
Bundesland Tirol

Titelbild: Inversion (sichtbar durch die Dunstschicht) beim Zusammenfluss von Hinterrhein und Vorderrhein, Kanton Graubünden/Schweiz. Obergrenze der Dunstschicht ca. 800 m ü.M., Talboden 660 m ü.M. Die Sonne scheint auch auf den Talboden, es ist dort 'dunstig'.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung 1

2. Zur Immissionsrelevanz der Inversionen 1

3. Geografische Lage der Temperaturprofile 8

4. Entwicklung der Inversionshäufigkeiten 1997 ï 2019 9

4.1. Zeitreihen der Inversionshäufigkeiten 1997 ï 2019 9
4.2. Inversionen im Sommer 14
4.3. Diskussion der Zeitreihen 16
4.4. Zusammenfassung der Inversionshäufigkeiten für die Alpennordseite 17
4.5. Trends in den Inversionshäufigkeiten 19
4.6. Fazit 24

5. Vorstellung von zwei weiteren Studien zum Inversionsauftreten im Alpenraum 25

5.1. Thermische Inversionen in der Zentralschweiz 1981-2014 25
5.2. Räumliche Verteilung der Stickoxide und des Feinstaubes im Urner Reusstal während winterlichen Inversionslagen (1998) 25

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1: Monatsmittel von NOx und Inversionshäufigkeit in den Wintermonaten (Jan-Feb und Nov-Dez) 2008-2010 bei Moleno, Tessin. 2

Abbildung 2.2: Inversionshäufigkeit (in der Schicht 0-500m) und NOx-Immissionen je Jahreszeit bei Erstfeld, 2007-2016. 3

Abbildung 2.3: Mittlerer Tagesgang (2016) und Jahresmittelwerte (2013-2016) der NOx-Immissionen bei Kundl (A12) je Inversionsauftreten im Winter (Januar, Februar und Dezember). 4

Abbildung 2.4: Mittlerer Tagesgang der NOx-Immissionen bei Kundl (A12) nach Inversionsauftreten je Jahreszeit 2018. Inversionen bestimmt im Temperaturprofil Radfeld. 4

Abbildung 2.5: Mittlerer Tagesgang der Inversionshäufigkeit im Winter (Januar, Februar, November und Dezember) bei Dornbirn, Vorarlberg, 2016. 5

Abbildung 2.6: 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 2.7: 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 3.1: Lage der Temperaturprofile. 8

Abbildung 4.1: Inversionshäufigkeiten je Jahr für verschiedene Orte im Alpenraum und Vorland für bodennahe (oben) bzw. hochreichende Schichten (unten), 1997-2019. Gestrichelte Verbindungen für Orte auf der Alpensüdseite. 10

Abbildung 4.2: Inversionshäufigkeiten je Jahreszeit für verschiedene Orte im Alpenraum und Vorland für bodennahe Schichten, 1997-2019. Gestrichelte Linien: Orte auf der Alpensüdseite. 11

Abbildung 4.3: Inversionshäufigkeiten je Jahreszeit für verschiedene Orte im Alpenraum und Vorland für hochreichende Schichten, 1997-2019. Gestrichelte Linien: Orte auf der Alpensüdseite. 12

Abbildung 4.4: Inversionsauftreten und Temperaturverteilung bei Radfeld, Sommer 2017-2019. 15

Abbildung 4.5: Mittlere Inversionshäufigkeiten auf der Alpennordseite (ANS) je Luftschicht und Jahr, 2002-2019. 17

Abbildung 4.6: Mittlere Inversionshäufigkeiten auf der Alpennordseite (ANS) je Luftschicht und je Jahreszeit, 2002-2019. 18

Abbildung 4.7: Trends der Inversionshäufigkeiten als mittlere Änderung der Inversionsdauer in Stunden pro Jahr bzw. pro Jahreszeit (h/y) über den Zeitraum 2002-2014 (oben) bzw. 2002-2019 (unten), für Gesamtjahr und die vier Jahreszeiten. TP Schwaz wurde 2016 zu TP Unterinntal (ab dann Verwendung des TP Innsbruck), beim TP Dornbirn ist in der Grafik bis 2019 die Bergstation Gäbris durch Sulzberg ab dem Jahr 2000 ersetzt worden. ANS: Alpennordseite (Zusammenfassung). 20

Abbildung 5.1: Höhenprofile von Temperatur (blau), NOx, NO_2, PM10 und PAH im Urner Reusstal (Arniberg nahe Erstfeld) am 17.12.1998, um 08:30 und um 15:30. 26

Tabellenverzeichnis

Tabelle 4.1: Trend der Inversionshäufigkeiten (Änderung in der Anzahl Stunden mit Inversion pro Jahr bzw. pro Jahreszeit [h/y]) sowie dessen Signifikanz über den Zeitraum 2002-2019. ANS: Alpennordseite (Zusammenfassung). *Ermittlung der statistischen Kennzahlen aus ANOVA-Tabellen.* 22

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 Saisons oder gar Monaten sind die Unterschiede noch grösser. Variationen in Immissionskonzentrationen von Luftschadstoffen können ohne Betrachtung von Inversionssituationen deshalb kaum erklärt werden. Es liegen nun Messreihen von 16 Temperaturprofilen vor, bei den meisten für den Zeitraum von 2002-2019; im Einzelfall gehen die Messungen bis 1997 zurück. Es ist von grossem Interesse, ob sich bei den Inversionshäufigkeiten ein genereller Trend herausgebildet hat.

Die Inversionen wurden 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 **vier Beispielen** für Moleno und Erstfeld (Stationen an der Gotthardautobahn) sowie Kundl (Tiroler Inntal) und Dornbirn (Rheintal) aufgezeigt.

Beispiel 1: Die NOx-Konzentrationen in den Wintermonaten (Januar-Februar und November-Dezember) 2008-2010 an der Station **Moleno-A2** im Kanton Tessin korrelieren stark mit der Inversionshäufigkeit im Talabschnitt bei Moleno. Die Variabilität der NOx-Monatsmittel kann zu 84% mit der Variation der Inversionshäufigkeit erklärt werden; alle anderen Einflussfaktoren (unterschiedliches Verkehrsaufkommen, Änderung in den Emissionsfaktoren, andere Schadstoffquellen, übrige meteorologische Einflüsse) machen nur 16% der Variabilität aus. Eine Änderung der Inversionshäufigkeit um 10% führt zu einer Änderung im NOx-Monatsmittel von nahezu 20 ppb. Analysen der Luftschadstoffkonzentrationen sollten deshalb das Inversionsauftreten miteinbeziehen.

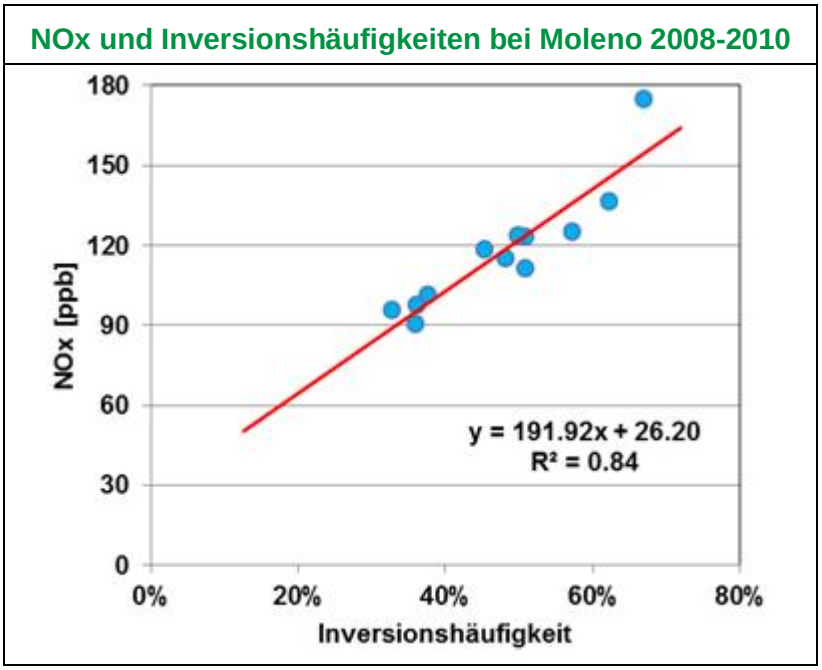


Abbildung 2.1: Monatsmittel von NOx und Inversionshäufigkeit in den Wintermonaten (Jan-Feb und Nov-Dez) 2008-2010 bei Moleno, Tessin.

Beispiel 2: Die Jahreszeitenmittel der NOx-Immissionen an der Station **Erstfeld-A2** im Kanton Uri hängen von den Inversionshäufigkeiten ab. Die nächste Abbildung zeigt die Jahreszeitenmittel der NOx-Immission und der Inversionshäufigkeit von 2007-2016. Der NOx-Verlauf wird durch die Inversionshäufigkeit moduliert, am meisten im Winter, im Frühjahr und Sommer deutlich weniger. Dies liegt daran, dass ein grosser Teil der Inversionen im Frühjahr und Sommer nachts während der emissionsärmeren Zeiten auftritt, also nicht so viel Einfluss auf die Gesamtimmissionen hat. Im Winter hingegen gibt es viel häufiger Inversionen auch tagsüber.

In der folgenden Abbildung ist aber auch der Rückgang der NOx-Immissionen in den letzten 10 Jahren zu erkennen; sie verlaufen nicht parallel zum Verlauf der Inversionshäufigkeit. *Im Verhältnis zum Inversionsverlauf* sind abrupte Rückgänge beim NOx zu erkennen, ab 2015 im Sommer und Winter, ab 2014 im Frühjahr und Herbst.

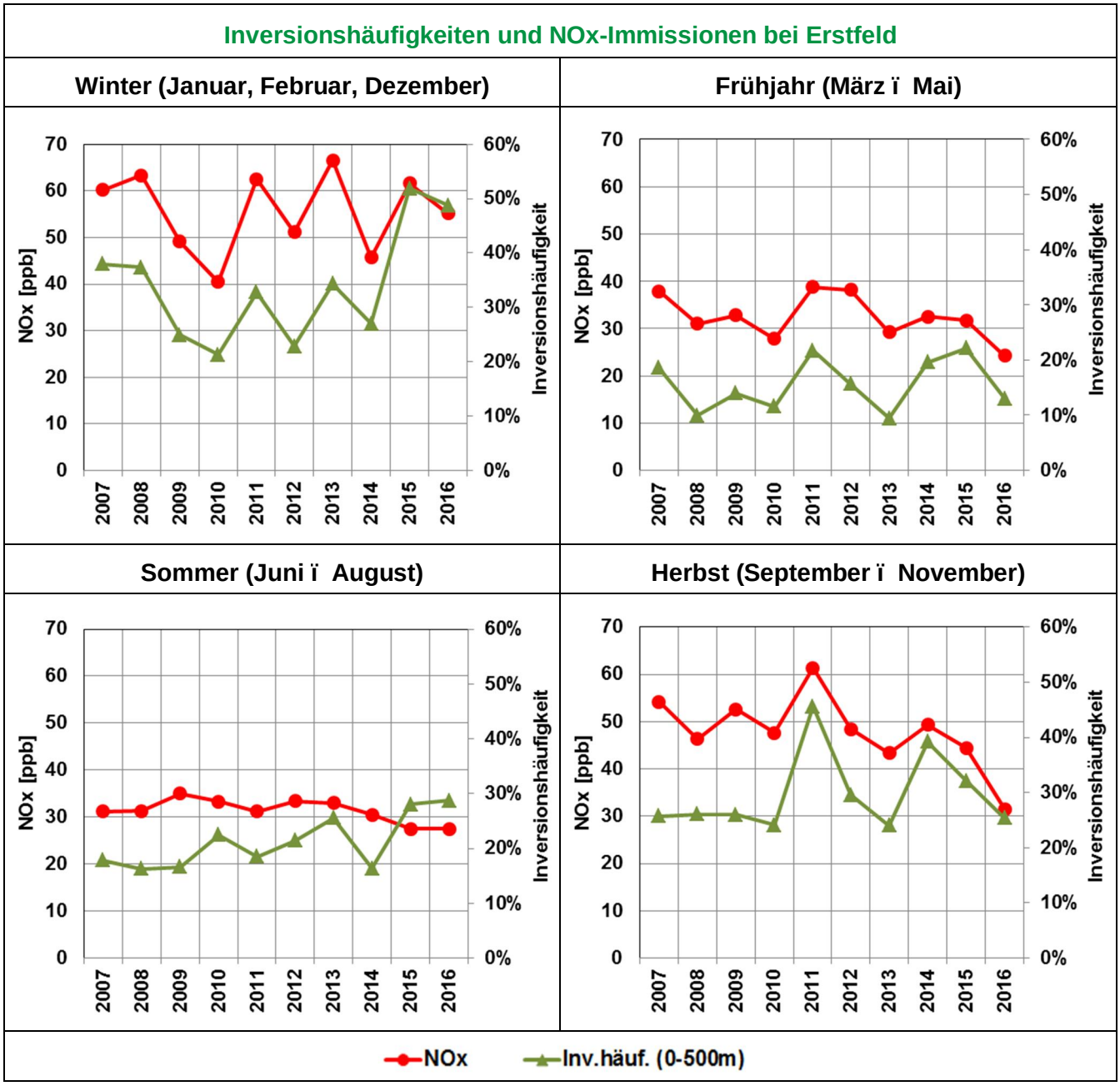


Abbildung 2.2: Inversionshäufigkeit (in der Schicht 0-500m) und NOx-Immissionen je Jahreszeit bei Erstfeld, 2007-2016.

Beispiel 3: Über den ganzen Tag (mit Ausnahme der Mittagszeit) sind die NOx-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 NOx zeigen in jedem Jahr einen markanten Inversionseinfluss.

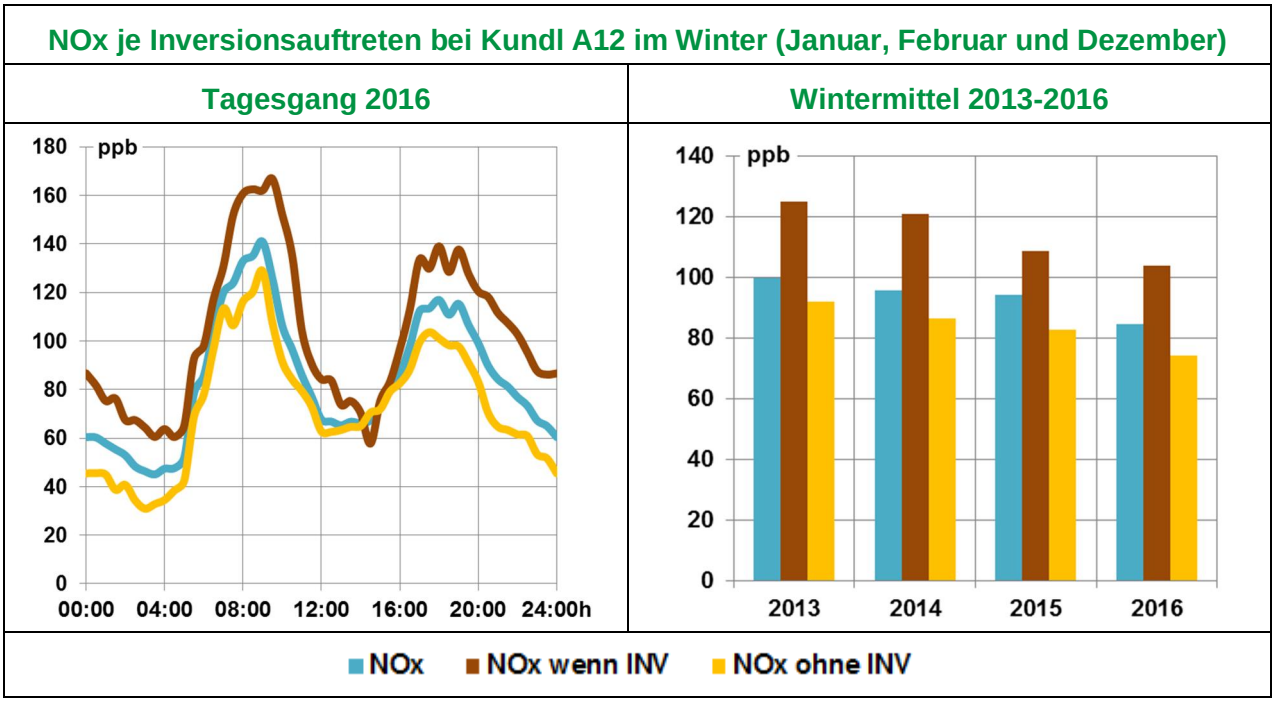


Abbildung 2.3: Mittlerer Tagesgang (2016) und Jahresmittelwerte (2013-2016) der NOx-Immissionen bei Kundl (A12) je Inversionsauftreten im Winter (Januar, Februar und Dezember).

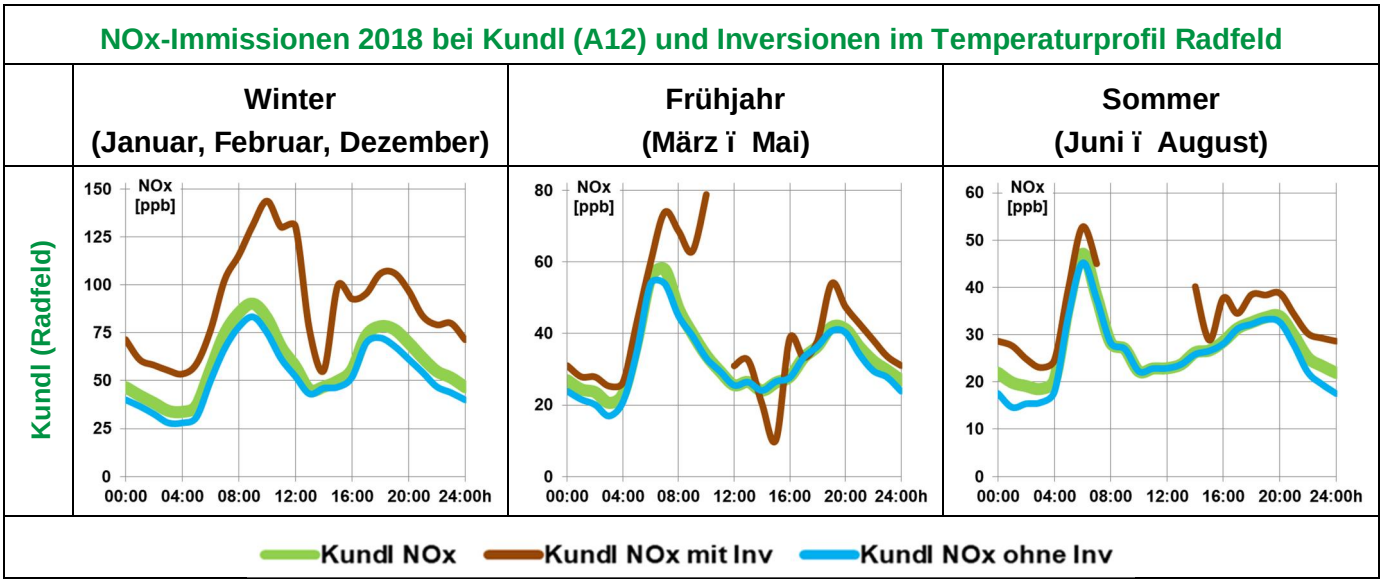


Abbildung 2.4: Mittlerer Tagesgang der NOx-Immissionen bei Kundl (A12) nach Inversionsauftreten je Jahreszeit 2018. Inversionen bestimmt im Temperaturprofil Radfeld.

Beispiel 4: Die NOx-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 zurückbehalten werden.

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

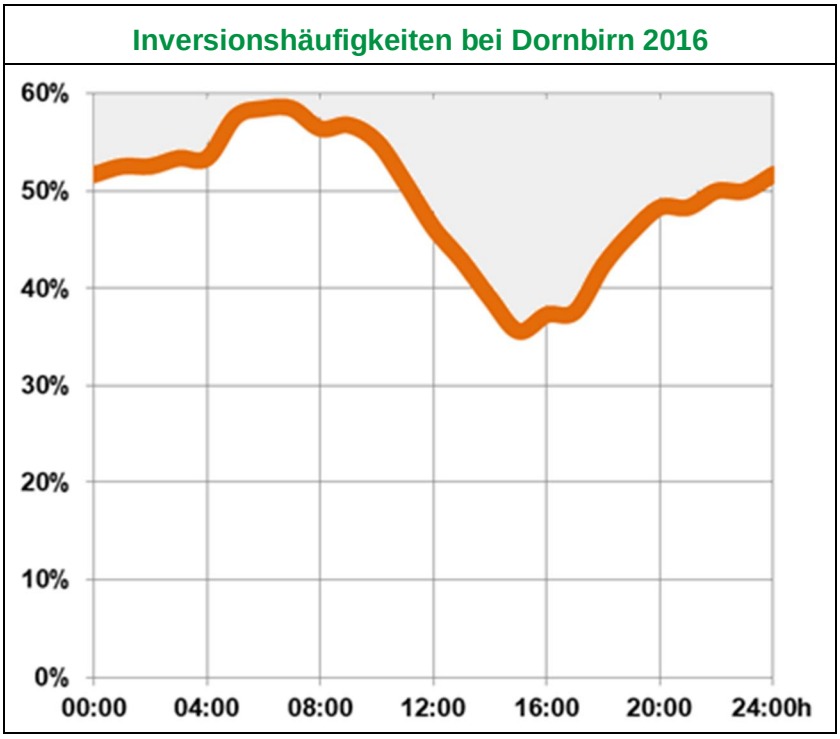


Abbildung 2.5: Mittlerer Tagesgang der Inversionshäufigkeit im Winter (Januar, Februar, November und Dezember) bei Dornbirn, Vorarlberg, 2016.

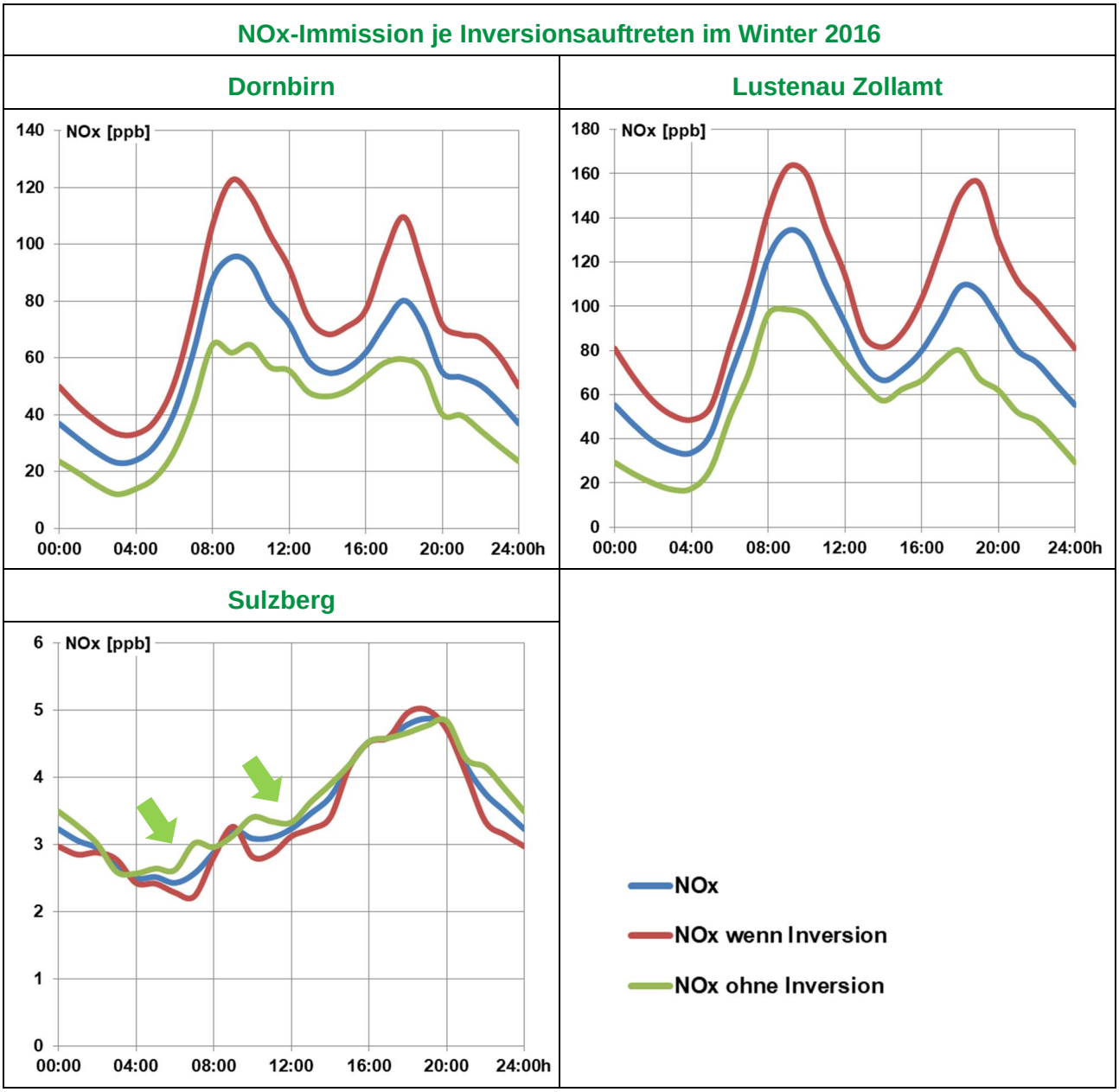


Abbildung 2.6: Mittlerer Tagesgang der NOx-Immissionen bei Dornbirn, Lustenau Zollamt und Sulzberg je Inversionsauftreten im Temperaturprofil Dornbirn im Winter (Januar, Februar, November und Dezember) 2016.

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

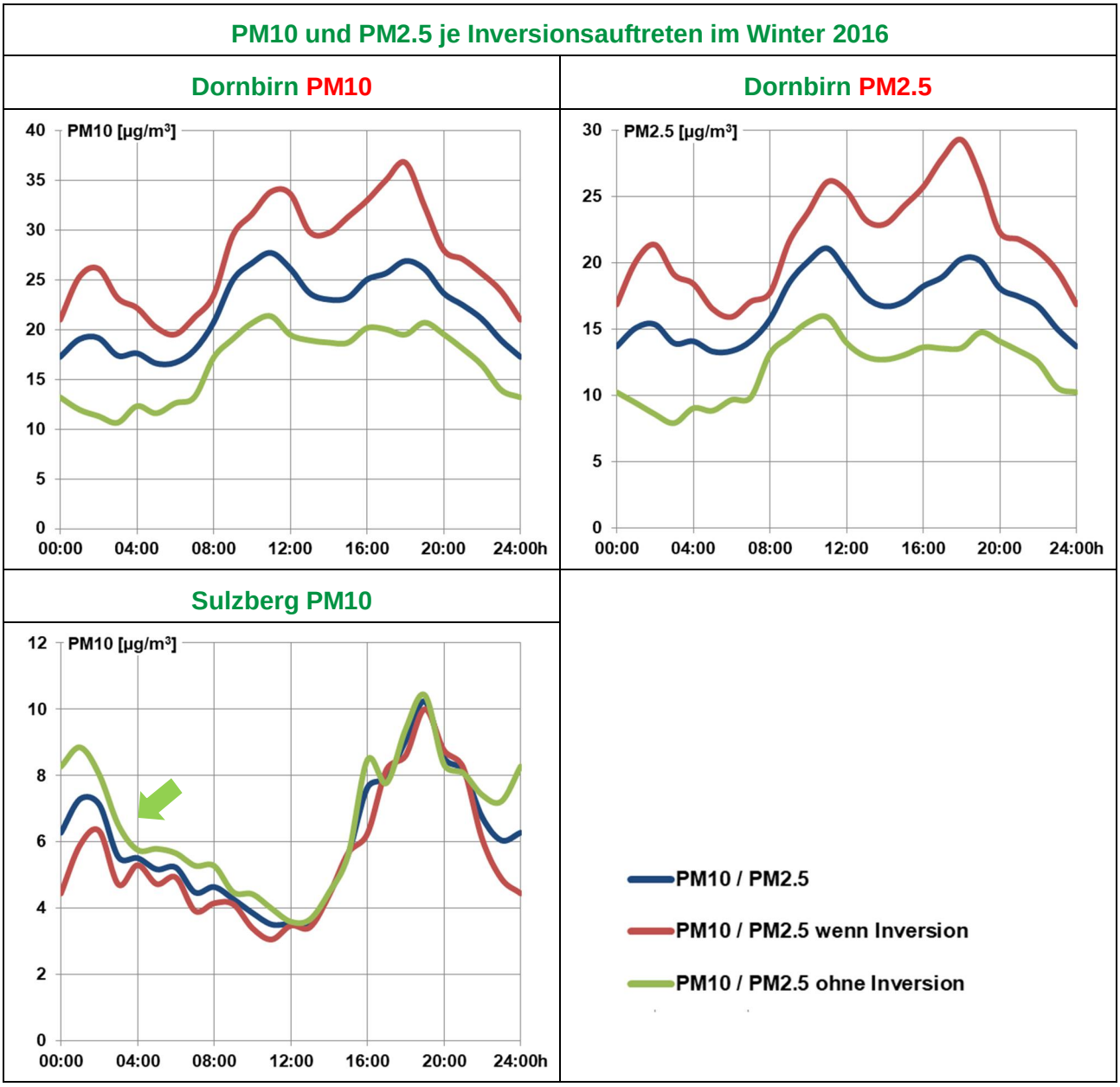


Abbildung 2.7: Mittlerer Tagesgang der PM10- und PM2.5-Immissionen bei Dornbirn, und PM10-Immissionen bei Sulzberg je Inversionsauftreten im Temperaturprofil Dornbirn im Winter (Januar, Februar, November und Dezember) 2016.

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 mehr als 300 m.

Für einige Profile konnten die Inversionsbestimmungen für bodennahe und hochreichende Schicht gemacht werden: Aosta, Attinghausen, Erstfeld, Unterinntal. Für Andermatt, Moleno, San Vittore, Rothenbrunnen, Ilanz und Radfeld gab es nur bodennahe Profile, für Dornbirn, Bozen und Muttenz nur hochreichende.

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

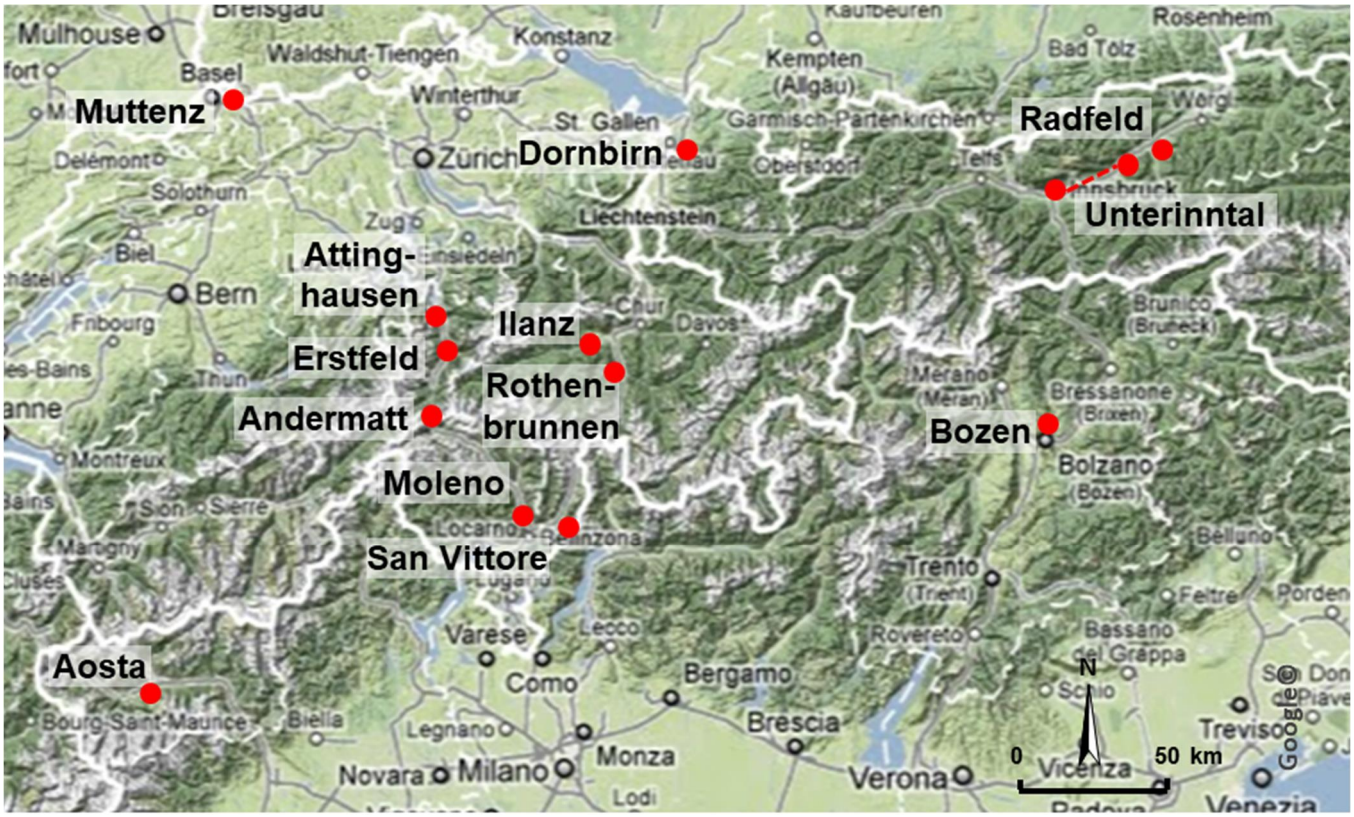


Abbildung 3.1: Lage der Temperaturprofile.

4. Entwicklung der Inversionshäufigkeiten 1997 – 2019

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 °C/100m 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.

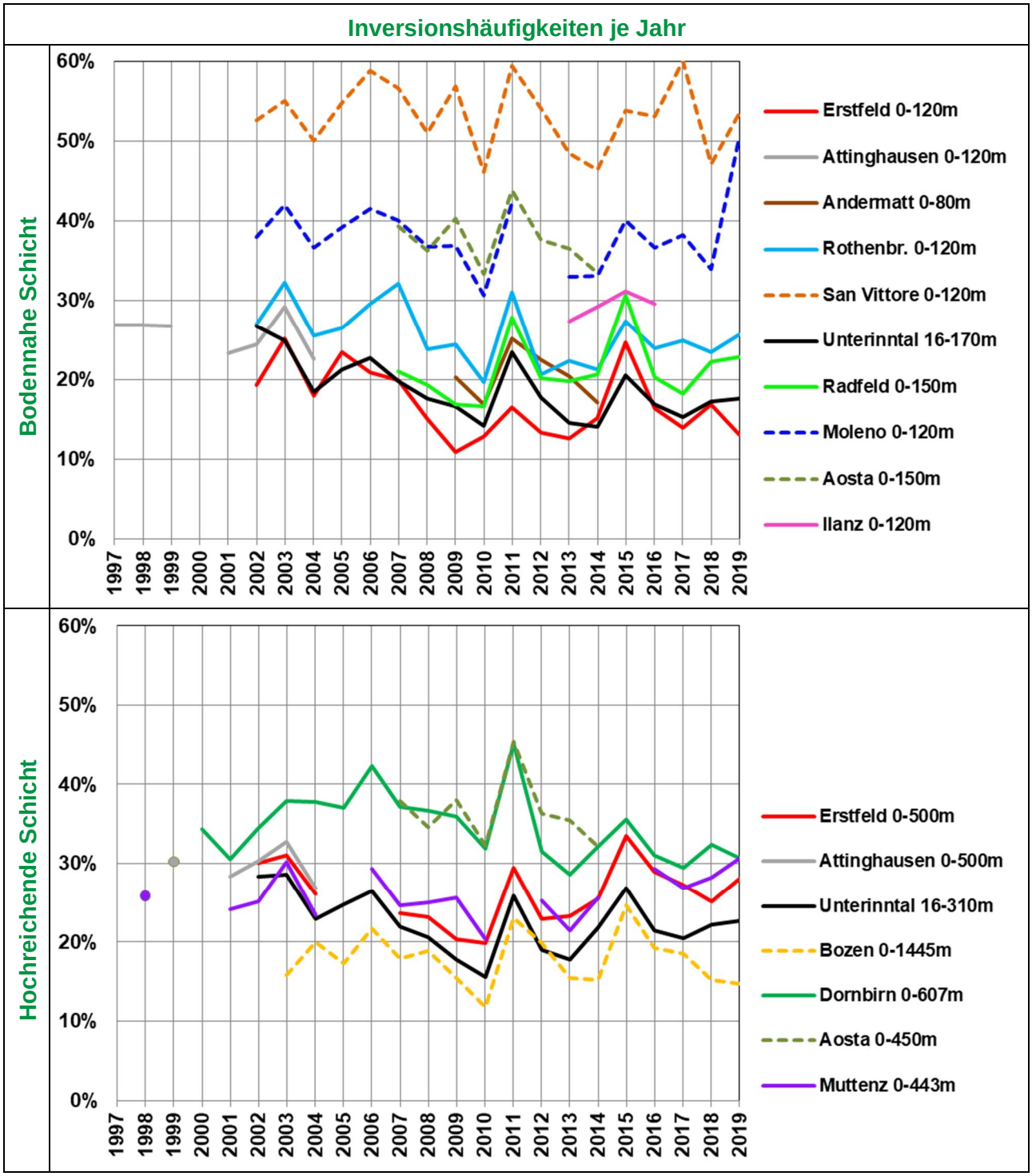
4.1. Zeitreihen der Inversionshäufigkeiten 1997 – 2019

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 ï Mai), Sommer (Juni ï August) und Herbst (September ï 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 2013/14 haben die Inversionshäufigkeiten in den bodennahen und hochreichenden Schichten generell abgenommen. Auf der Alpensüdseite fällt die markante Abnahme der Inversionshäufigkeit von 2011-2014 auf; dabei handelte es sich nicht um einen Trend, sondern um eine Abfolge von lufthygienisch immer günstigeren Grosswetterlagen im Herbst und Winter. In den Jahren 2011 und 2015 kam es zu Spitzen in den Inversionshäufigkeiten. In der Folge stabilisierten sie sich.

Der starke Anstieg der Inversionshäufigkeit bei Moleno von 2018 auf 2019 rührt vor allem vom Sommer her. Das episodenhafte Inversionsauftreten und dessen tageszeitliche Verteilung waren aber plausibel (keine Überwärmungen tagsüber; trotz des Anstiegs nicht mehr Inversionen als das benachbarte San Vittore), so dass hier nur diese Auffälligkeit festgestellt werden kann.



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), 1997-2019. Gestrichelte Verbindungen für Orte auf der Alpensüdseite.

Inversionshäufigkeiten nach Jahreszeiten: Die Entwicklung je Jahreszeit ist unterschiedlich. Grundsätzlich stellte sich auch in den Jahreszeiten eine Abnahme der Inversionshäufigkeit bis 2013/14 ein, danach eine Stabilisierung.

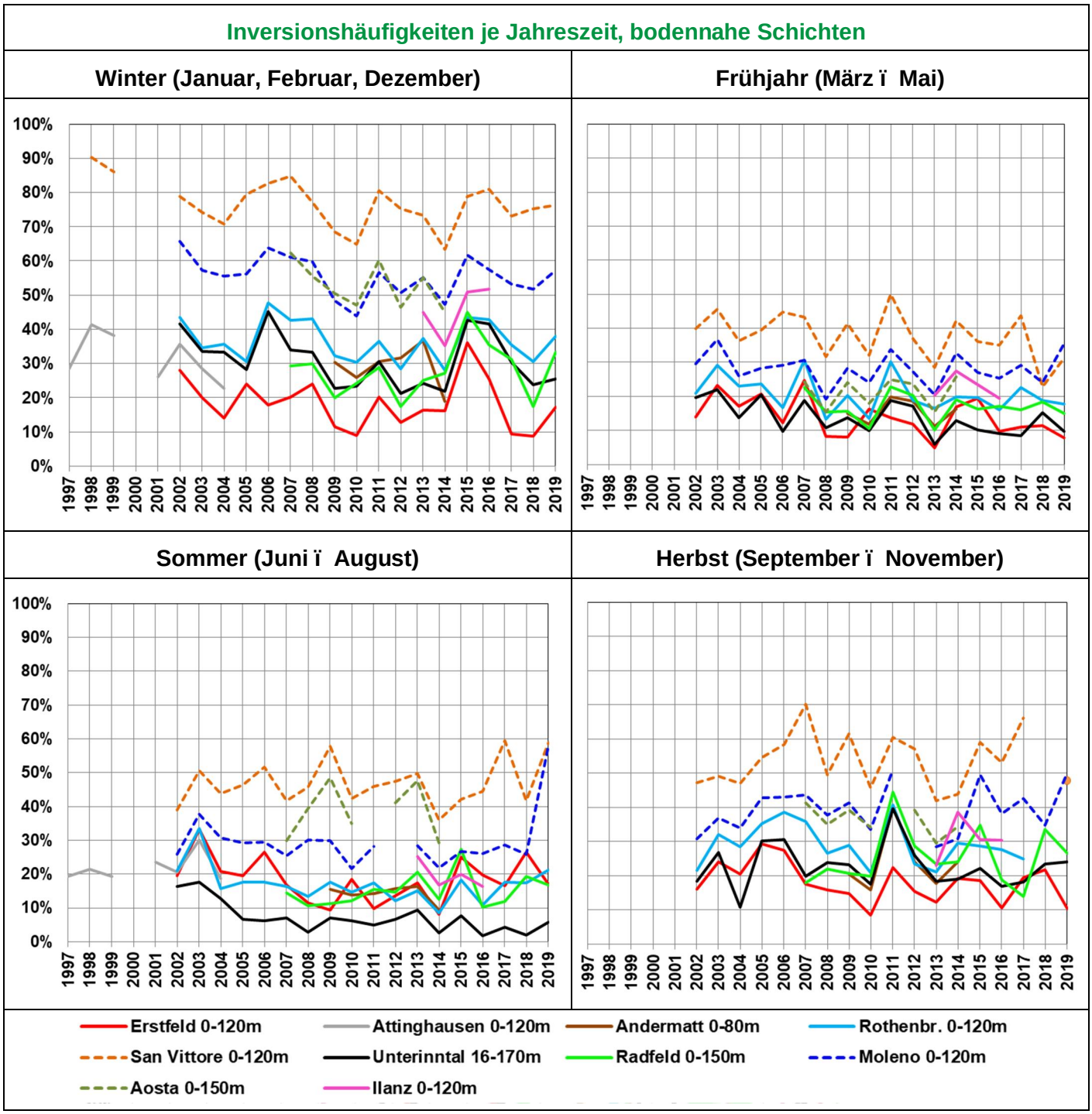


Abbildung 4.2: Inversionshäufigkeiten je Jahreszeit für verschiedene Orte im Alpenraum und Vorland für bodennahe Schichten, 1997-2019. Gestrichelte Linien: Orte auf der Alpensüdseite.

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

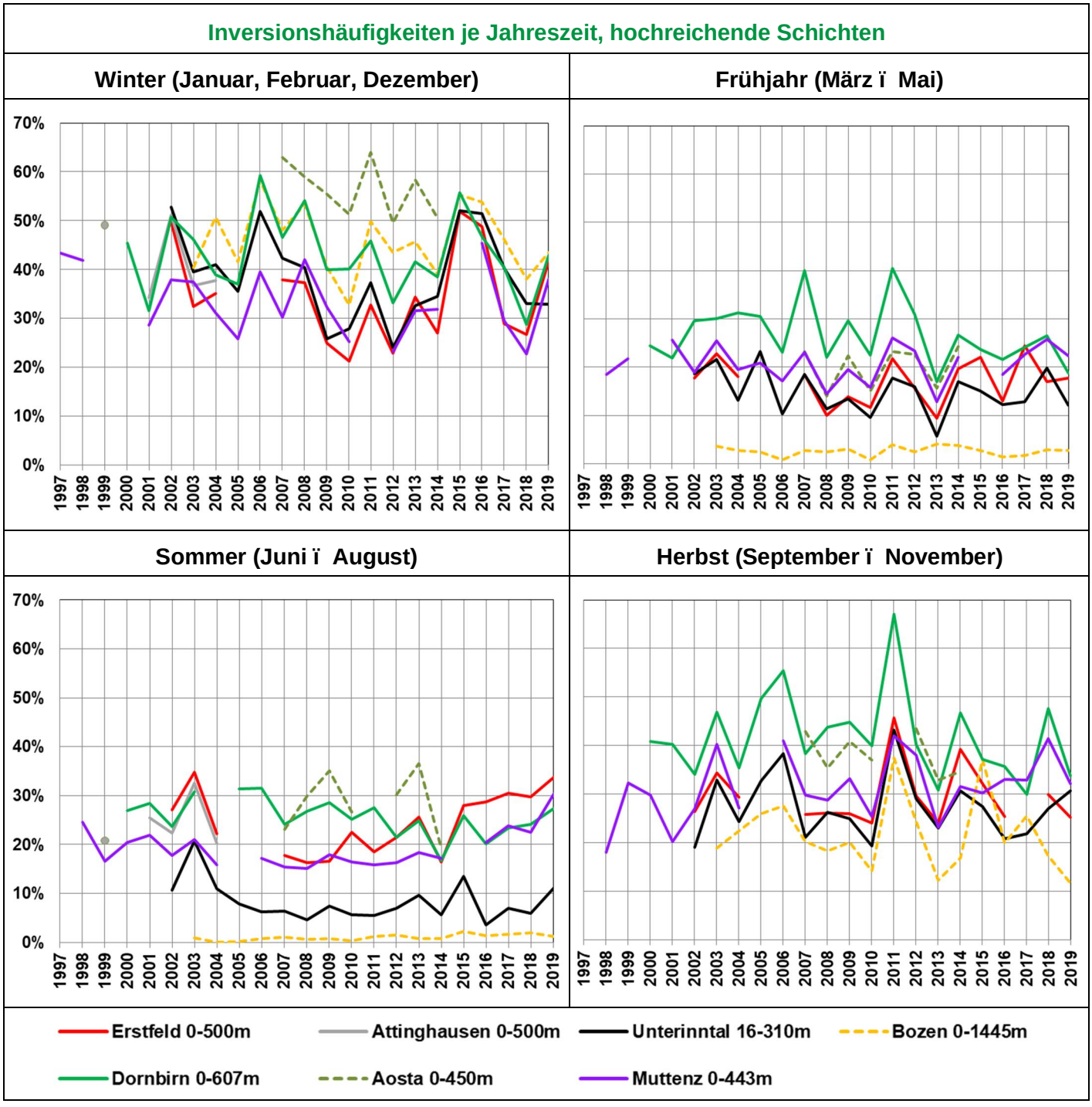


Abbildung 4.3: Inversionshäufigkeiten je Jahreszeit für verschiedene Orte im Alpenraum und Vorland für hochreichende Schichten, 1997-2019. Gestrichelte Linien: Orte auf der Alpensüdseite.

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 Abstrahlung 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 und Trockenheit 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 spätabends kann sie in Einzelfällen recht gross sein.

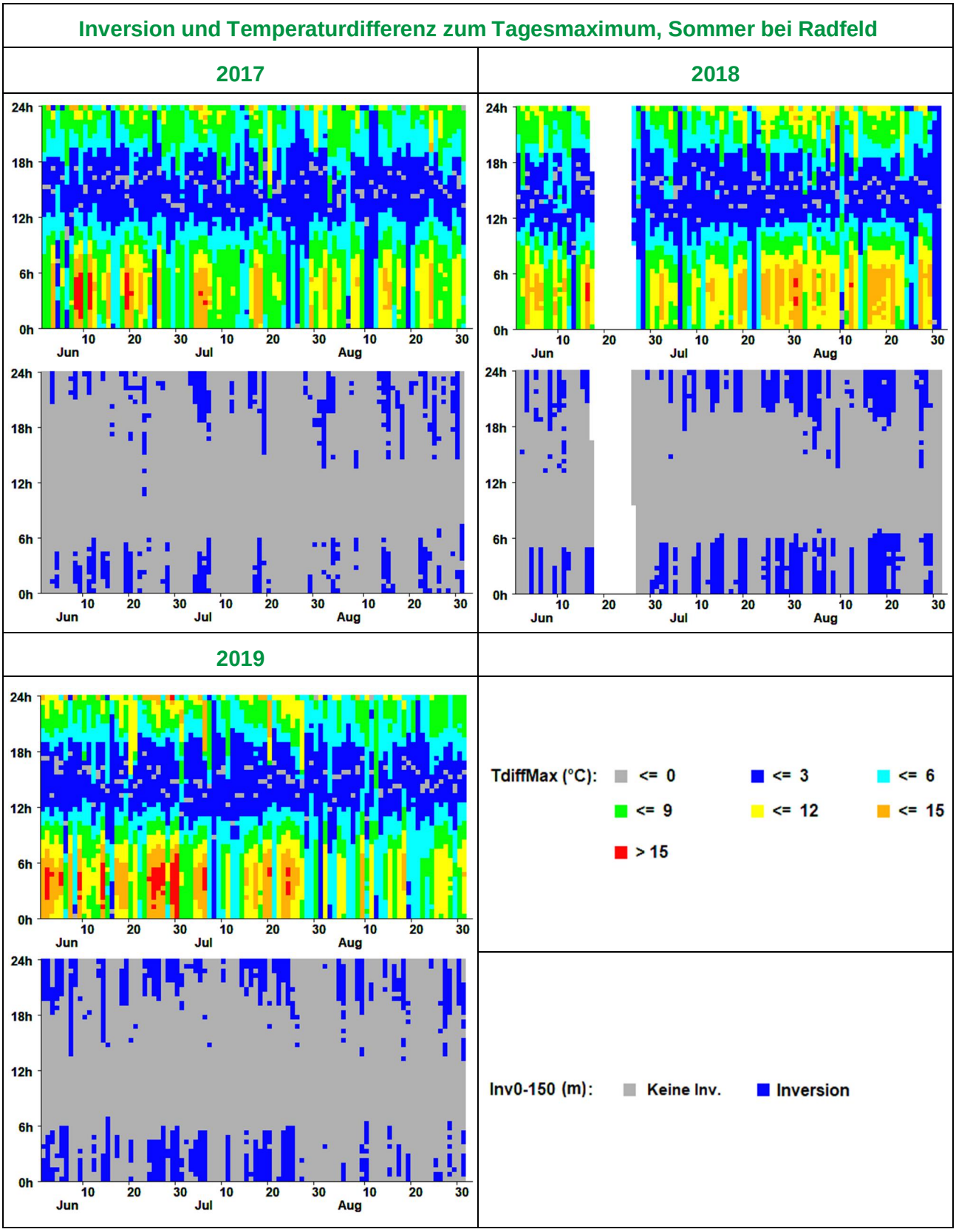


Abbildung 4.4: Inversionsauftreten und Temperaturverteilung am Talboden bei Radfeld, Sommer 2017-2019.

4.3. Diskussion der Zeitreihen

Die Jahre 2011 und 2015 zeigten hohe Inversionshäufigkeiten auf der Alpennord- und ï 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 "Harmonisation 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. Zusammenfassung der Inversionshäufigkeiten für die Alpennordseite

Für die Profile auf der Alpennordseite (ANS) bietet sich eine Zusammenfassung je Luftschicht an; für die Alpensüdseite liegen zurzeit zu wenige Daten für eine Zusammenfassung vor. Die für die Zusammenfassung ANS verwendeten Profile sind:

- Bodennahe Schicht: Erstfeld 0-120 m ü.Gr., Rothenbrunnen, Unterinntal 16-170 m ü.Gr.;
- Hochreichende Schicht: Erstfeld 0-500 m ü.Gr., Unterinntal 16-310 m ü.Gr., Dornbirn, Muttenz.

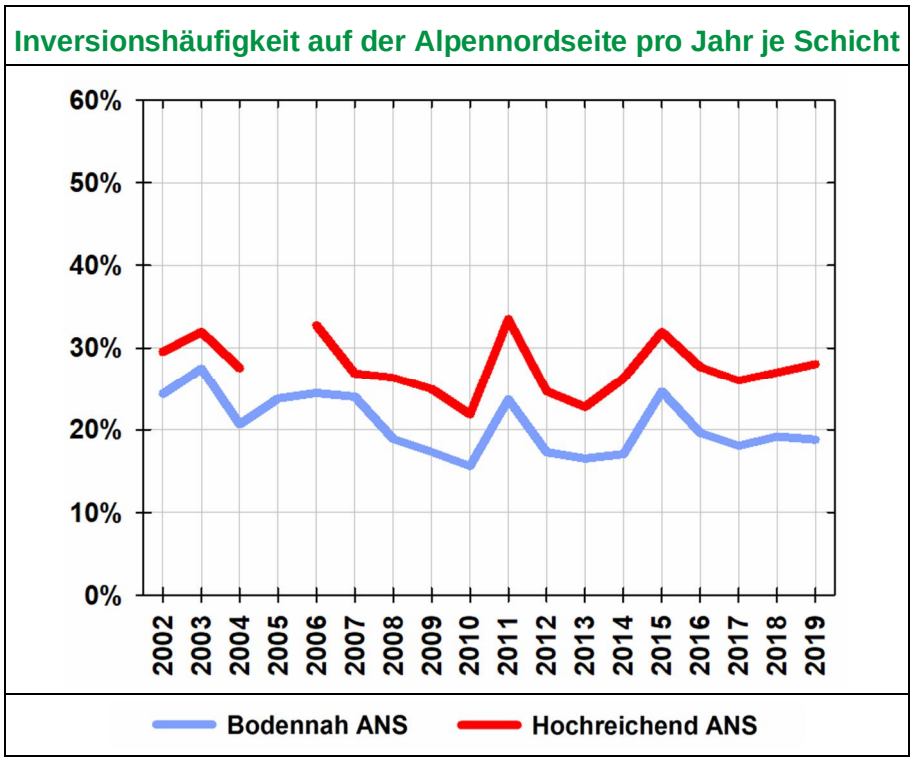


Abbildung 4.5: Mittlere Inversionshäufigkeiten auf der Alpennordseite (ANS) je Luftschicht und Jahr, 2002-2019.

Die relativen Verläufe der Inversionshäufigkeit auf der Alpennordseite weisen über die Jahre bzw. Jahreszeiten für die bodennahen und die hochreichenden Luftschichten Ähnlichkeiten auf. Die Jahreshäufigkeiten verlaufen weitgehend parallel. Die Inversionshäufigkeiten sind in den hochreichenden Schichten 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. Die Inversionshäufigkeiten haben sich nach dem Wieder-

anstieg 2015 stabilisiert, bodennah nahe den bisherigen Tiefstwerten (die Abnahme von 2002-2014 blieb im Wesentlichen erhalten). In der hochreichenden Schicht hingegen erfolgte die Stabilisierung auf einem Niveau nahe den früheren Werten; dadurch hat sich die Differenz in der Inversionshäufigkeit zwischen bodennaher und hochreichender Schicht vergrössert.

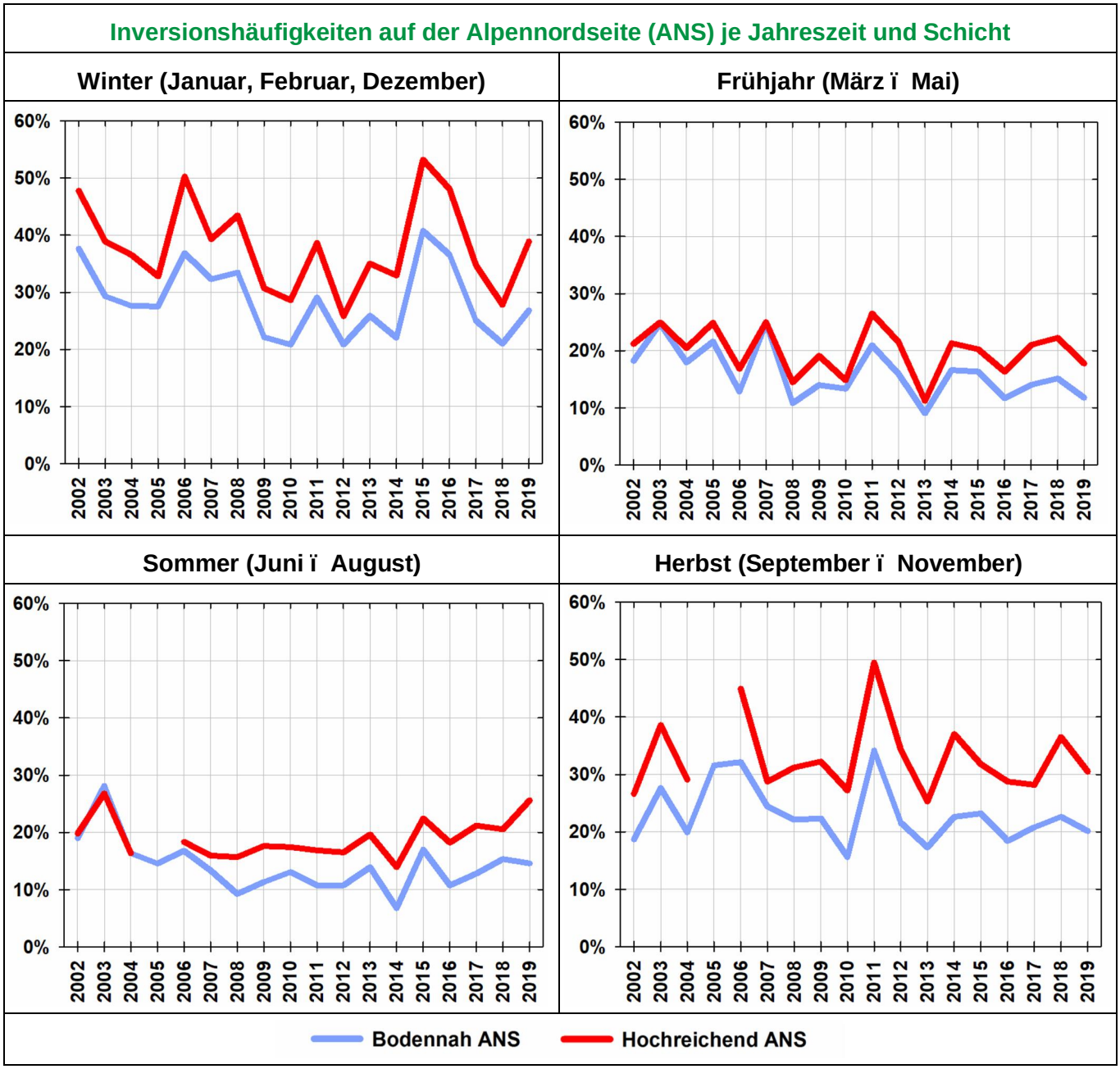


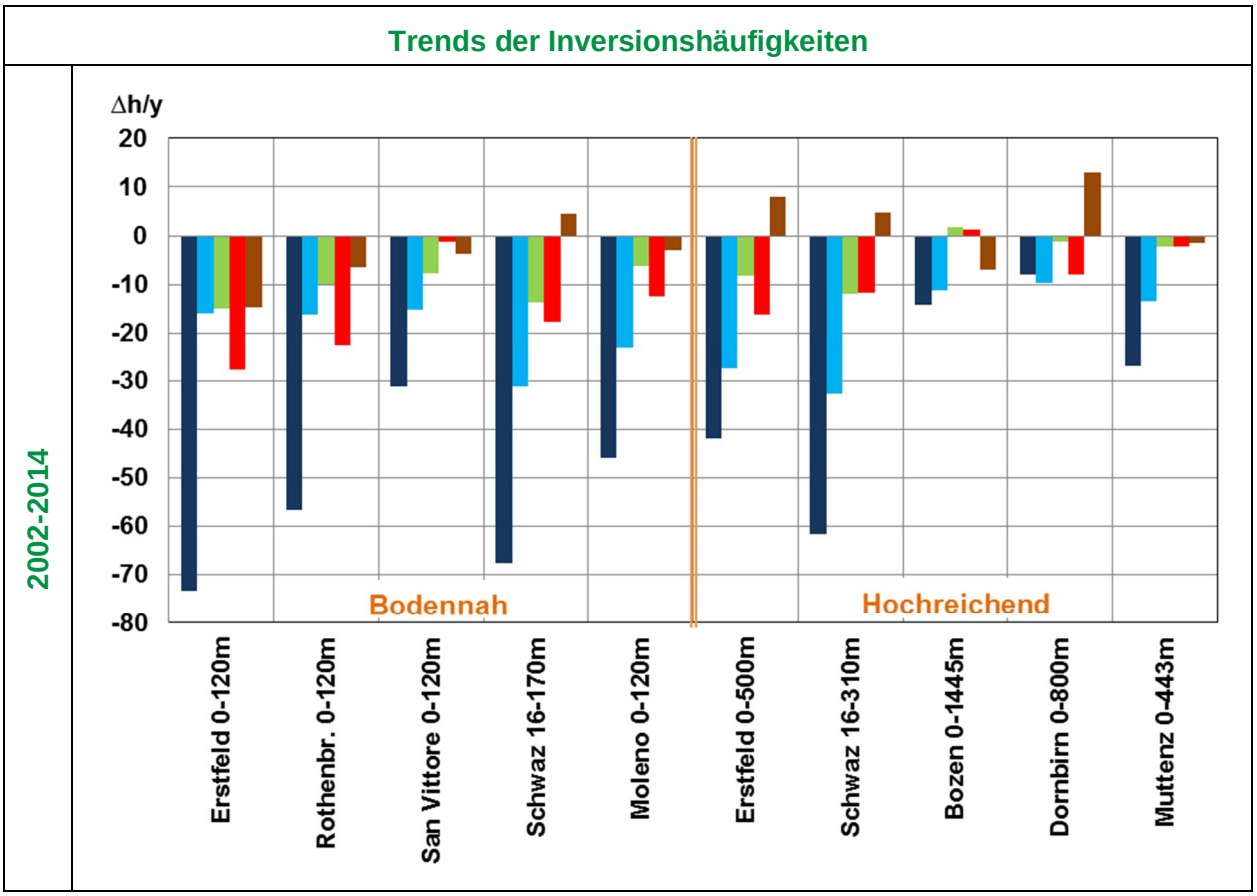
Abbildung 4.6: Mittlere Inversionshäufigkeiten auf der Alpennordseite (ANS) je Luftschicht und je Jahreszeit, 2002-2019.

Auch in dieser Darstellung zeigt sich die Spitze 2015 vor allem im Winter, diejenige im 2011 vor allem im Herbst.

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.

4.5. Trends in den Inversionshäufigkeiten

Der **Trend** in der Inversionshäufigkeit wird ausgedrückt als mittlere Änderung der jährlichen bzw. jahreszeitlichen Inversionsdauer pro Jahr. Die Abbildung 4.7 zeigt die Entwicklung der Trends der Inversionshäufigkeit von 2002-2014 (oben) bis aktuell von 2002-2019 (unten) für die Orte, für welche genügende Messdaten vorliegen.



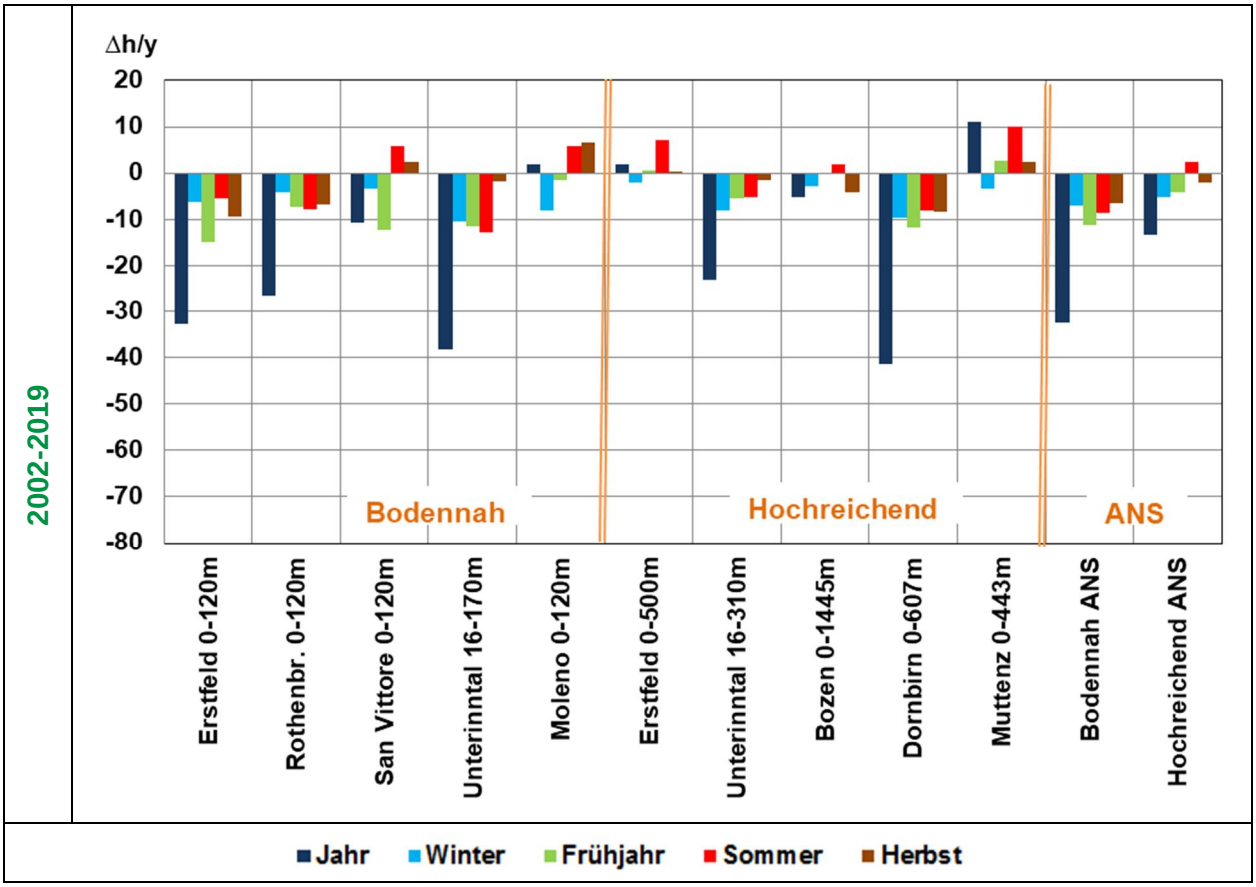


Abbildung 4.7: Trends der Inversionshäufigkeiten als mittlere Änderung der Inversionsdauer in Stunden pro Jahr bzw. pro Jahreszeit (h/y) über den Zeitraum 2002-2014 (oben) bzw. 2002-2019 (unten), für Gesamtjahr und die vier Jahreszeiten. TP Schwaz wurde 2016 zu TP Unterinntal (ab dann Verwendung des TP Innsbruck), beim TP Dornbirn ist in der Grafik bis 2019 die Bergstation Gäbris durch Sulzberg ab dem Jahr 2000 ersetzt worden. ANS: Alpennordseite (Zusammenfassung).

Bis ins Jahr 2014 zeigte sich ein deutlicher Trend zu abnehmenden Inversionshäufigkeiten in praktisch allen Profilen. Die nachfolgende Stabilisierung schwächte die abnehmenden Trends, welche von 2002-2019 nur noch auf der Alpennordseite ausgeprägt sind. In den hochreichenden Schichten weisen das Unterinntal und das Rheintal einen klar abnehmenden Trend auf.

Insgesamt macht es den Anschein, dass nach einer Phase abnehmender Inversionshäufigkeiten von etwa 12 Jahren nun eine Stabilisierungsphase folgt. In der Atmosphäre ergeben sich Schwankungen von vielen Jahren oder Jahrzehnten, die jeweils nicht kurzfristig als 'endgültig' betrachtet werden dürfen.

Alle bodennahen Schichten weisen über alle Jahreszeiten mit wenigen Ausnahmen (Moleno) immer noch einen abnehmenden Trend in der Inversionshäufigkeit auf.

Über alle Stationen betrachtet ist der Winter nicht mehr (wie noch 2014) die Jahreszeit mit dem grössten Rückgang der Inversionshäufigkeit, sondern Frühjahr und Sommer. Im Winter wirken sich die Inversionen allerdings am meisten auf die Luftschadstoff-Immissionen aus, weil sie dann tagsüber am häufigsten sind, wenn auch der Hauptteil der Emissionen anfällt.

Eine Verringerung der jährlichen Inversionsdauer von 2002 bis 2019 um z.B. -40 h/y (Unterinntal; Dornbirn) bedeutet eine Abnahme der Inversionsdauer um jährlich 680 Stunden von 2002 bis 2019, das sind 28 volle Tage, pro Jahr.

Statistische Signifikanz der Trends

Mit Hilfe des gängigen statistischen t-Tests wurde überprüft, inwieweit die gefundenen Trends signifikant oder eben ï aufgrund der relativ geringen Dauer ï doch eher zufällig schwankend sind. Die in Abbildung 4.7 gezeigten Trends werden im Folgenden nochmals tabellarisch aufgelistet, zusammen mit einer Angabe zur Signifikanz dieser Trends. Der Zusammenhang Zeit ï Inversionshäufigkeit wird durch das Wettergeschehen stark gestört, so dass es eine deutliche Abnahme der Inversionshäufigkeit braucht, damit sie signifikant wird. Für jeden Trend wurde die Irrtumswahrscheinlichkeit p bestimmt, mit welcher die 'Nullhypothese' (ermittelte Änderung der Inversionshäufigkeit mit der Zeit ist nur zufällig) verworfen wurde. Die Signifikanzniveaus für den Trend der Inversionshäufigkeit wurden dabei wie folgt definiert:

p < 1%: hoch signifikant (hs);
p: 1-5%: signifikant (s);
p: 5-10%: knapp signifikant (ks);
p > 10%: nicht signifikant (ns).

Tabelle 4.1: Trend der Inversionshäufigkeiten (Änderung in der Anzahl Stunden mit Inversion pro Jahr bzw. pro Jahreszeit [h/y]) sowie dessen Signifikanz über den Zeitraum 2002-2019. ANS: Alpennordseite (Zusammenfassung). *Ermittlung der statistischen Kennzahlen aus ANOVA-Tabellen.*

Profil	Zeitraum	Änderung Anzahl h mit Inversion / y	Signifikanz
Erstfeld	Jahr	-33	ks
0-120m	Winter	-6	ns
	Frühjahr	-12	s
	Sommer	-5	ns
	Herbst	-10	ks
Rothenbrunnen	Jahr	-27	ks
0-120m	Winter	-4	ns
	Frühjahr	-7	ns
	Sommer	-8	ns
	Herbst	-7	ns
San Vittore	Jahr	-11	ns
0-120m	Winter	-3	ns
	Frühjahr	-12	ks
	Sommer	6	ns
	Herbst	2	ns
Unterinntal	Jahr	-38	hs
16-170m	Winter	-10	ns
	Frühjahr	-12	s
	Sommer	-13	hs
	Herbst	-2	ns
Moleno	Jahr	2	ns
0-120m	Winter	-8	ns
	Frühjahr	-2	ns
	Sommer	6	ns
	Herbst	7	ns
Erstfeld	Jahr	2	ns
0-500m	Winter	-2	ns
	Frühjahr	0	ns
	Sommer	7	ns
	Herbst	0	ns
Unterinntal	Jahr	-23	ns
16-310m	Winter	-8	ns
	Frühjahr	-6	ns
	Sommer	-5	ns
	Herbst	-1	ns

Profil	Zeitraum	Änderung Anzahl h mit Inversion / y	Signifikanz
Bozen	Jahr	**-5**	**ns**
0-1445m	Winter	**-3**	**ns**
	Frühjahr	**0**	**ns**
	Sommer	**2**	**hs**
	Herbst	**-4**	**ns**
Dornbirn	Jahr	**-41**	**s**
0-607m	Winter	**-10**	**ns**
	Frühjahr	**-12**	**ks**
	Sommer	**-8**	**ks**
	Herbst	**-8**	**ns**
Muttenz	Jahr	**11**	**ns**
0-443m	Winter	**-4**	**ns**
	Frühjahr	**3**	**ns**
	Sommer	**10**	**s**
	Herbst	**2**	**ns**
Bodennah ANS	Jahr	**-33**	**s**
	Winter	**-7**	**ns**
	Frühjahr	**-10**	**s**
	Sommer	**-9**	**ks**
	Herbst	**-6**	**ns**
Hochreichend ANS	Jahr	**-13**	**ns**
	Winter	**-5**	**ns**
	Frühjahr	**-4**	**ns**
	Sommer	**2**	**ns**
	Herbst	**-2**	**ns**

Die Signifikanz der **Abnahme der Inversionshäufigkeiten** hat sich seit 2014 verringert. Doch **die bodennahen Profile der Alpennordseite weisen über das ganze Jahr immer noch eine *signifikante* Abnahme auf, dies auch im Frühjahr und (knapp) im Sommer.** Die Abnahme im Herbst und Winter ist nicht signifikant. Die hochreichenden Schichten weisen zwar auch Abnahmen auf (im Sommer eine kleine Zunahme), aber keine signifikanten Änderungen.

Bei den einzelnen Profilen gibt es nur vereinzelt signifikante Abnahmen der Inversionshäufigkeit. Bei Muttenz findet sich eine signifikante Zunahme im Sommer.

Die ermittelten Jahrestrends sind bisweilen nicht gleich der Summe der Trends der vier Jahreszeiten. Dies liegt daran, dass die Steigung der Regressionsgeraden (= der Trend) auch von den meteorologischen Bedingungen abhängt, so

dass der Jahrestrend zwar tendenziell, aber nicht genau der Summe aus den Jahreszeiten entspricht.

Aus der Tatsache, dass ein Trend nicht signifikant ist, darf keinesfalls geschlossen werden, dass er keinen Einfluss auf die Immissionssituation gehabt hätte. Auch zufällige Schwankungen der Inversionshäufigkeit beeinflussen die jeweiligen Immissionsänderungen.

4.6. Fazit

Von 2002 bis 2013/14 haben die Inversionshäufigkeiten in den bodennahen und hochreichenden Schichten generell abgenommen. In den Jahren 2011 und 2015 kam es zu Spitzen in den Inversionshäufigkeiten. In der Folge stabilisierten sie sich, bodennah nahe den bisherigen Tiefstwerten (die Abnahme von 2002-2014 blieb also im Wesentlichen erhalten). In der hochreichenden Schicht hingegen erfolgte die Stabilisierung auf einem Niveau nahe den früheren höheren Werten; dadurch hat sich die Differenz in der Inversionshäufigkeit zwischen bodennaher und hochreichender Schicht vergrössert.

Insgesamt macht es den Anschein, dass nach einer Phase abnehmender Inversionshäufigkeiten von etwa 12 Jahren nun eine Stabilisierungsphase folgt. Alle bodennahen Schichten weisen jedoch für den Zeitraum 2002-2019 über alle Jahreszeiten mit wenigen Ausnahmen immer noch einen abnehmenden Trend in der Inversionshäufigkeit auf.

Änderungen in der Inversionshäufigkeit können auch Effekte des Klimawandels sein. Die weitere Beobachtung des Inversionsauftretens wird aufschlussreich sein, zumal die Inversionen einen deutlichen Einfluss auf die resultierenden Immissionen an Luftschadstoffen haben.

5. Vorstellung von zwei weiteren Studien zum Inversionsauftreten im Alpenraum

Im Folgenden werden zwei weitere Studien zum Inversionsauftreten im Alpenraum kurz vorgestellt.

5.1. Thermische Inversionen in der Zentralschweiz 1981-2014

In einer Studie wurde das Inversionsauftreten in der Zentralschweiz über 34 Jahre, von 1981-2014, anhand der Stationen Altdorf (438 m ü.M.), Pilatus (2106 m ü.M.) und Gütsch (2283 m ü.M.) untersucht ("Thermische Inversionen in der Zentralschweiz 1981-2014", Thudium, J. und Chélala, C., Oekoscience, im Auftrag des Kantons Uri, Juni 2015). Für diese Stationen gibt es gesicherte Stundenwerte der Temperatur von MeteoSchweiz seit 1.1.1981. Wegen der grossen Höhendifferenz dieser Temperaturmessungen mussten spezielle Vergleichsverfahren über einige Jahre Parallelmessung mit den wesentlich tiefer liegenden Profilen Erstfeld (0-120 und 0-500 m ü.Gr.) entwickelt werden.

Im Temperaturprofil Erstfeld zeigt sich eine signifikante Abnahme der Inversionshäufigkeit seit 2002. Diesem Befund wurde das Inversionsauftreten in der Zentralschweiz in den letzten 34 Jahren gegenübergestellt. Danach haben sich die Inversionshäufigkeiten von 1981-2014 ausser im Winter wenig verändert, wenngleich sie von Jahr zu Jahr schwanken; **im Winter ist eine Häufigkeitsabnahme hingegen deutlich erkennbar.** Im 21. Jahrhundert fehlten bisher die langanhaltenden winterlichen Hochdrucklagen, welche zu Inversionen führen.

5.2. Räumliche Verteilung der Stickoxide und des Feinstaubes im Urner Reusstal während winterlichen Inversionslagen (1998)

Ein Beispiel einer solchen langanhaltenden winterlichen Hochdrucklage zeigt das Titelbild. Und als Beispiel werden Höhenprofile von Schadstoffkonzentrationen angefügt, welche im Dezember 1998 mit der Arnibergbahn im Urner Reusstal er-

hoben wurden ("Die räumliche Verteilung der Stickoxide und des Feinstaubes im Urner Reusstal während winterlichen Inversionslagen", Oekoscience, im Auftrag des Kantons Uri, Juni 1999). Die Bodenstation der Seilbahn lag 60 m von der Autobahn A2 entfernt.

Um **08:30** liegen zwei Inversionsschichten übereinander. Die untere Schicht vom Boden bis etwa 700 m ü.M. hat sich über Nacht über dem Talboden ausgebildet. Die darüber liegende Schicht (sprunghafter Temperaturanstieg bei 700 m ü.M.) hat ihr Temperaturmaximum zwischen 900 und 1150 m ü.M. Die Immissionen konzentrieren sich auf die untere Inversionsschicht.

Während des Tages dringt der mittelländische Kaltluftsee erneut ins Urner Reusstal ein. Um **15:30** ist die Luft bis gut 800 m ü.M. neutral geschichtet. Die Luftschadstoffe können sich deshalb innerhalb dieser Schicht recht gut verteilen; sie wurden teilweise vom Kaltluftsee mitgeführt, teilweise im Reusstal freigesetzt. Jedenfalls ist die Rückhaltewirkung der Inversion zwischen 800 und 1150 m ü.M. gross. Der obere Rand der 'Schadstoffschicht' ist aber nicht so eindeutig wie am Morgen wegen der Vertikalbewegungen in der Inversionsschicht.

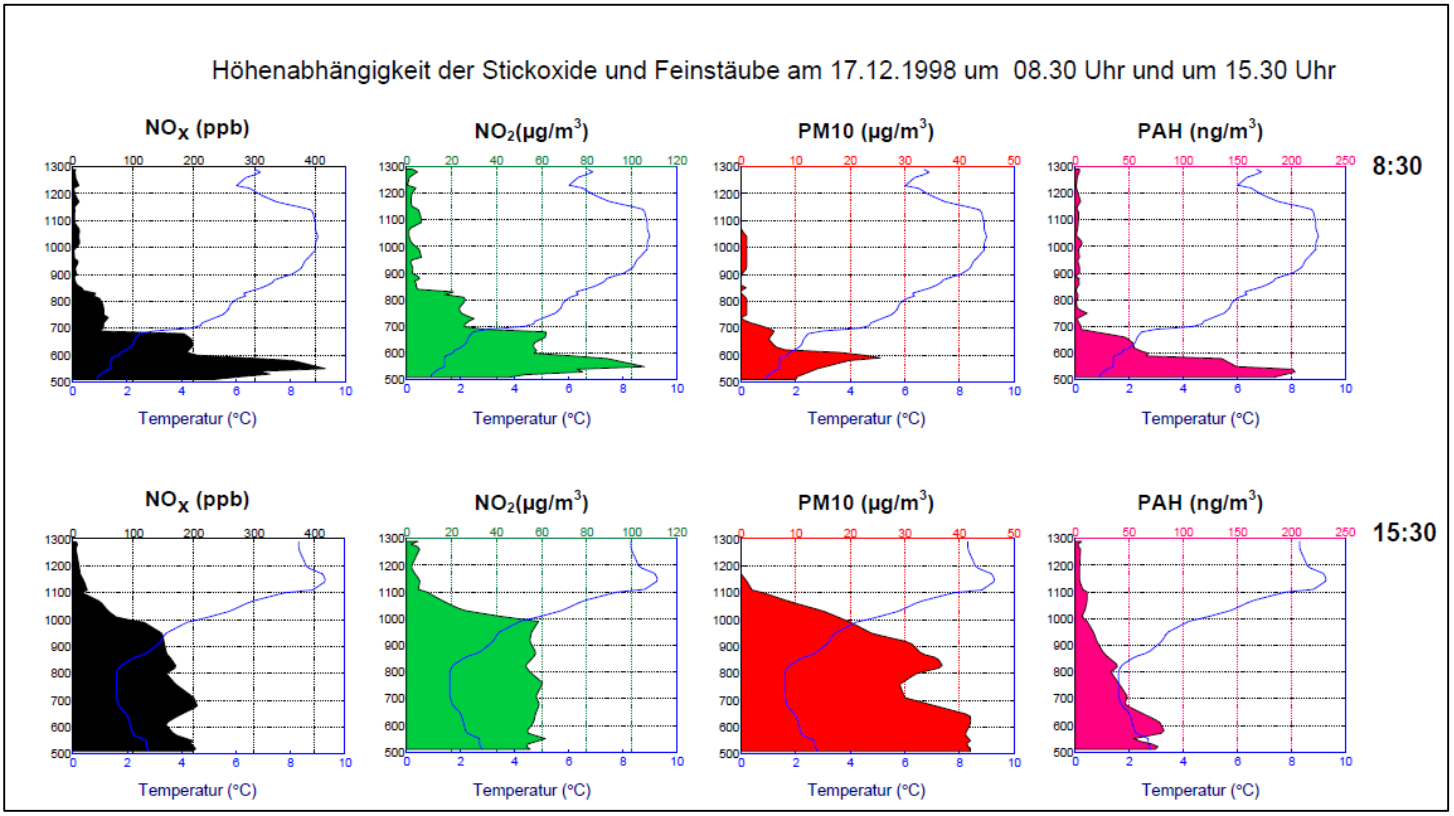


Abbildung 5.1: Höhenprofile von Temperatur (blau), NOx, NO_2, PM10 und PAH im Urner Reusstal (Arniberg nahe Erstfeld) am 17.12.1998, um 08:30 und um 15:30.

Solche winterlichen Inversionslagen sind in den letzten 40 Jahren im Nordalpenraum seltener geworden.

Die Trends in den Luftschadstoffimmissionen sind offensichtlich auch vom Trend meteorologischer Einflussgrössen ï hier des Inversionsgeschehens - abhängig. Die Nichtbeachtung dieser meteorologischen Einflussgrössen kann zu Fehlinterpretationen bei Immissionsuntersuchungen führen. Auch wird das Verhältnis zwischen Immissionen und zugehörigen Emissionen durch meteorologische Einflussgrössen beeinflusst.