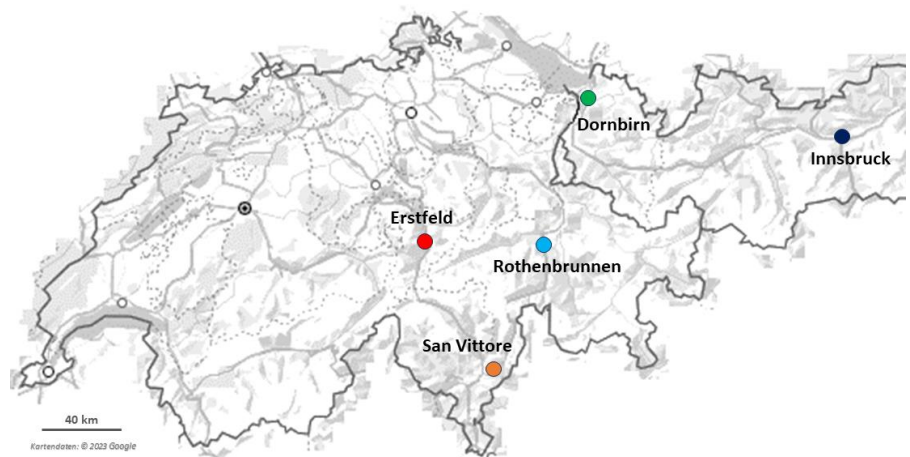


Einfluss der Wetterlagen auf Inversionen und Immissionen

Untersuchung in den Kantonen Uri und Graubünden sowie in den Bundesländern Vorarlberg und Tirol, 2002-2021



Dr. Jürg Thudium
Dr. Carine Chélala

05.12.2023 / 5202.30 V2

Oekoscience AG

Postfach 452
CH - 7001 Chur

Telefon: +4181 250 3310
Thudium@oekoscience.ch

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
2. Inversionen und Immissionen	2
2.1. Verwendete Daten	2
2.2. Jahres- und Jahreszeitenmittelwerte der Inversionshäufigkeit	3
2.3. Einige Jahreszeitenmittelwerte der Immissionen	6
3. Die Wetterlagenklassifikation CAP	8
3.1. Erklärung zur Darstellung von Auswertungen nach CAP9-Klassen	8
3.2. Jahresmittelwerte der CAP9-Klassenhäufigkeiten	9
3.3. Jahreszeitenmittelwerte der CAP9-Klassenhäufigkeiten	10
4. Inversionshäufigkeit, Immissionen und meteorologische Größen je CAP9-Klasse	13
4.1. Inversionshäufigkeit	13
4.2. Berechnung Inversionshäufigkeit mit CAP9-Klassen	18
4.3. NO _x -Immissionen	19
4.4. PM ₁₀ -Immissionen	24
4.5. Mittleres tägliches Ozonmaximum - O ₃ max	29
4.6. Faktor Tau (NO _x -Verhältnis Immission/Emission A2)	34
4.7. Temperatur und Niederschlag	36
5. Vergleich des täglichen Ozonmaximums O₃max bei Nordkette und Angerberg	40
6. Anstieg der Inversionshäufigkeit 2014-2021 im Sommer	42
6.1. Bewölkung bei Zürich-Fluntern und Wetterlagen	42
6.2. Inversionshäufigkeit 2014-2021 im Sommer am Beispiel Erstfeld	44
7. Vergleich zwischen CAP18- und CAP9-Wetterlagenklassifikation	46
8. Zusammenfassung	48

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1: Lage der untersuchten Gebiete (Temperaturprofile und Immissionen). Die Ozonstationen für Dornbirn, Innsbruck bzw. Erstfeld liegen ein Stück nordöstlich bzw. nördlich der übrigen Messstationen.	3
Abbildung 2.2: Inversionshäufigkeiten je Jahr für verschiedene Orte im Alpenraum und Vorland für bodennahe (ausgezogene Linien) bzw. hochreichende Schichten (gestrichelte Linien), 2002-2021.	4
Abbildung 2.3: Inversionshäufigkeiten je Jahreszeit für verschiedene Orte im Alpenraum und Vorland für bodennahe (ausgezogene Linien) bzw. hochreichende Schichten (gestrichelte Linien), 2002-2021.	5
Abbildung 2.4: Immissionen von NO _x und PM ₁₀ im Winter sowie mittleres tägliches Ozonmaximum (O ₃ max) im Sommer, 2002-2022. NO _x : absolute Werte (links) und relative Werte mit 100% = Mittel von 2002-2003.	6
Abbildung 3.1: Jährliche Häufigkeitsverteilung der CAP9-Klassen, 2001-2022.	9
Abbildung 3.2: Mittlere Häufigkeiten der CAP9-Klassen von 2002-2021 (rote Balken mit Beschriftung) samt den 90%- und 10%-Quantilen (schwarze Fehlerbalken) und (in diesem Fall) knapp signifikanten Änderungen (gelb schraffierte Säulen; p= ca. 0.06).	10
Abbildung 3.3: Häufigkeitsverteilung der CAP9-Klassen je Jahreszeit, 2001-2022.	11
Abbildung 3.4: Häufigkeiten der CAP9-Klassen je Jahreszeit von 2002-2021, Erklärung zur Darstellung s. Kap. 3.1.	12
Abbildung 4.1: Inversionshäufigkeit: Änderung, Mittelwerte und Streubereich je CAP9-Klasse, Winter 2002-2021. Erklärung zur Darstellung s. Kap. 3.1.	14
Abbildung 4.2: Inversionshäufigkeit: Änderung, Mittelwerte und Streubereich je CAP9-Klasse, Frühjahr 2002-2021. Erklärung zur Darstellung s. Kap. 3.1.	15
Abbildung 4.3: Inversionshäufigkeit: Änderung, Mittelwerte und Streubereich je CAP9-Klasse, Sommer 2002-2021. Erklärung zur Darstellung s. Kap. 3.1.	16
Abbildung 4.4: Inversionshäufigkeit: Änderung, Mittelwerte und Streubereich je CAP9-Klasse, Herbst 2002-2021. Erklärung zur Darstellung s. Kap. 3.1.	17
Abbildung 4.5: Inversionshäufigkeit bei Dornbirn im Winter 2002-2021. Msg: Ermittelt aus Messungen im Temperaturprofil je Winter. Ber: Ermittelt aus mittlerer Inversionshäufigkeit	

über alle Winter je CAP9-Klasse, mit der Häufigkeit der CAP-Klassen im konkreten Winter gewichtete Summe.	18
Abbildung 4.6: NO _x : Änderung, Mittelwerte und Streubereich je CAP9-Klasse, Winter 2002-2021. Erklärung zur Darstellung s. Kap. 3.1.	20
Abbildung 4.7: NO _x : Änderung, Mittelwerte und Streubereich je CAP9-Klasse, Frühjahr 2002-2021. Erklärung zur Darstellung s. Kap. 3.1.	21
Abbildung 4.8: NO _x : Änderung, Mittelwerte und Streubereich je CAP9-Klasse, Sommer 2002-2021. Erklärung zur Darstellung s. Kap. 3.1.	22
Abbildung 4.9: NO _x : Änderung, Mittelwerte und Streubereich je CAP9-Klasse, Herbst 2002-2021. Erklärung zur Darstellung s. Kap. 3.1.	23
Abbildung 4.10: PM ₁₀ : Änderung, Mittelwerte und Streubereich je CAP9-Klasse, Winter 2002-2021. Erklärung zur Darstellung s. Kap. 3.1.	25
Abbildung 4.11: PM ₁₀ : Änderung, Mittelwerte und Streubereich je CAP9-Klasse, Frühjahr 2002-2021. Erklärung zur Darstellung s. Kap. 3.1.	26
Abbildung 4.12: PM ₁₀ : Änderung, Mittelwerte und Streubereich je CAP9-Klasse, Sommer 2002-2021. Erklärung zur Darstellung s. Kap. 3.1.	27
Abbildung 4.13: PM ₁₀ : Änderung, Mittelwerte und Streubereich je CAP9-Klasse, Herbst 2002-2021. Erklärung zur Darstellung s. Kap. 3.1.	28
Abbildung 4.14: O ₃ max: Änderung, Mittelwerte und Streubereich je CAP9-Klasse, Winter 2002-2021. Erklärung zur Darstellung s. Kap. 3.1.	30
Abbildung 4.15: O ₃ max: Änderung, Mittelwerte und Streubereich je CAP9-Klasse, Frühjahr 2002-2021. Erklärung zur Darstellung s. Kap. 3.1.	31
Abbildung 4.16: O ₃ max: Änderung, Mittelwerte und Streubereich je CAP9-Klasse, Sommer 2002-2021. Erklärung zur Darstellung s. Kap. 3.1.	32
Abbildung 4.17: O ₃ max: Änderung, Mittelwerte und Streubereich je CAP9-Klasse, Herbst 2002-2021. Erklärung zur Darstellung s. Kap. 3.1.	33
Abbildung 4.18: Verlauf der Immissionen (I_NO _x) und der Emissionen (E_NO _x ; gemäss HBEFA4.2) bei Erstfeld A2, 2004-2021, gleitende Monatsmittel.	34
Abbildung 4.19: Tau-Faktor (I_NO _x /E_NO _x) bei Erstfeld A2 auf Basis Tagesmittel, Mittelwerte nach CAP9-Klasse, Jahreszeiten 2004-2021.	35

Abbildung 4.20: Oben: Jahresmittelverlauf der Temperatur je CAP-Klasse und insgesamt für Dornbirn (links) und Innsbruck (rechts), 2002-2021. Unten: Temperatur: Änderung, Mittelwerte und Streubereich je CAP9-Klasse, 2002-2021. Erklärung zur Darstellung s. Kap. 3.1.	36
Abbildung 4.21: Temperatur: Änderung, Mittelwerte und Streubereich je CAP9-Klasse, Frühjahr und Sommer 2002-2021. Erklärung zur Darstellung s. Kap. 3.1.	37
Abbildung 4.22: Temperatur: Änderung, Mittelwerte und Streubereich je CAP9-Klasse, Herbst und Winter 2002-2021. Erklärung zur Darstellung s. Kap. 3.1.	38
Abbildung 4.23: Mittlerer täglicher Niederschlag pro Jahr: Jahresverlauf für ganzes Jahr und Vegetationsperiode (März-August) 2001-2021 (oben); Änderung, Mittelwerte und Streubereich je CAP9-Klasse, 2002-2021 (unten). Erklärung zur Darstellung unten s. Kap. 3.1.	39
Abbildung 5.1: Mittleres tägliches Ozonmaximum (O_3 max) je CAP9-Klasse bei Nordkette und Angerberg, 2002-2021.	40
Abbildung 6.1: Bewölkung [%] in Zürich nach CAP9-Klasse, Gesamtjahr 2002-2021.	42
Abbildung 6.2: Bewölkung [%] in Zürich nach CAP9-Klasse, Jahreszeiten 2002-2021.	43
Abbildung 6.3: Inversionshäufigkeit im Sommer bei Erstfeld und Bewölkung in Zürich, 2014-2021. Links: Zeitreihe der Sommermittelwerte. Rechts: Plot der beiden Variablen gegeneinander.	44
Abbildung 6.4: Tagesmittelwerte im Sommer 2014 und 2020: Inversionshäufigkeit bei Erstfeld gegen Bewölkung in Zürich.	45
Abbildung 6.5: Inversionshäufigkeit im Tagesgang, Sommer 2014 und 2020, Erstfeld 0-500m.	45
Abbildung 7.1: Prozentuale Zusammensetzung der einzelnen CAP9-Klassen aus Klassen von CAP18.	47

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1: Liste der verwendeten Profil-Stationen mit zugeordneten Immissionsmessungen:	2
Tabelle 3.1: Beschreibung der 9 'CAP9'-Klassen. Quelle: " Description of (new) Weather Types used at MeteoSwiss", MeteoSchweiz, 2011.	8
Tabelle 7.1: Beschreibung der CAP18-Klassen. Quelle: " Description of (new) Weather Types used at MeteoSwiss", MeteoSchweiz, 2011.	46

1. Einleitung

Die vorliegende Studie befasst sich mit dem Zusammenhang zwischen Wetterlage und Inversionsauftreten sowie den daraus abzuleitenden Folgen für die Immissionen. Bei einer Inversion liegt wärmere Luft über kälterer, was grosse Auswirkungen auf die Ausbreitung von Luftschadstoffen hat.

Ausgangspunkt dieses Projektes war der Bericht "Zur Entwicklung der Häufigkeit atmosphärischer Inversionen im Alpenraum 1997 – 2021", Oekoscience, Januar 2023, s. Kapitel 2.

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 Klassifikationssoftware "cost733class" bestimmt, die im Rahmen der Cost Aktion 733 "Harmonization and Application of Weather Type Classifications for European Regions" entwickelt wurde. (https://opus.bibliothek.uni-augsburg.de/opus4/frontdoor/deliver/index/docId/3768/file/COST733_final_scientific_report_2016.pdf).

Jeder Tag wird einer CAP-Klasse zugeordnet. Somit können Häufigkeitsverteilungen der Wetterlagen erstellt werden. In diesem Projekt wurden die CAP9- bzw. CAP18-Klassen untersucht. Die Häufigkeiten von Wetterlagen könnten sich im Zuge des Klimawandels ändern, wobei nur signifikante Trends überhaupt mit 'Klima' in Verbindung gebracht werden dürfen; übrige Änderungen stellen eine Abfolge von 'Wetter' dar.

Der Untersuchungszeitraum beläuft sich auf 2002-2021.

2. Inversionen und Immissionen

2.1. Verwendete Daten

Es wurden Inversionen an fünf verschiedenen Orten anhand dort installierter Temperaturprofile untersucht, im Fall von Erstfeld und Innsbruck für zwei verschiedene Luftschichten. Diesen Profilen wurden Immissionsmessstationen in der Region zugeordnet für die nachfolgenden Untersuchungen. Die untersuchten Immissionen waren NO_x, PM₁₀ und tägliches Ozonmaximum. Für Dornbirn und Innsbruck wurde auch die Tagesmitteltemperatur untersucht, für Dornbirn auch der Niederschlag (RR).

Tabelle 2.1: Liste der verwendeten Profil-Stationen mit zugeordneten Immissionsmessungen:

Standort	Inversionen	Imm. NO _x	Imm. PM ₁₀	Imm. Ozon	Temperatur
Erstfeld	0-120 m ü.Gr.	Erstfeld A2	Gartenmatt	Rigi- Seebodenalp	
	0-500 m ü.Gr.				
Dornbirn	0-607 m ü.Gr.	Lustenau Zollamt	Lustenau Zollamt	Sulzberg	Dornbirn (auch RR)
Rothenbrunnen	0-120 m ü.Gr.	Rothenbrunnen	Rothenbrunnen	Rothenbrunnen	
San Vittore	0-120 m ü.Gr.	San Vittore	San Vittore	Roveredo	
Innsbruck	16-217 m ü. Gr.	Vomp A12	Innsbruck- Fallmerayer- straße	Angerberg & Nordkette	Innsbruck- Flughafen
	16-338 m ü. Gr.				

Das Profil Innsbruck wurde bis 2015 im Nordwesthang bei Schwaz gemessen; von 2014-2015 gab es umfangreiche Quervergleiche mit dem Profil Innsbruck, auf Grund deren die Inversionsauswertung für das Profil Innsbruck angepasst wurde.

Die folgende Karte zeigt die Lage der Temperaturprofile. Bei Dornbirn handelt es sich um zwei Temperaturmessstationen (Dornbirn ARA und Sulzberg), bei Innsbruck um ein Profil belüfteter Temperaturmessungen im Südhang, bei den übrigen Orten um Profilmessungen in schattseitigen Steilhängen.

Die NO_x-Stationen liegen alle an stark befahrenen Strassen ausser San Vittore (Dorfzentrum). Zwei PM₁₀-Stationen sind nicht identisch mit der NO_x-Station: Gartenmatt (im freien Feld ca. 100 m von der A2 entfernt) und Innsbruck-Fallmerayerstrasse (Stadtzentrum). Bei den Ozonstationen liegt Rothenbrunnen an der A13, Roveredo etwa 30 m und Angerberg etwa 90 m über dem Talboden (mit Autobahn), Rigi-Seebodenalp und Sulzberg liegen relativ frei anströmbar auf etwa 1000 m ü.M. Nordkette liegt etwa 1900 m ü.M. oberhalb Innsbrucks.



Abbildung 2.1: Lage der untersuchten Gebiete (Temperaturprofile und Immissionen). Die Ozonstationen für Dornbirn, Innsbruck bzw. Erstfeld liegen ein Stück nordöstlich bzw. nördlich der übrigen Messstationen.

2.2. Jahres- und Jahreszeitenmittelwerte der Inversionshäufigkeit

Zitat aus: "Zur Entwicklung der Häufigkeit atmosphärischer Inversionen im Alpenraum 1997 – 2021", Oekoscience, Januar 2023:

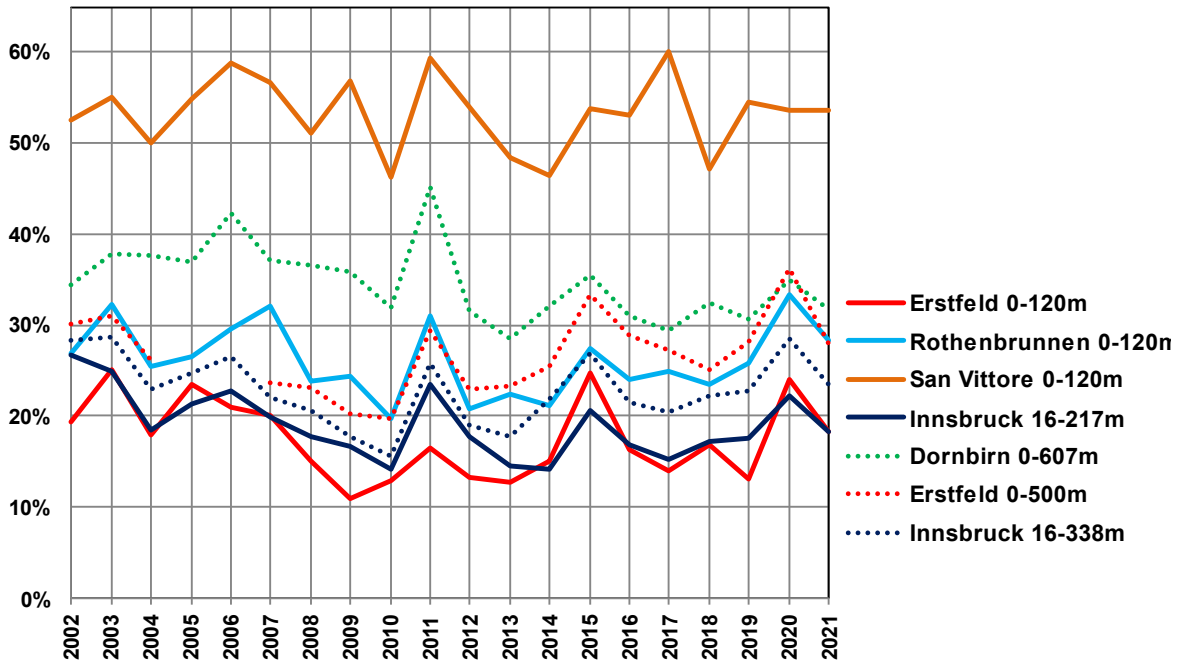
Bis ins Jahr 2014 zeigte sich ein deutlicher Trend zu abnehmenden Inversionshäufigkeiten in praktisch allen Profilen (bodennah und hochreichend). Nachfolgend ergab sich eine Stabilisierung und ein leichter Wiederanstieg, der bislang im 2020 kumulierte.

Währenddem die negativen Trends für 2002-2014 im Gesamtjahr, im Winter und im Sommer überwiegend signifikant waren, waren die leicht positiven Trends für den Zeitraum 2014-2021 mit einer knappen Ausnahme nicht signifikant.

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 2014-2021 vor allem Sommer und Herbst, die vom leichten Anstieg der Inversionshäufigkeit betroffen sind.

Zitat Ende.

Inversionshäufigkeiten je Jahr



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 2.2: Inversionshäufigkeiten je Jahr für verschiedene Orte im Alpenraum und Vorland für bodennahe (ausgezogene Linien) bzw. hochreichende Schichten (gestrichelte Linien), 2002-2021.

Am meisten Inversionen kommen im Winter vor, am wenigsten im Sommer, allenfalls (Alpensüdseite) im Frühjahr. Die Beckenlagen auf der Alpensüdseite weisen generell eine höhere Inversionshäufigkeit auf als die Alpennordseite.

Inversionshäufigkeiten je Jahreszeit

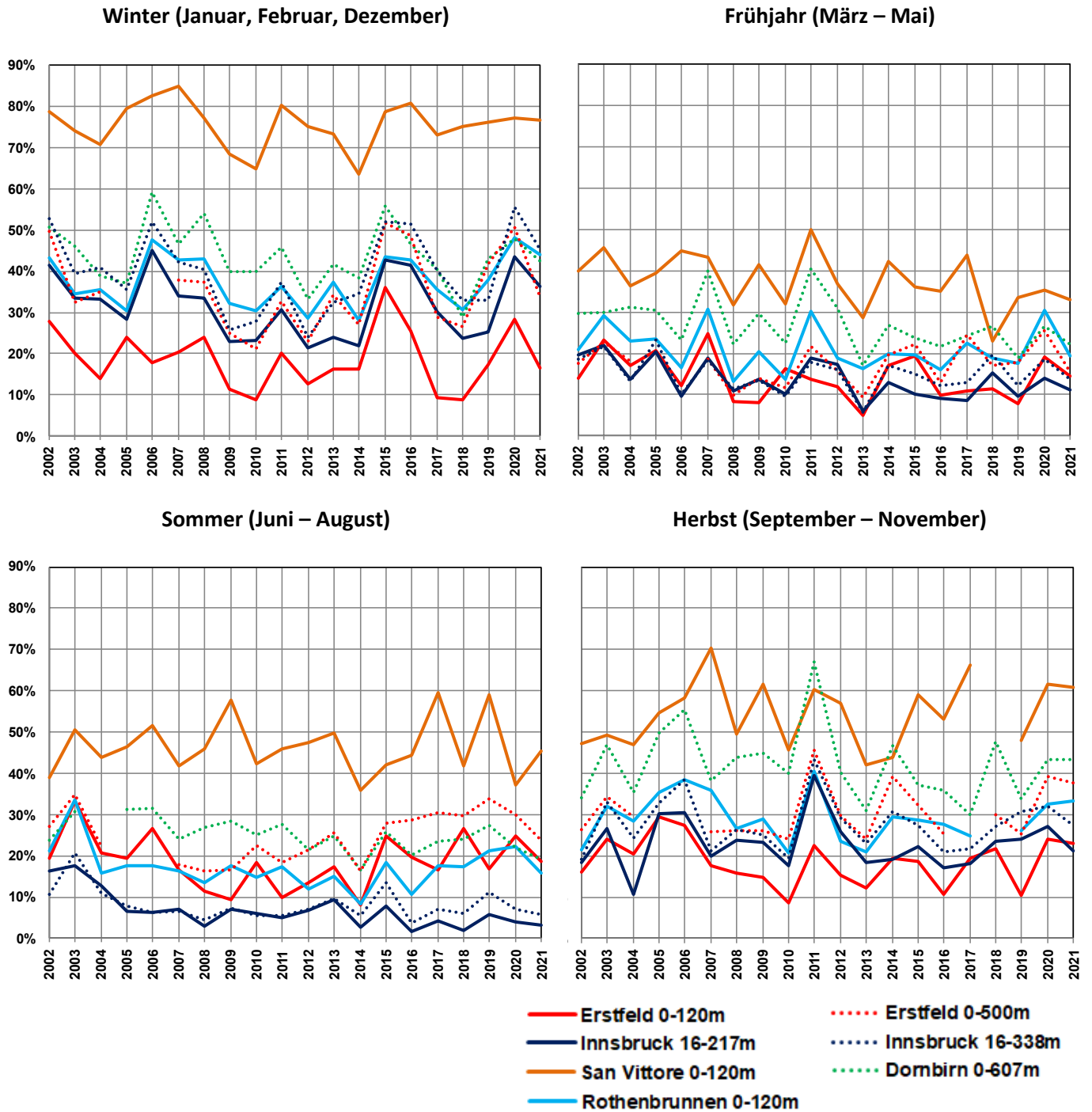


Abbildung 2.3: Inversionshäufigkeiten je Jahreszeit für verschiedene Orte im Alpenraum und Vorland für bodennahe (ausgezogene Linien) bzw. hochreichende Schichten (gestrichelte Linien), 2002-2021.

2.3. Einige Jahreszeitenmittelwerte der Immissionen

Die NO_x- und PM₁₀-Immissionen zeigen in allen untersuchten Regionen eine starke Abnahme von 2002-2021, NO_x vor allem ab 2015, PM₁₀ über die ganze Zeit.

Immissionen je Jahreszeit

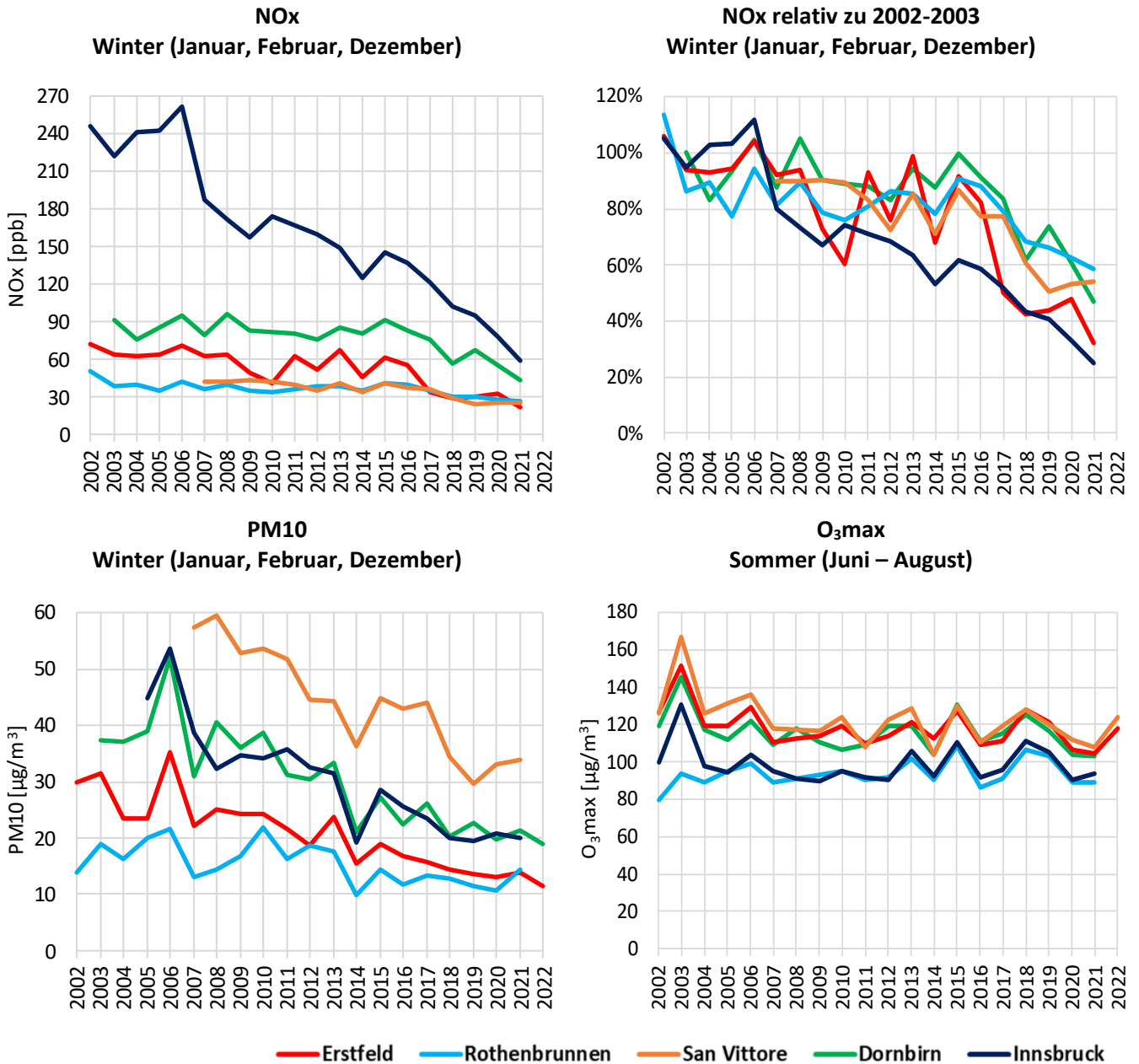


Abbildung 2.4: Immissionen von NO_x und PM₁₀ im Winter sowie mittleres tägliches Ozonmaximum (O₃max) im Sommer, 2002-2022. NO_x: absolute Werte (links) und relative Werte mit 100% = Mittel von 2002-2003.

Beim NO_x zeigt Innsbruck (Messstelle Vomp A12) dank spezifischer Maßnahmen schon 2006-2009 eine deutliche Abnahme und bis 2021 die tiefsten Werte bezogen auf 2002-2003, obwohl die Brennerautobahn ein starkes Verkehrswachstum aufweist.

Das mittlere tägliche Ozonmaximum im Sommer ist an allen Standorten etwa stabil, mit Ausnahme der Spitze im 2003; in Rothenbrunnen allerdings ist O₃max etwas angestiegen über die 20 Jahre, weil weniger NO für den Ozonabbau vorhanden war.

3. Die Wetterlagenklassifikation CAP

Zur Wetterlagenklassifikation wurde die CAP-Klassifizierung ("Cluster Analysis of Principal Component") mit 9 bzw. 18 Klassen untersucht. Dabei stellte sich heraus, dass die CAP18-Klassifizierung nicht Unterklassen von CAP9 enthält (welche man allenfalls teilweise hätte verwenden können), sondern eine eigenständige Klassifizierung ist, deren Klassen jeweils aus mehreren CAP9-Klassen stammen (s. Kapitel 7). Damit aber hätte die CAP18-Klassifizierung kaum noch zu signifikanten Änderungen über die betrachteten 20 Jahre geführt; somit wurde die CAP9-Klassifizierung verwendet:

Tabelle 3.1: Beschreibung der 9 'CAP9'-Klassen. Quelle: "Description of (new) Weather Types used at MeteoSwiss", MeteoSchweiz, 2011.

CAP9	Beschreibung	Kürzel	Farbe
1	Indifferente Nordostlage	Ind. NE	1
2	Zyklonale West-Südwestlage, strömungsschwach	Zykl. W/SW	2
3	Nördliche Westlage	Nördl. W	3
4	Indifferente Ostlage	Ind. E	4
5	Hoch über den Alpen	H Alpen	5
6	Zyklonale Nordlage	Zykl. N	6
7	Zyklonale West-Südwestlage	Zykl. W/SW	7
8	Hoch über Mitteleuropa	H M-Europa	8
9	Südliche Zyklonale Westlage	Südl. Zykl. W	9

Hinweise:

Die Reihenfolge 1-9 folgt der mittleren Häufigkeit der einzelnen Klassen.

Indifferent: Flache Druckverteilung, geringe Windgeschwindigkeiten in der freien Atmosphäre.

Zyklonal: Von Tiefdruckgebiet gesteuert.

Z.B. Westlage: Strömung in der freien Atmosphäre aus Sektor West.

3.1. Erklärung zur Darstellung von Auswertungen nach CAP9-Klassen

In dieser Studie werden viele Parameter nach CAP-Klasse für den Zeitraum 2002-2021 dargestellt. Diese Darstellungen folgen alle demselben Muster:

Mittelwerte: Rote Balken mit Beschriftung.

90%- und 10%-Quantile bzw. Standardfehler: Schwarze Fehlerbalken.

Signifikante Änderungen von 2002-2021: Gelbe Säulen.

Die Änderungen (gelbe Säulen) beziehen sich jeweils auf die linke Achse, die Mittelwerte und Quantile bzw. Standardfehler auf die rechte. Bis auf wenige Ausnahmen sind die Wertebereiche der beiden Achsen (Differenz zwischen maximalem und minimalem Skalenwert) jeweils gleich, so dass schon visuell Änderungen in Relation zu den Mittelwerten gesetzt werden können.

Meteorologische Grössen (Häufigkeit von CAP-Klassen, Inversionshäufigkeiten, Bewölkung) werden mit den Quantilen ihrer jährlichen bzw. jahreszeitlichen Werte dargestellt. Immissionsgrössen (NOx, PM10, mittleres tägliches Ozonmaximum), welche z.T. einen starken Trend über die 20 Jahre aufweisen, werden mit dem Standardfehler dargestellt; dies ist die mittlere Abweichung von der Regressionsgeraden, ist nicht mit der Standardabweichung zu verwechseln.

Als Signifikant wurde eine Änderung bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit $p < 0.05$ in der linearen Regression eingestuft.

3.2. Jahresmittelwerte der CAP9-Klassenhäufigkeiten

Die folgende Abbildung zeigt die jährliche Häufigkeit der 9 CAP-Klassen von 2001-2022. Es gibt deutliche Schwankungen von Jahr zu Jahr, wobei jede CAP-Klasse jedes Jahr vorkommt.

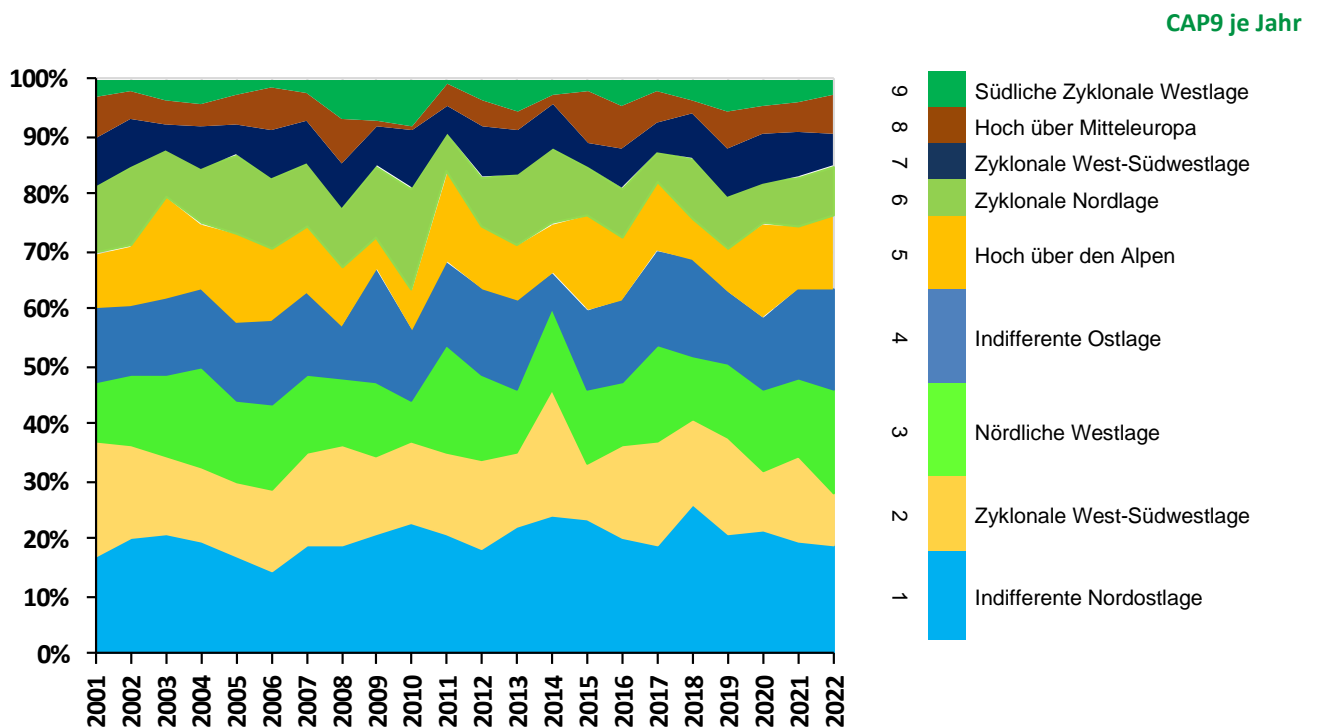


Abbildung 3.1: Jährliche Häufigkeitsverteilung der CAP9-Klassen, 2001-2022.

Die Häufigkeitsverläufe von Abbildung 3.2 wurden wie folgt zusammengefasst:

CAP9 je Jahr

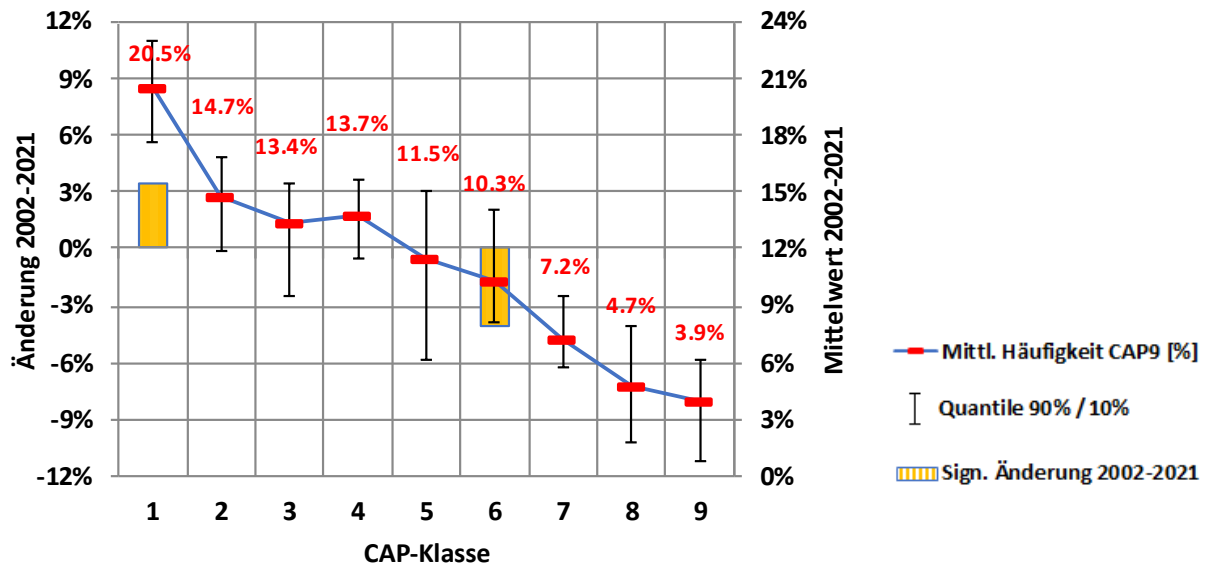


Abbildung 3.2: Mittlere Häufigkeiten der CAP9-Klassen von 2002-2021 (rote Balken mit Beschriftung) samt den 90%- und 10%-Quantilen (schwarze Fehlerbalken) und (in diesem Fall) knapp signifikanten Änderungen (gelb schraffierte Säulen; $p = \text{ca. } 0.06$).

Die Häufigkeit von CAP-Klasse 1 (Indifferente Nordostlage) ist also auf Kosten von CAP-Klasse 6 um etwa 4% angewachsen. CAP6 (Zyklonale Nordlagen) bringen typischerweise kaltes Wetter mit Niederschlägen.

3.3. Jahreszeitenmittelwerte der CAP9-Klassenhäufigkeiten

Bei den einzelnen Jahreszeiten sind die Fluktuationen in den Häufigkeiten wesentlich grösser als im Gesamtjahr. Einzelne CAP-Klassen hängen stark von der Jahreszeit ab. Die CAP-Klassen 1 (Ind. N/E) und in geringerem Masse auch 2 (Zykl. W/SW) sind vor allem im Sommer vertreten und sind auch oft die CAP-Klasse bei Hitzewellen. Auf der anderen Seite kommen die beiden im Winter häufigsten CAP-Klassen 5 (H Alpen) bzw. 8 (H M-Europa) im Sommer sehr wenig bzw. gar nicht vor. Die CAP-Klassen 4 (Ind. O), 5 und 8 treten typischerweise auch bei Kältewellen auf.

CAP9 je Jahreszeit

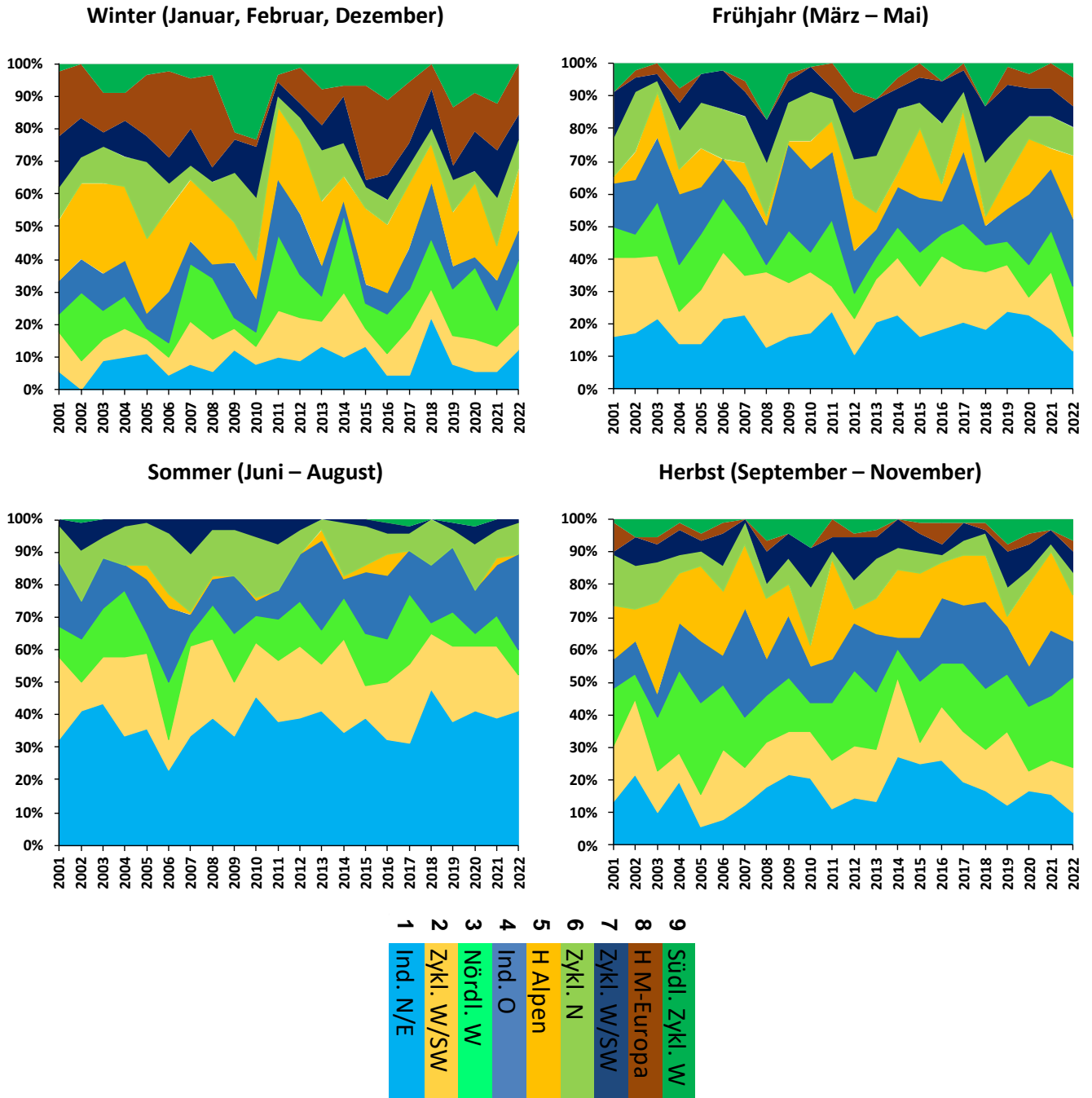


Abbildung 3.3: Häufigkeitsverteilung der CAP9-Klassen je Jahreszeit, 2001-2022.

Die Häufigkeitsverläufe von Abbildung 3.3 wurden wiederum statistisch wie folgt zusammengefasst:

CAP9 je Jahreszeit

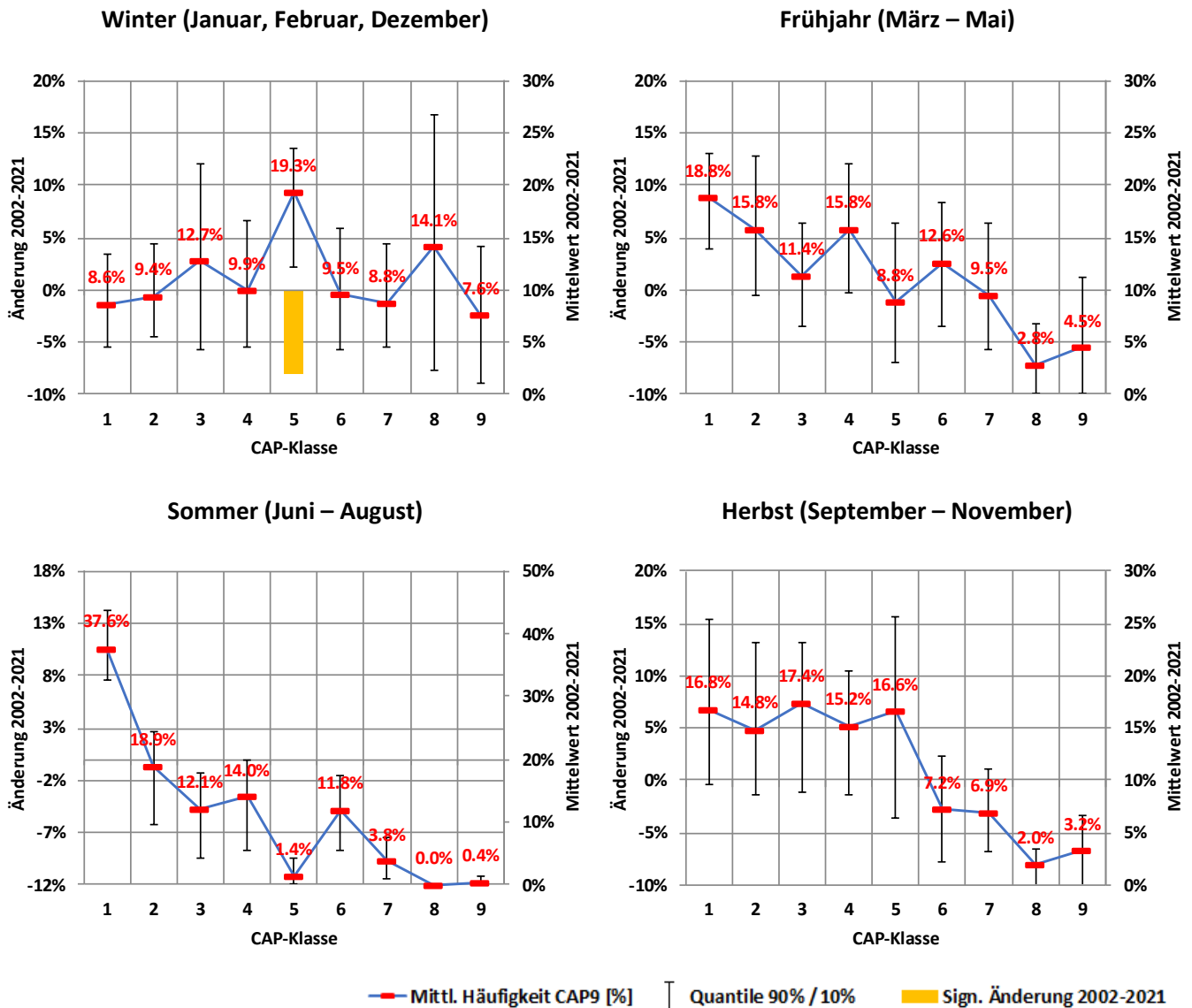


Abbildung 3.4: Häufigkeiten der CAP9-Klassen je Jahreszeit von 2002-2021, Erklärung zur Darstellung s. Kap. 3.1.

Die CAP-Klasse 5 (H Alpen) ist im Winter markant seltener geworden (-8%). Die (nicht signifikante) Zunahme erfolgte demgegenüber in den CAP 1 (Ind. N/E), 2 (Zykl. W/SW), 3 (Nördl. W) und 9 (Südl. Zykl. W). Die Klassen 3 und vor allem 8 (H M-Europa) weisen im Winter ausserordentlich hohe Fluktuationen in den Häufigkeiten auf, auch die Klasse 5 (H Alpen) im Herbst.

4. Inversionshäufigkeit, Immissionen und meteorologische Größen je CAP9-Klasse

In diesem Kapitel werden die mittleren jahreszeitlichen Werte von Inversionshäufigkeiten bzw. Immissionen an NO_x, PM₁₀ und Ozon (tägliches Ozonmaximum) sowie von Temperatur und Niederschlag je CAP-Klasse für den Zeitraum 2002-2021 dargestellt. Dabei werden auch die Streuungen gezeigt (Quantile bei den Inversionshäufigkeiten bzw. Standardfehler bei den Immissionen), sowie allfällige signifikante Änderungen über die 20 Jahre. Im Kap. 3.1 ist die Darstellungsform näher beschrieben.

4.1. Inversionshäufigkeit

Es wurden die Inversionen bei Dornbirn, Rothenbrunnen, Erstfeld und San Vittore ausgewertet.

Winter: An allen Standorten weisen die CAP-Klassen 3 (Nördl. W), 5 (H Alpen) und 8 (H M-Europa) im Mittel die grösste Inversionshäufigkeit auf, die Klassen 1, 6 und 9 die geringste. Generell streuen die Inversionshäufigkeiten je CAP-Klasse **im Jahreszeitmittel** aber stark von Jahr zu Jahr. In Klasse 4 (Ind. O) ist die Inversionshäufigkeit bei 3 Profilen um etwa 20% signifikant gesunken. Bei San Vittore sind die Unterschiede zwischen den CAP-Klassen geringer, weil die Inversionen dort stark lokale Ursachen haben.

Frühjahr: Grundsätzlich das gleiche relative Bild wie im Winter. San Vittore weist bei 5 CAP-Klassen eine signifikante Abnahme auf. Bei Innsbruck sind die Inversionshäufigkeiten bei CAP-Klasse 8 etwas weniger prägnant als bei den übrigen Standorten.

Sommer: Auch hier grundsätzlich das gleiche relative Bild wie im Winter, mit zwei Ausnahmen: CAP-Klasse 8 (H M-Europa) gibt es im Sommer nicht, und San Vittore zeigt nun ein deutlich anderes Muster, wobei die Klassen 3 (Nördl. W) und 5 (H Alpen) immer noch zu den Spitzenreitern zählen. Innsbruck zeigt bei CAP-Klasse 5 deutlich weniger Inversionen als die übrigen Standorte.

Herbst: Auch hier weitgehend das gleiche Bild wie im Winter.

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. Es gibt nur wenige signifikante Änderungen in der mittleren Inversionshäufigkeit je CAP-Klasse.

Inversionshäufigkeit-Winter

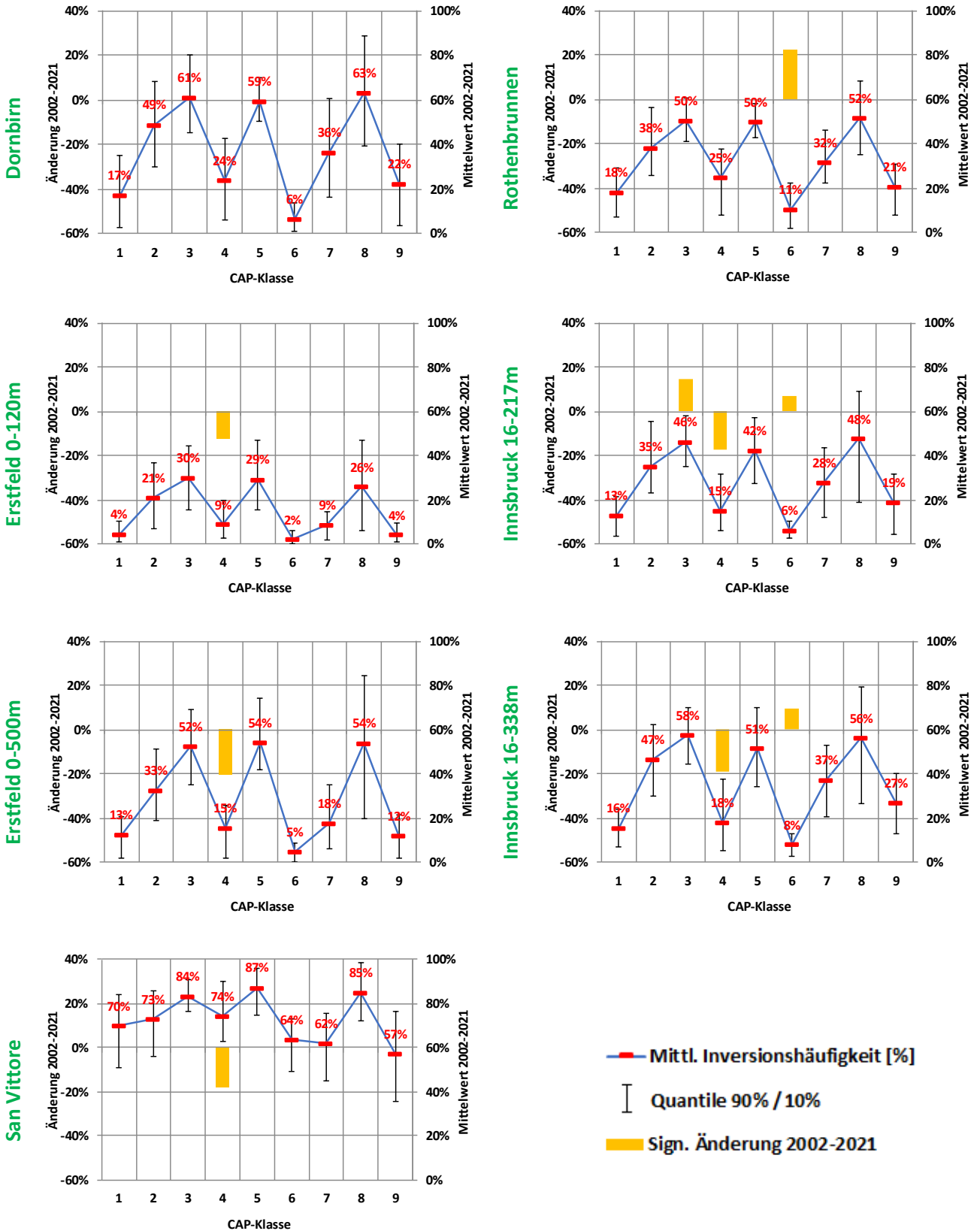


Abbildung 4.1: Inversionshäufigkeit: Änderung, Mittelwerte und Streubereich je CAP9-Klasse, Winter 2002-2021. Erklärung zur Darstellung s. Kap. 3.1.

Inversionshäufigkeit-Frühjahr

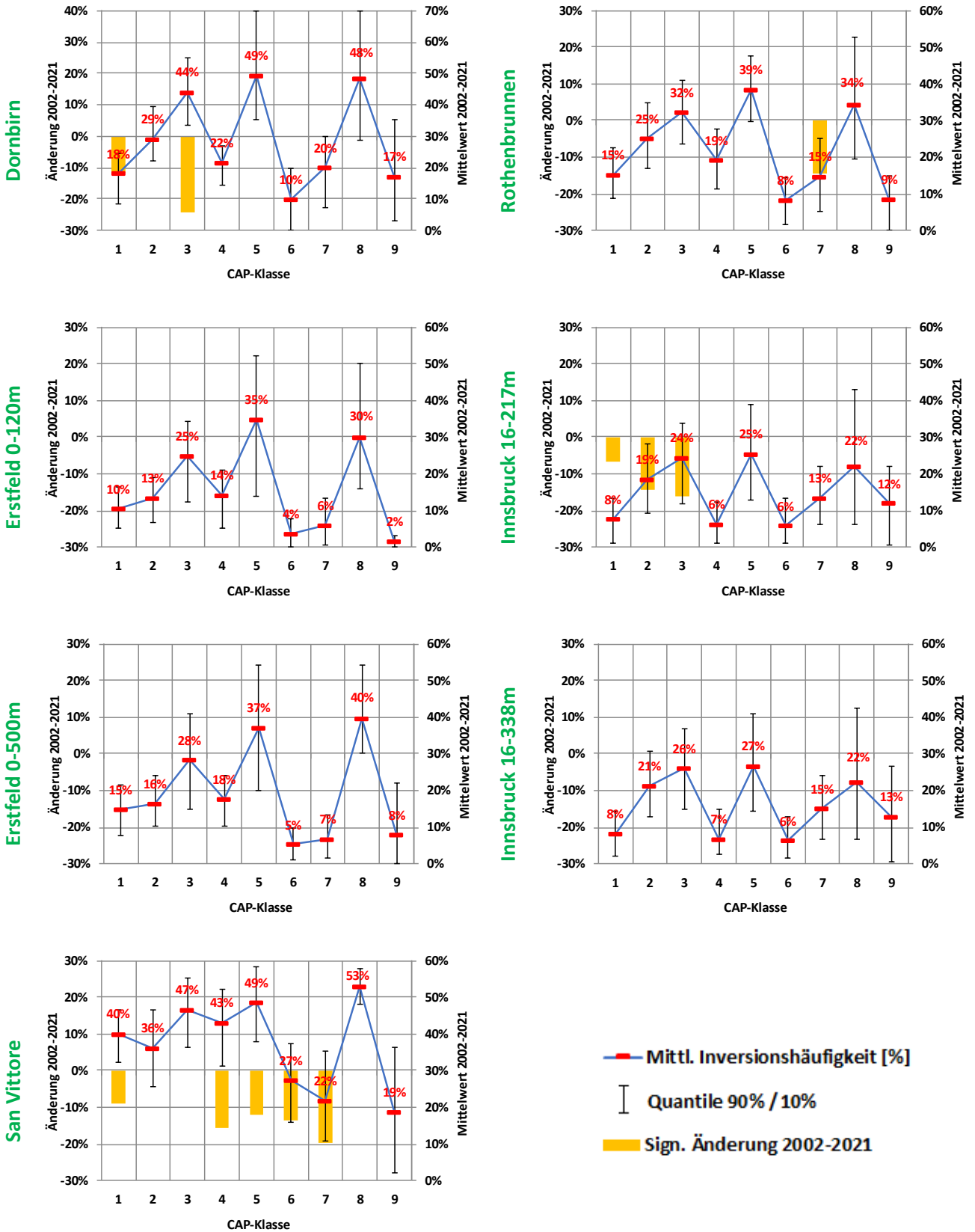


Abbildung 4.2: Inversionshäufigkeit: Änderung, Mittelwerte und Streubereich je CAP9-Klasse, Frühjahr 2002-2021. Erklärung zur Darstellung s. Kap. 3.1.

Inversionshäufigkeit-Sommer

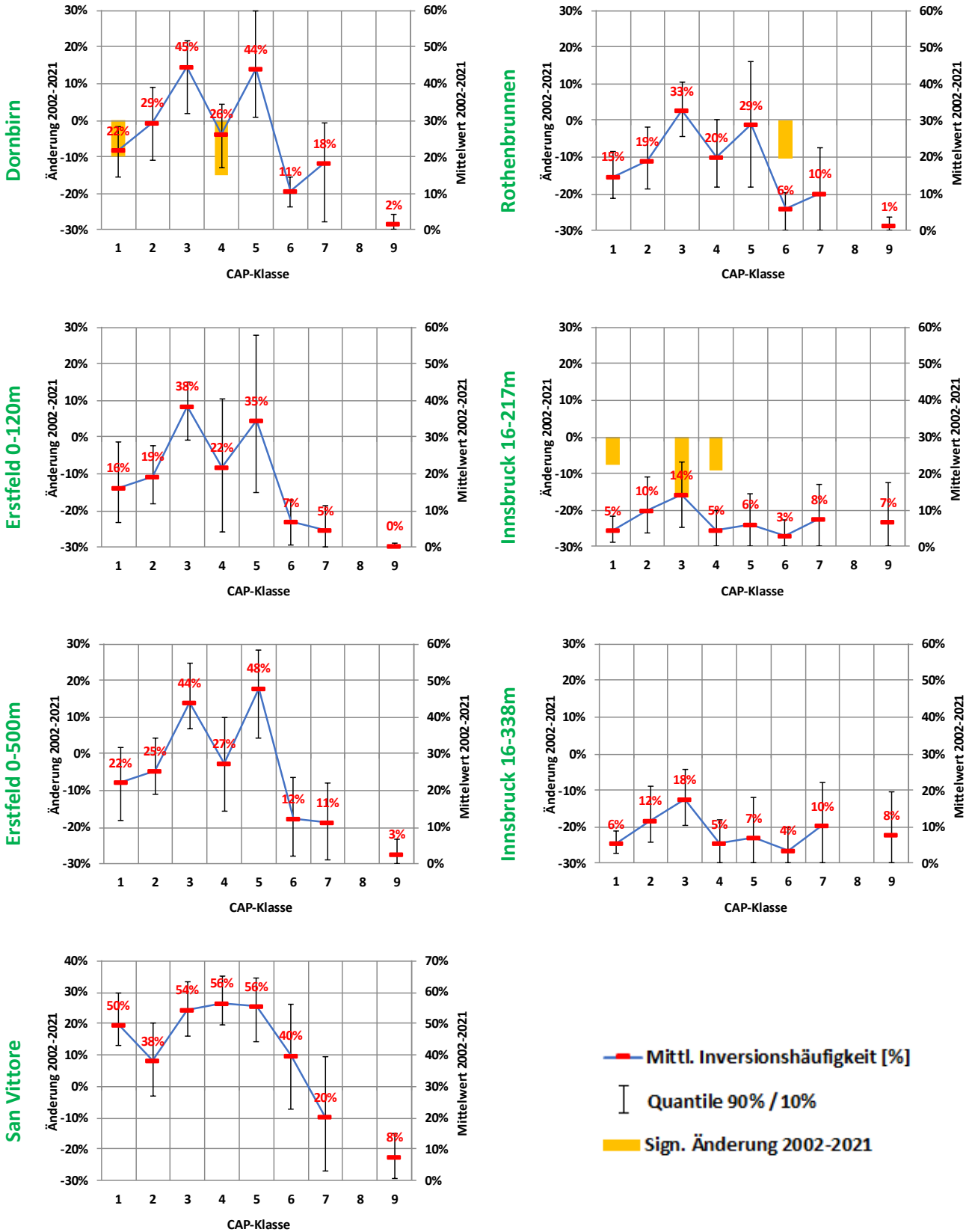


Abbildung 4.3: Inversionshäufigkeit: Änderung, Mittelwerte und Streubereich je CAP9-Klasse, Sommer 2002-2021. Erklärung zur Darstellung s. Kap. 3.1.

Inversionshäufigkeit-Herbst

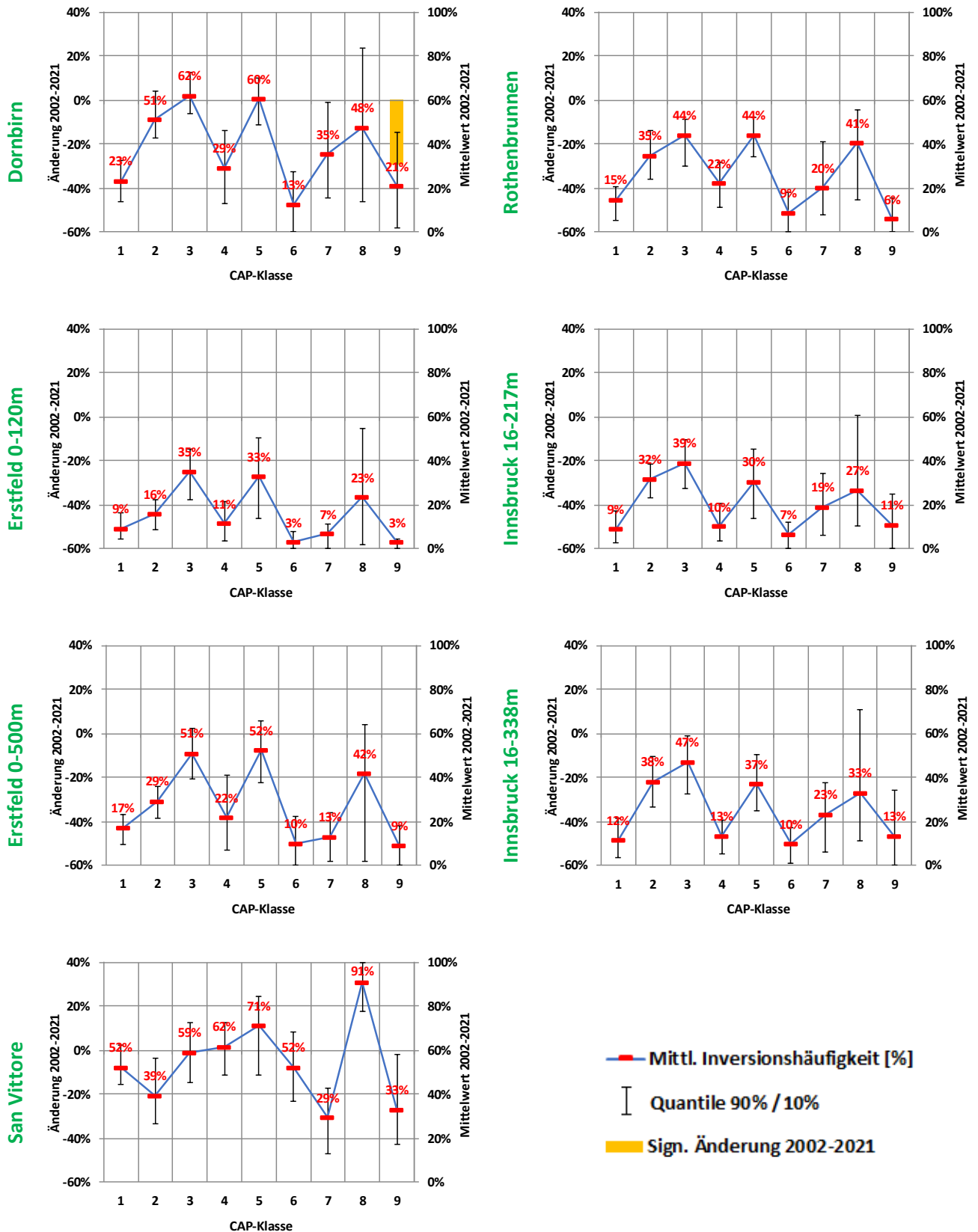


Abbildung 4.4: Inversionshäufigkeit: Änderung, Mittelwerte und Streubereich je CAP9-Klasse, Herbst 2002-2021. Erklärung zur Darstellung s. Kap. 3.1.

4.2. Berechnung Inversionshäufigkeit mit CAP9-Klassen

Zwar unterscheidet sich die mittlere Inversionshäufigkeit stark je nach CAP-Klasse, aber da es von Jahr zu Jahr innerhalb jeder CAP-Klasse starke Schwankungen in der mittleren jahreszeitlichen Inversionshäufigkeit gibt, kann man die resultierenden Inversionshäufigkeiten je Jahreszeit nicht aus der Verteilung der CAP-Klassen berechnen. Natürlich ist dies mathematisch möglich, aber die Variabilität der gemessenen Jahreszeitmittelwerte wird durch eine solche Berechnung nur ungenügend wiedergegeben.

Als Beispiel wird Dornbirn im Winter gezeigt: Die berechneten Werte streuen um die Messkurve, aber sie folgen den gemessenen Fluktuationen zu wenig.

Fazit: Die Wetterlage hat im langzeitlichen Mittel einen dominierenden Einfluss auf das Inversionsgeschehen, aber in der einzelnen Jahreszeit haben andere Variablen offenkundig einen grossen Einfluss.

Inversionshäufigkeit bei Dornbirn im Winter – Messung und Berechnung

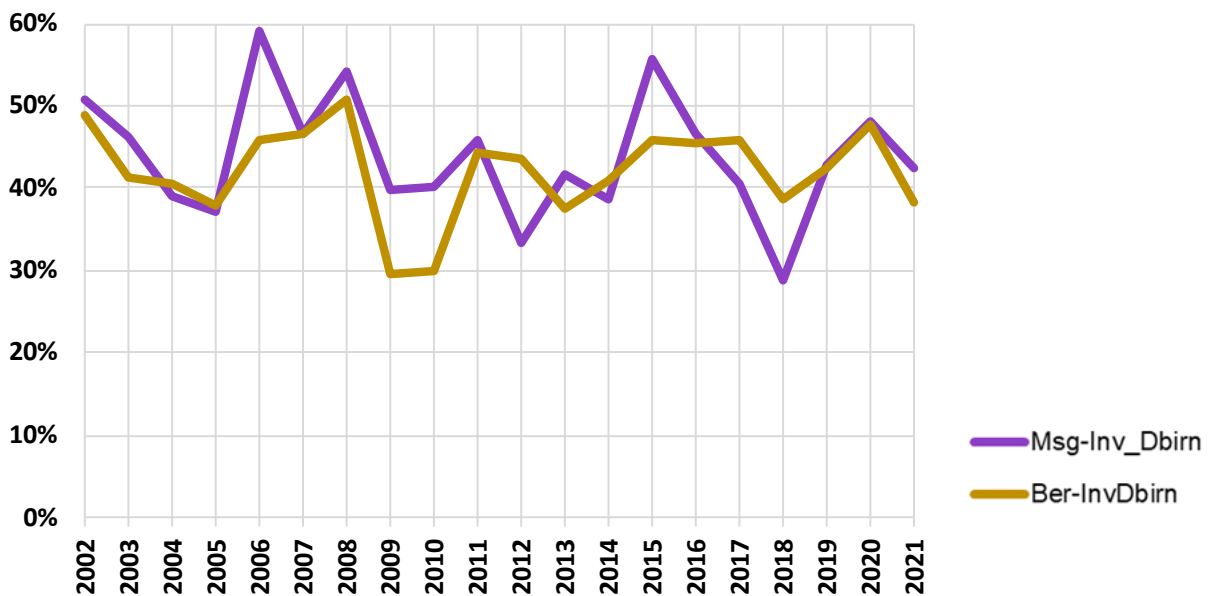


Abbildung 4.5: Inversionshäufigkeit bei Dornbirn im Winter 2002-2021. Msg: Ermittelt aus Messungen im Temperaturprofil je Winter. Ber: Ermittelt aus mittlerer Inversionshäufigkeit über alle Winter je CAP9-Klasse, mit der Häufigkeit der CAP-Klassen im konkreten Winter gewichtete Summe.

4.3. NO_x-Immissionen

Die NO_x-Immissionen haben in den 20 Jahren 2002-2021 infolge verringerter Emissionen stark abgenommen. Entsprechend häufig trifft man auf signifikante Abnahmen in manchen CAP-Klassen.

Winter: Grundsätzlich treten die höchsten Immissionen 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.

Frühjahr: Im Wesentlichen das gleiche Bild wie im Winter, auf niedrigerem Level, bei San Vittore auf sehr viel niedrigerem Level.

Sommer: Tendenziell gleiches relatives Bild wie im Winter (Klasse 8 fehlt). Signifikante Abnahmen auch hier, trotz teilweise sehr tiefer Mittelwerte.

Herbst: Ähnliches Bild wie im Winter.

Innsbruck (Vomp A12) zeigt in allen Jahreszeiten und über alle CAP-Klassen die markantesten NO_x-Abnahmen. Dies hängt mit den umgesetzten Maßnahmen des Landes Tirol bzgl. Des Leicht- und des Schwerverkehrs auf der Brennerautobahn A12 zusammen.

Im Mittel über alle 5 Stationen weisen die CAP-Klassen 5 und 8 in allen Jahreszeiten ausser dem Sommer die höchsten NO_x-Konzentrationen auf, gefolgt von CAP-Klasse 3.

NOx-Winter

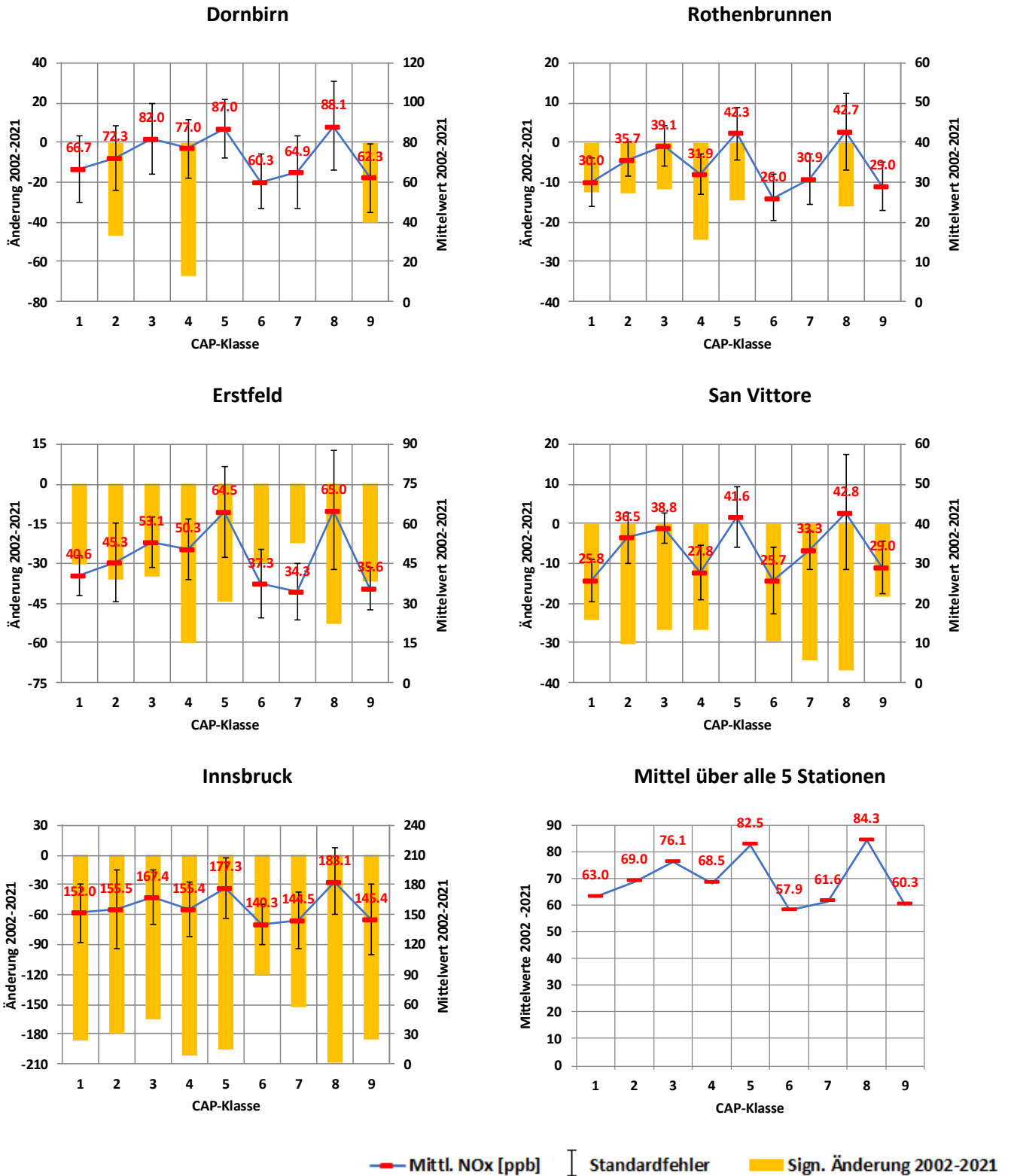


Abbildung 4.6: NOx: Änderung, Mittelwerte und Streubereich je CAP9-Klasse, Winter 2002-2021. Erklärung zur Darstellung s. Kap. 3.1.

NO_x-Frühjahr

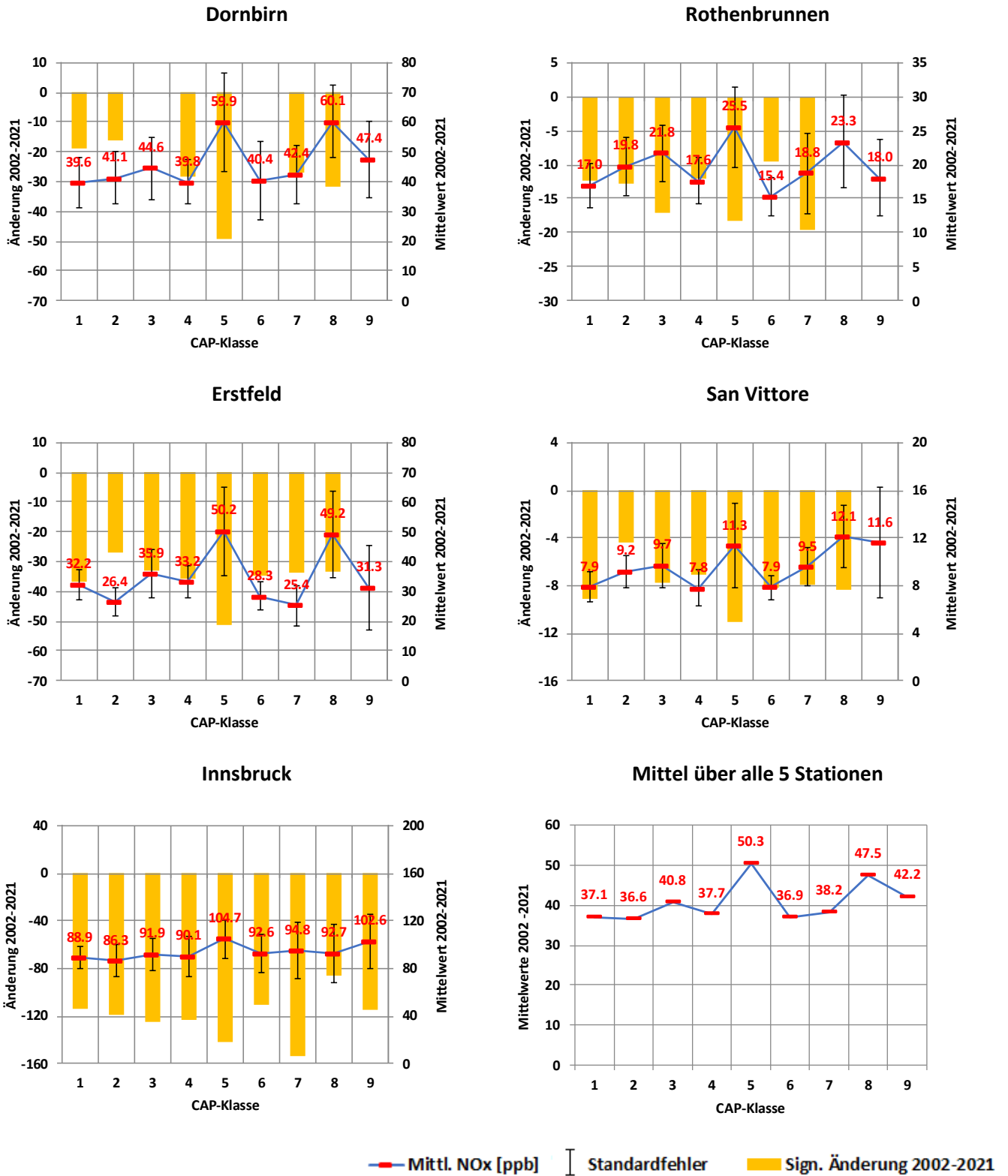


Abbildung 4.7: NO_x Änderung, Mittelwerte und Streubereich je CAP9-Klasse, Frühjahr 2002-2021. Erklärung zur Darstellung s. Kap. 3.1.

NO_x-Sommer

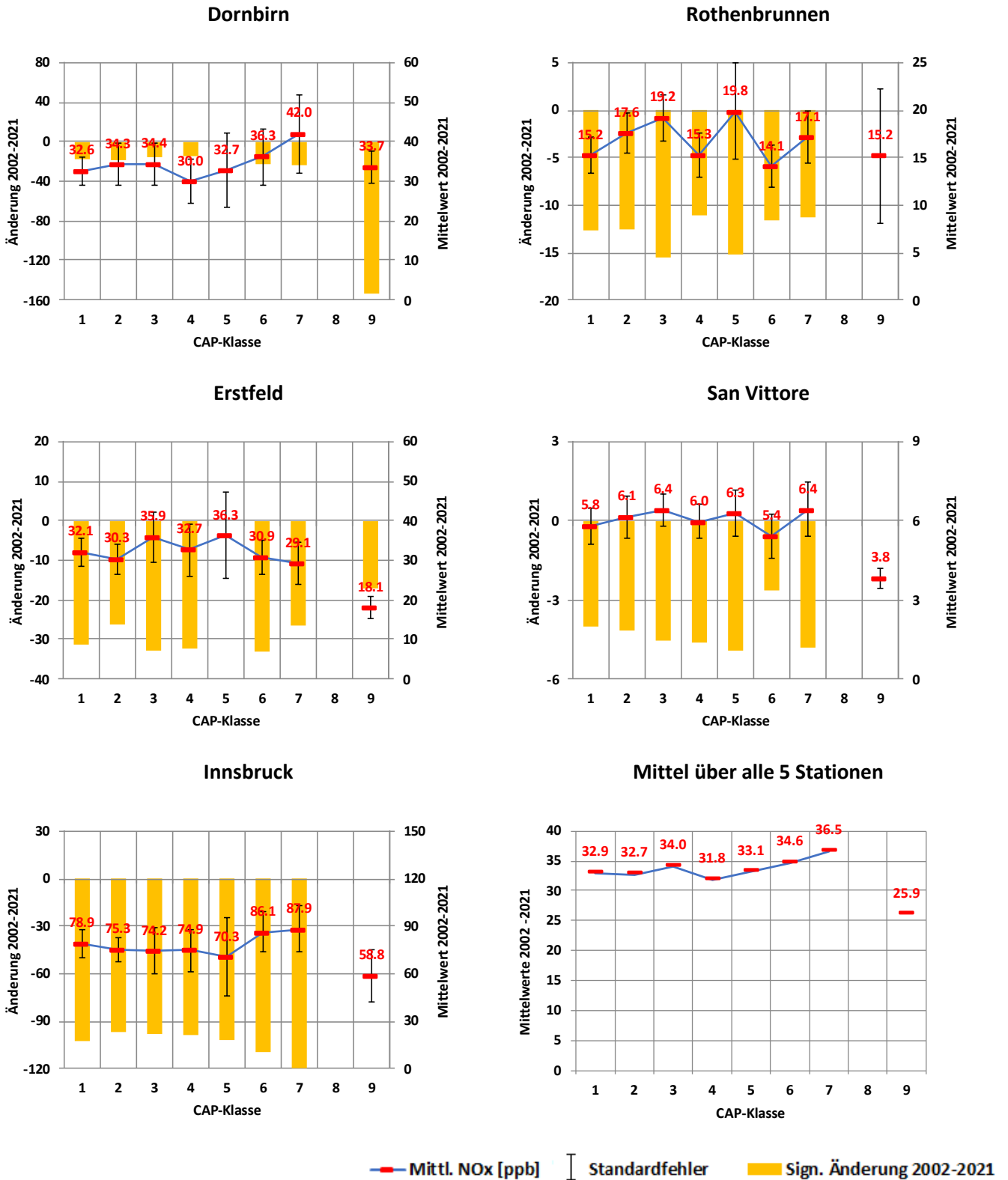


Abbildung 4.8: NO_x: Änderung, Mittelwerte und Streubereich je CAP9-Klasse, Sommer 2002-2021. Erklärung zur Darstellung s. Kap. 3.1.

NOx-Herbst

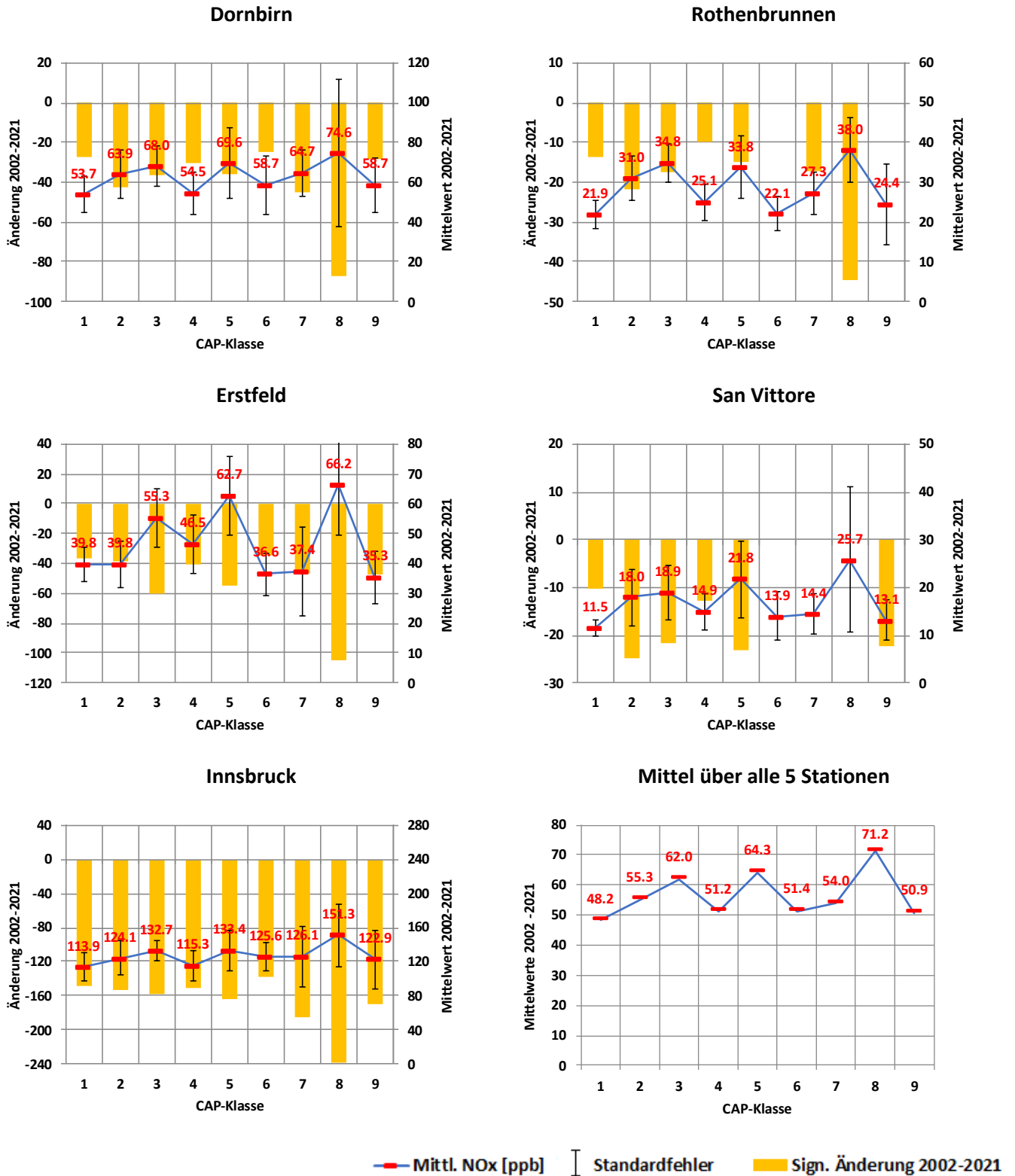


Abbildung 4.9: NOx: Änderung, Mittelwerte und Streubereich je CAP9-Klasse, Herbst 2002-2021. Erklärung zur Darstellung s. Kap. 3.1.

4.4. PM10-Immissionen

Die PM10-Immissionen haben in den 20 Jahren 2002-2021 infolge verringerter Emissionen stark abgenommen. Entsprechend häufig trifft man auf signifikante Abnahmen in manchen CAP-Klassen.

Winter: Grundsätzlich treten die höchsten Immissionen in den CAP-Klassen mit der höchsten Inversionshäufigkeit auf (Klassen 5 (H Alpen) und 8 (H M-Europa), in San Vittore auch 3 (Nördl. W)). Die deutlichen Abnahmen sind in allen CAP-Klassen zu erkennen. Innsbruck ist beim PM10 den anderen Standorten ähnlicher als beim NO_x, wo es eine besonders große Abnahme aufweist.

Die markanteste Abnahme zeigt San Vittore im Winter: Etwa -40 µg/m³ PM10 von 2002-2021, auch prozentual die grösste Abnahme (Länge der gelben Säulen) von allen Stationen. Dies ist zweifellos dem speziellen Programm geschuldet, mit welchem der Kanton Graubünden die Emissionen von Holzfeuerungen reduziert hat.

Frühjahr: Überall mit Ausnahme von Rothenbrunnen und Innsbruck auch prozentual geringere PM10-Reduktion als im Winter. Ähnliches *relatives* Bild wie im Winter.

Sommer: Dornbirn, Erstfeld und Innsbruck zeigen auch im Sommer signifikante Abnahmen des PM10, Rothenbrunnen und San Vittore nicht oder kaum.

Herbst: Ähnliches Bild wie im Winter, nur in San Vittore ist die PM10-Abnahme verhältnismässig geringer als im Winter, wohl weil im Herbst die Holzfeuerungen noch ein geringeres Problem sind.

Im Mittel über alle 5 Stationen weisen wie beim NO_x die CAP-Klassen 5 und 8 in allen Jahreszeiten ausser dem Sommer die höchsten PM10-Konzentrationen auf, im Sommer liegt der Spitzenwert bei CAP-Klasse 3.

PM10-Winter

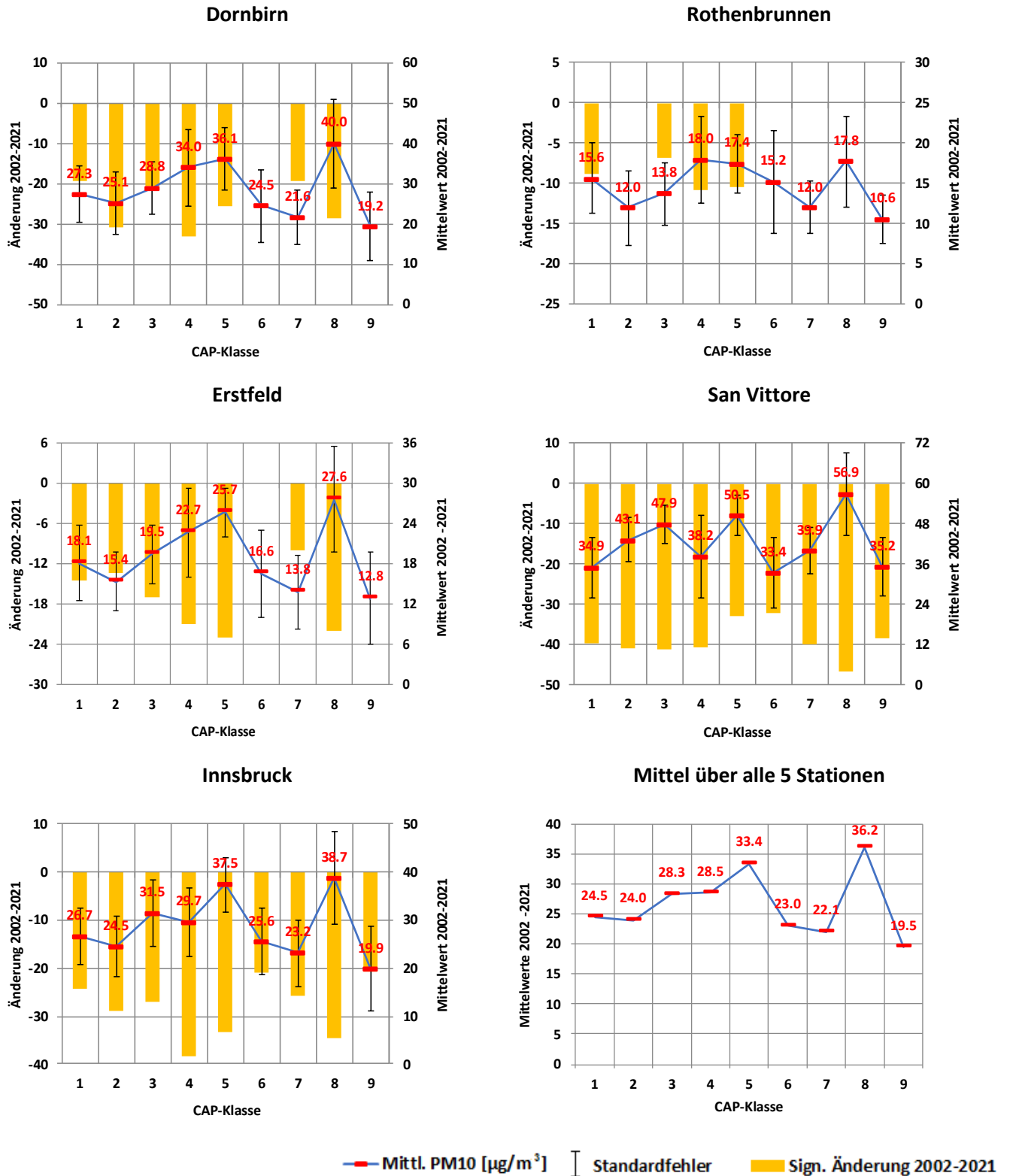


Abbildung 4.10: PM10: Änderung, Mittelwerte und Streubereich je CAP9-Klasse, Winter 2002-2021. Erklärung zur Darstellung s. Kap. 3.1.

PM10-Frühjahr

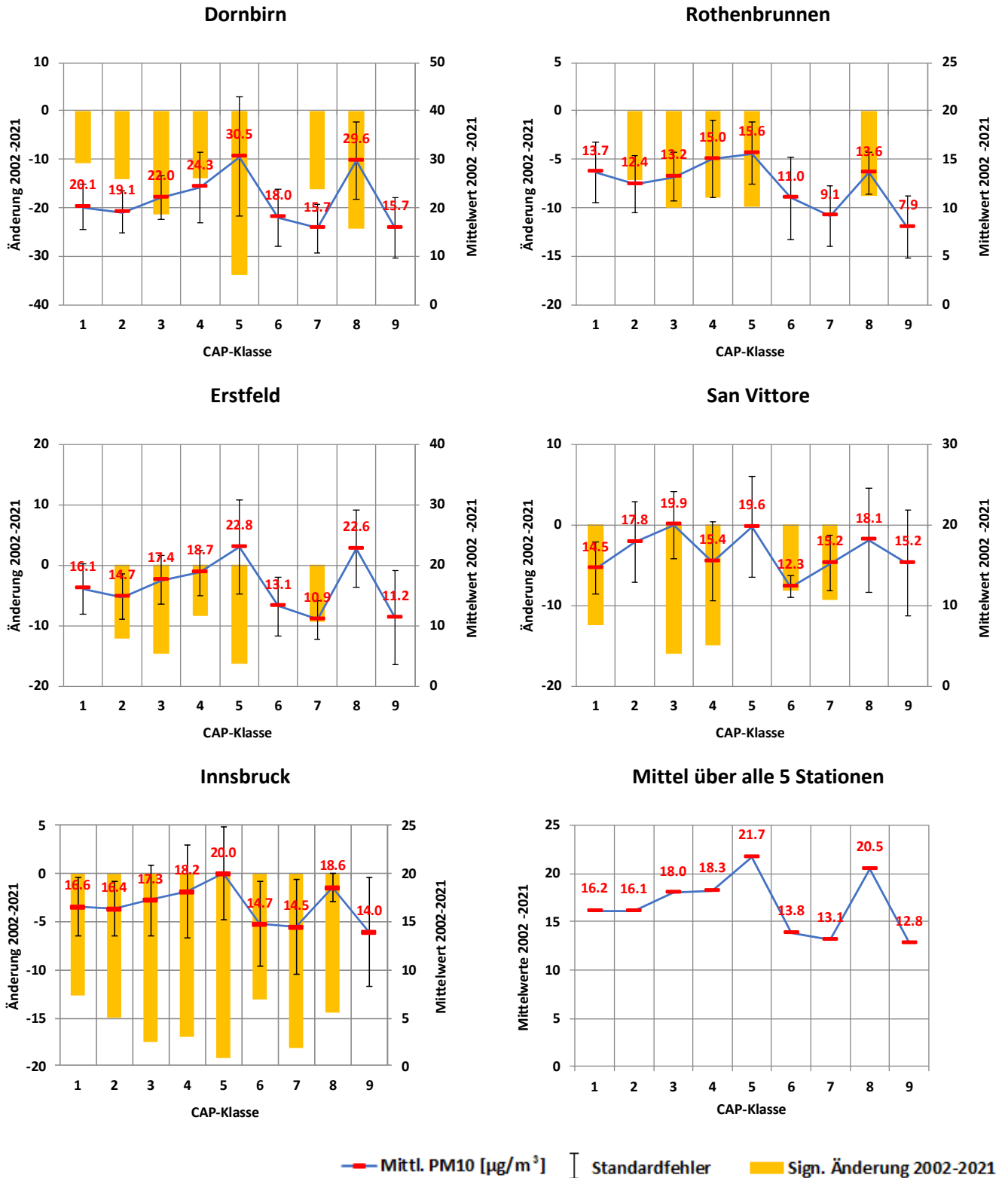


Abbildung 4.11: PM10: Änderung, Mittelwerte und Streubereich je CAP9-Klasse, Frühjahr 2002-2021. Erklärung zur Darstellung s. Kap. 3.1.

PM10-Sommer

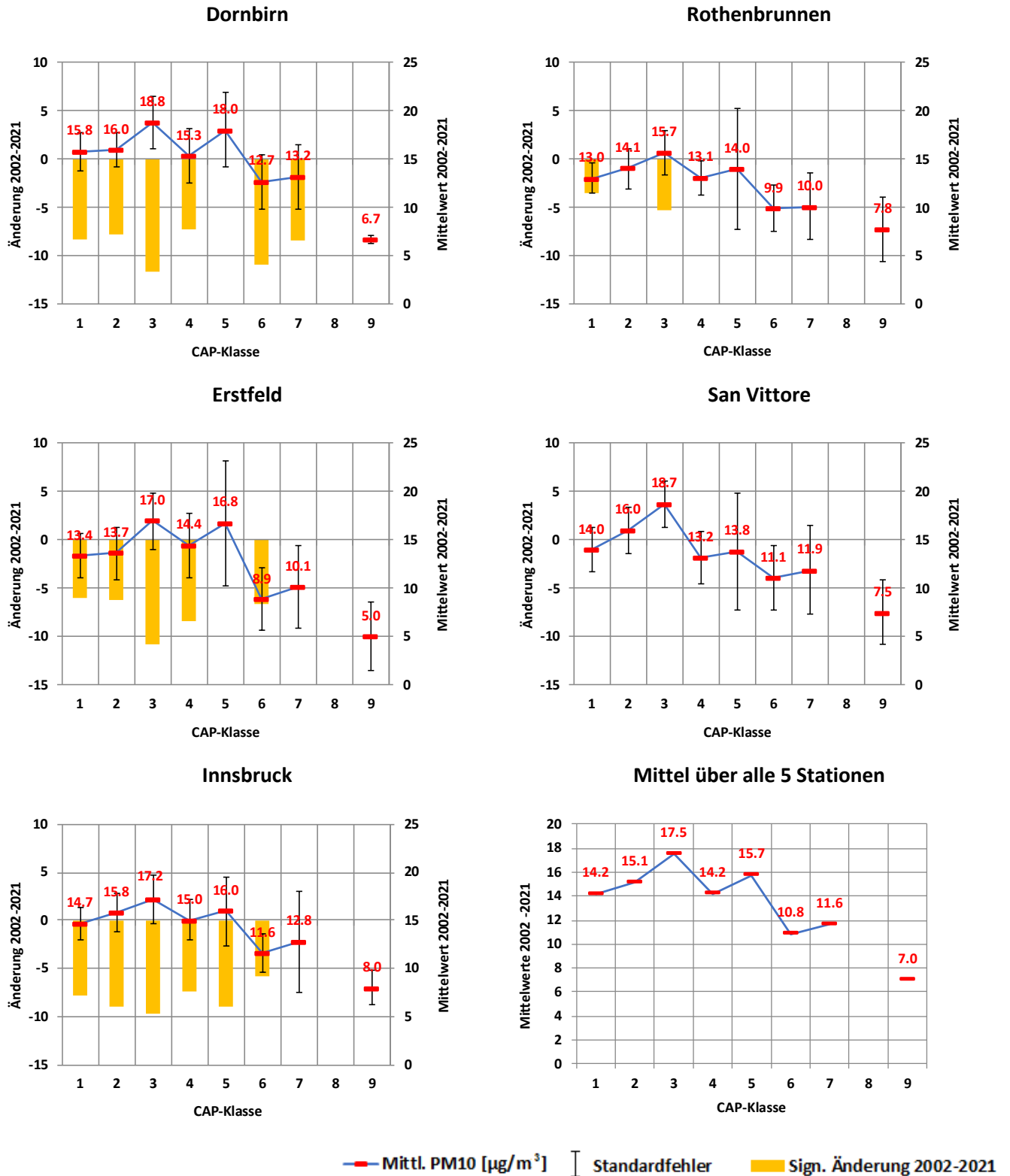


Abbildung 4.12: PM10: Änderung, Mittelwerte und Streubereich je CAP9-Klasse, Sommer 2002-2021. Erklärung zur Darstellung s. Kap. 3.1.

PM10-Herbst

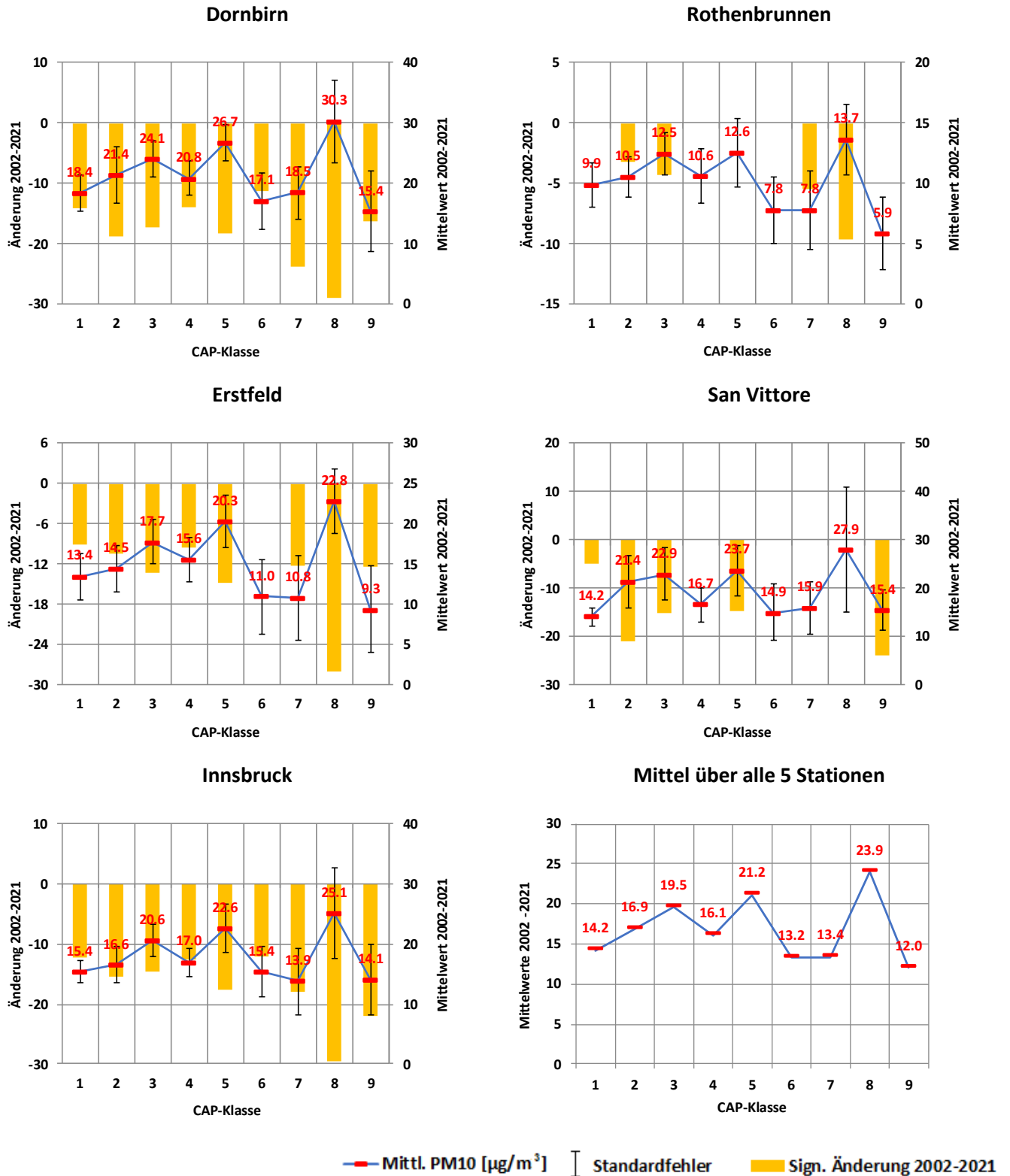


Abbildung 4.13: PM10: Änderung, Mittelwerte und Streubereich je CAP9-Klasse, Herbst 2002-2021. Erklärung zur Darstellung s. Kap. 3.1.

4.5. Mittleres tägliches Ozonmaximum - O₃max

Beim mittleren täglichen Ozonmaximum tritt insgesamt gesehen die Klasse 3 (Nördliche Westlage) 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) und Rigi-Seebodenalp (Erstfeld) im Frühjahr und Sommer verbreitet Abnahmen ohne Signifikanz aufweisen.

Winter: Einige Zunahmen sind bei San Vittore zu sehen – wegen der Emissionsreduktion bei den Holzfeuerungen? Innsbruck (Fallmerayerstraße) zeigt als einziger Standort die deutlich tiefsten Ozonspitzen in den CAP-Klassen 5 und 8 (Hochdruckgebiete über den Alpen bzw. über Mitteleuropa), Klasse 8 allerdings mit einer signifikanten Zunahme.

Frühjahr: Einige leichte Abnahmen sind bei Dornbirn und vor allem Erstfeld zu sehen. Es ist zu beachten, dass die Ozonstation "Erstfeld" in dieser Studie Rigi-Seebodenalp ist (1031 m ü.M.), die Ozonstation "Dornbirn" ist Sulzberg (1018 m ü.M.). Erhöht liegende Standorte scheinen also eine leichte Abnahme des mittleren täglichen Ozonmaximums aufzuweisen.

Sommer: Die erhöht liegenden Standorte "Dornbirn" und "Erstfeld" (s. Frühjahr) weisen im Sommer Abnahmen des mittleren täglichen Ozonmaximums in fast allen CAP-Klassen auf, in der Spitzenklasse 3 wiederum signifikant wie im Frühjahr. Dies möglicherweise wegen einiger hoher Ozonbelastungen in den Nullerjahren. Könnte auch für San Vittore (Roveredo) gelten. Ansonsten auch im Sommer kaum signifikante Änderungen in der Ozon-Spitzenbelastung.

Herbst: Im Herbst zeigen sich keine relevanten Änderungen in der Ozon-Spitzenbelastung und eher geringe Unterschiede zwischen den CAP-Klassen.

Im Mittel über alle 5 Stationen weisen die CAP-Klassen 1-5 in allen Jahreszeiten ausser dem Winter etwas höhere mittlere Ozonmaxima auf als die Klassen 6-9.

O₃max-Winter

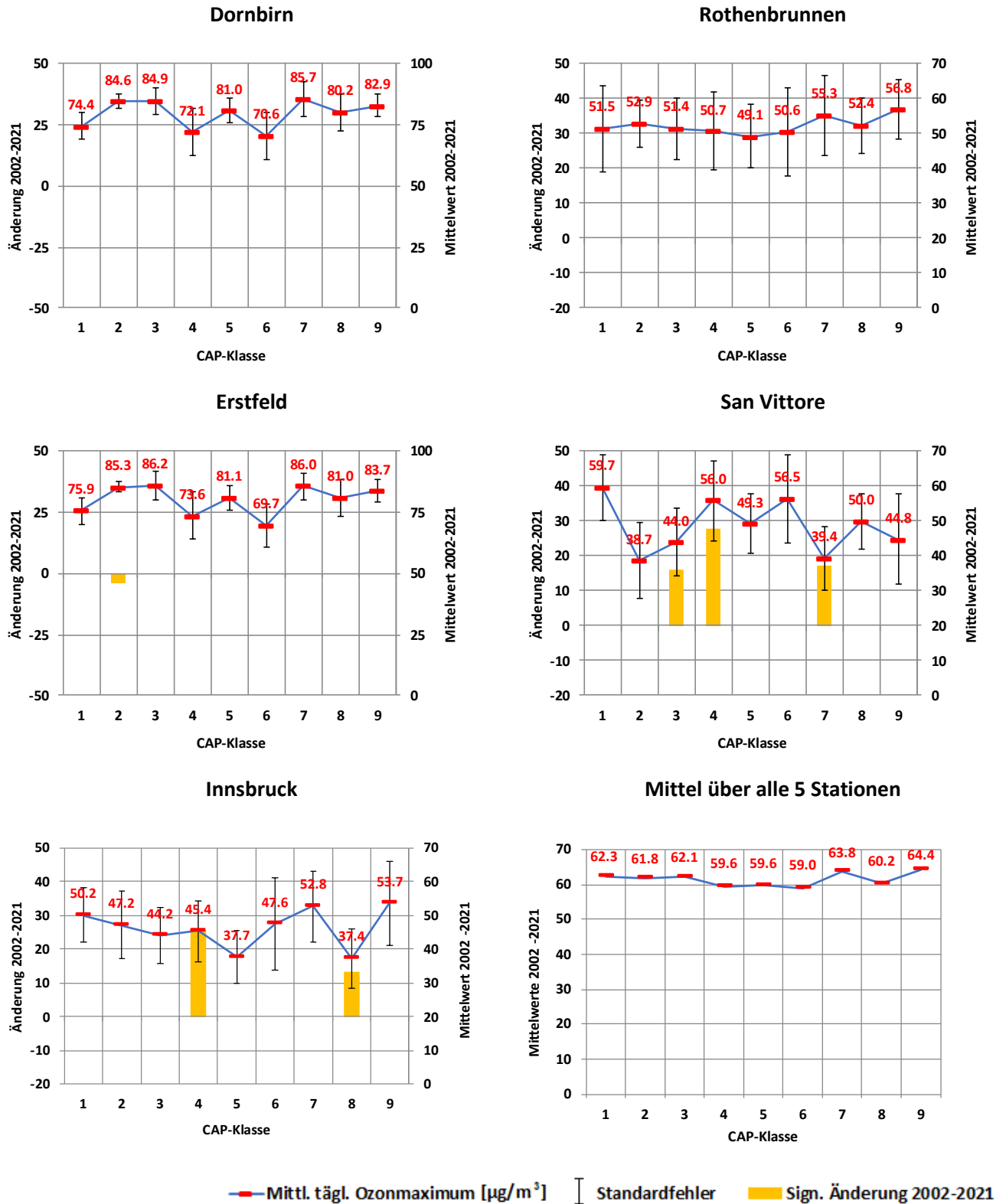


Abbildung 4.14: O₃max: Änderung, Mittelwerte und Streubereich je CAP9-Klasse, Winter 2002-2021. Erklärung zur Darstellung s. Kap. 3.1.

O₃max-Frühjahr

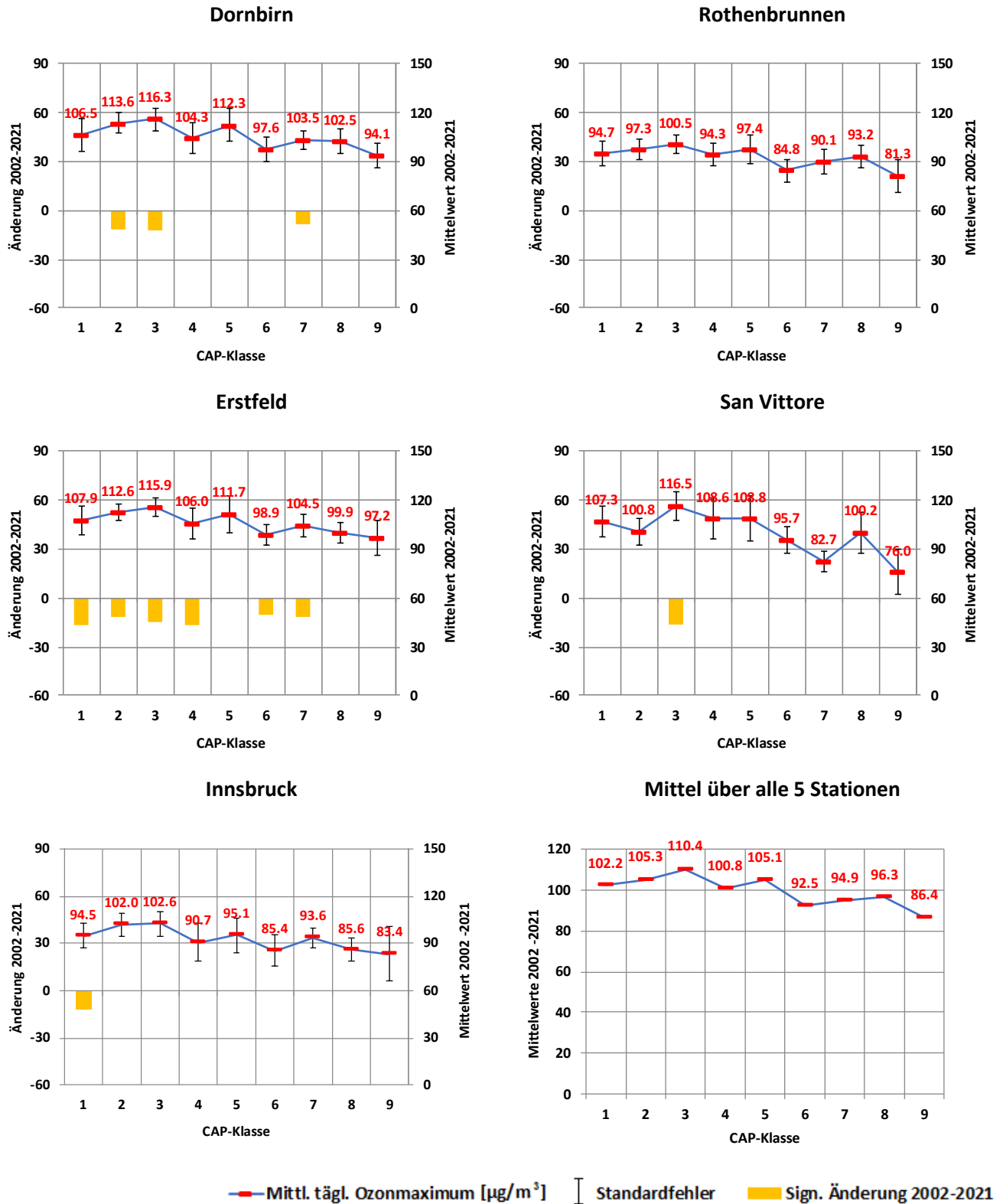


Abbildung 4.15: O₃max: Änderung, Mittelwerte und Streubereich je CAP9-Klasse, Frühjahr 2002-2021. Erklärung zur Darstellung s. Kap. 3.1.

O₃max-Sommer

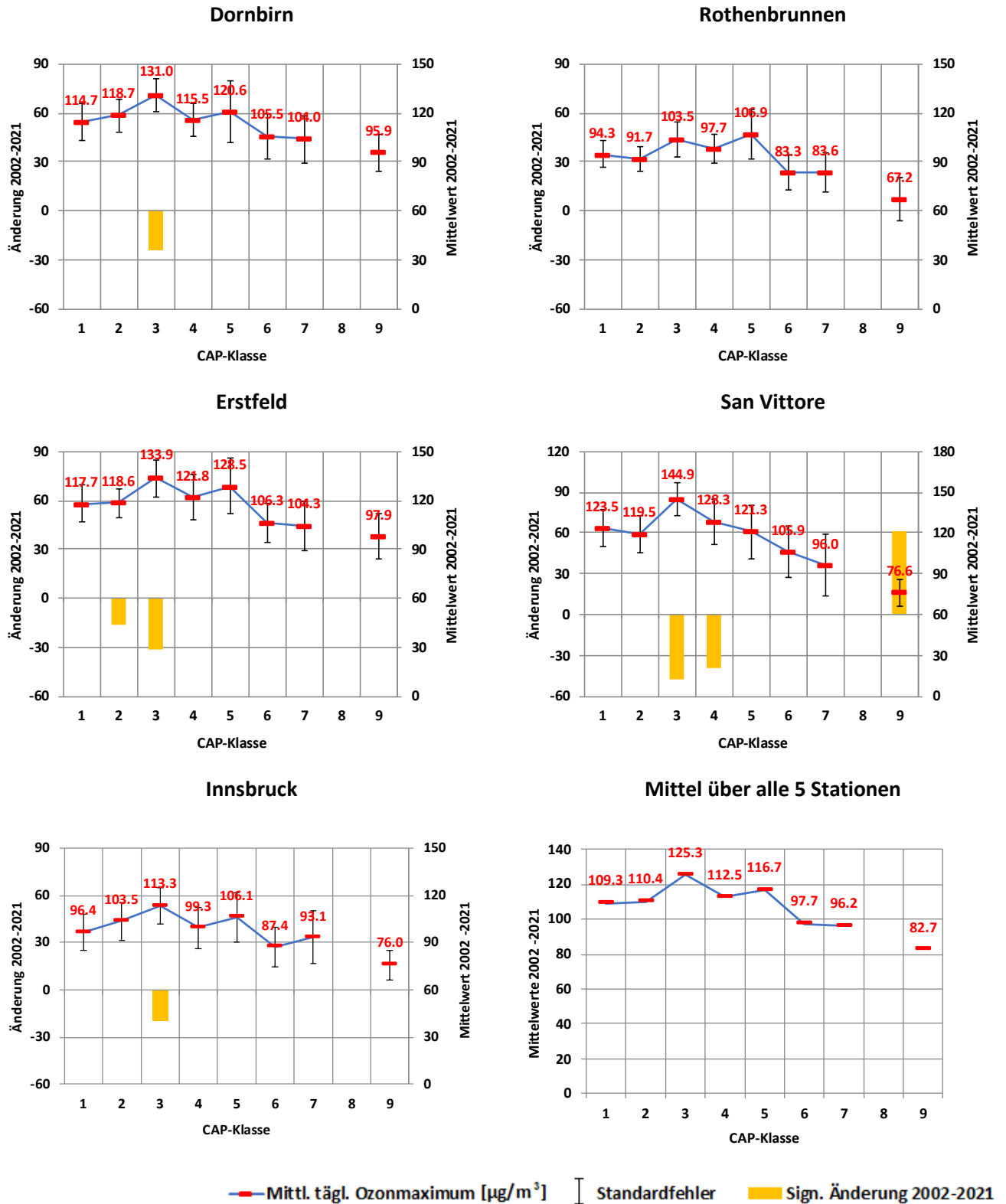


Abbildung 4.16: O₃max: Änderung, Mittelwerte und Streubereich je CAP9-Klasse, Sommer 2002-2021. Erklärung zur Darstellung s. Kap. 3.1.

O₃max-Herbst

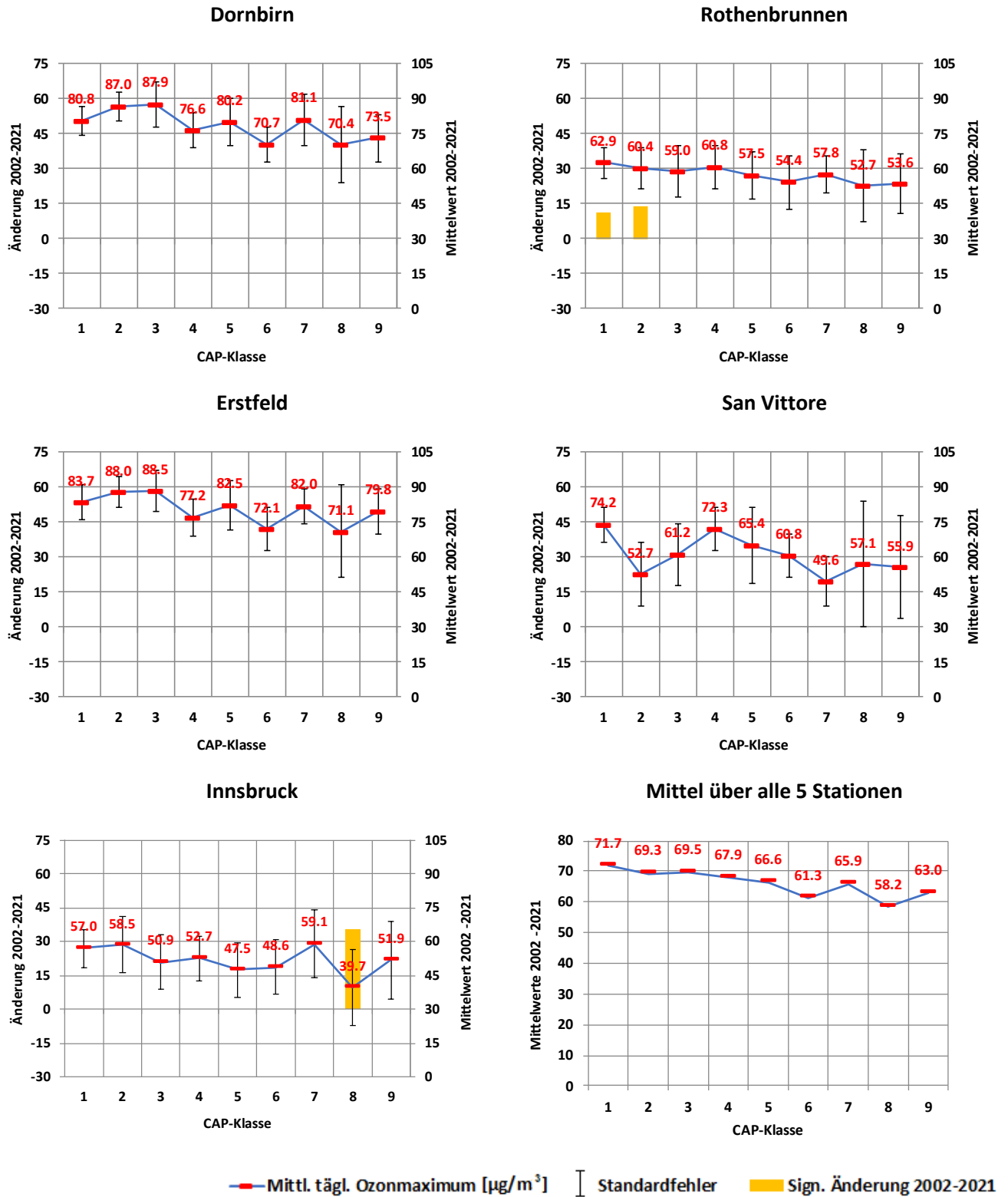


Abbildung 4.17: O₃max: Änderung, Mittelwerte und Streubereich je CAP9-Klasse, Herbst 2002-2021. Erklärung zur Darstellung s. Kap. 3.1.

4.6. Faktor Tau (NO_x-Verhältnis Immission/Emission A2)

Der Faktor Tau = I_{NO_x} [strassennahe Station] / E_{NO_x} [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.

Die folgende Abbildung zeigt die gleitenden 30 Tagemittel (=gleitende Monatsmittel) der NO_x-Immissionen an der Station Erstfeld A2 und der NO_x-Emissionen der A2 in diesem Bereich.

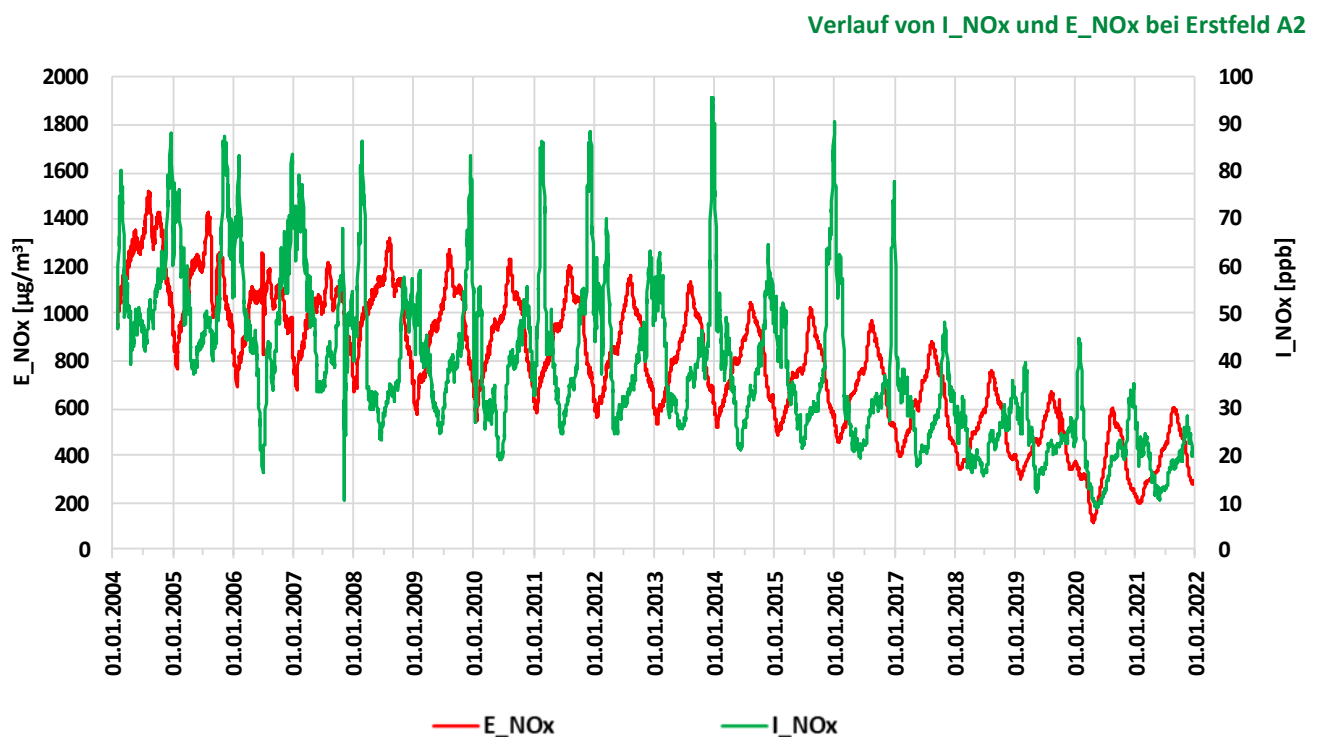


Abbildung 4.18: Verlauf der Immissionen (I_{NO_x}) und der Emissionen (E_{NO_x} ; gemäss HBEFA4.2) bei Erstfeld A2, 2004-2021, gleitende Monatsmittel.

Mit dem neuen HBEFA4.2 sind nun die langzeitlichen Verläufe von I_{NO_x} und E_{NO_x} weitgehend parallel. Von 2004 bis 2021 haben I_{NO_x} und E_{NO_x} bei Erstfeld um etwa 2/3 abgenommen. Bemerkenswert ist, dass von 2004-2017 hohe Immissionsspitzen im Winter auf Basis Monatsmittel nur in 3 Jahren gefehlt haben, nach 2017 fehlen sie aber bislang. Mit der Häufigkeitsverteilung der Wetterlagen im Winter kann dies nicht erklärt werden. Allerdings liefert vielleicht ein genauerer Blick auf den Emissionsverlauf eine Erklärung: Insgesamt haben die NO_x-Emissionen von 2004-2021 um etwa 2/3 abgenommen, das Winterminimum aber um etwa 3/4. Von daher gesehen sind die I_{NO_x} -Spitzen auch nach 2017 immer noch deutlich.

Für jeden Tag wurde ein mittlerer Tau-Faktor = $I_{\text{NO}_x} / E_{\text{NO}_x}$ (Tagesmittel) gebildet. Diese Tau-Werte wurden in der Folge statistisch gleich behandelt wie andere Immissionswerte und nach CAP-Klasse aufgeteilt.

Tau-Faktor (I_{NOx}/E_{NOx}) bei Erstfeld A2 nach CAP9-Klasse

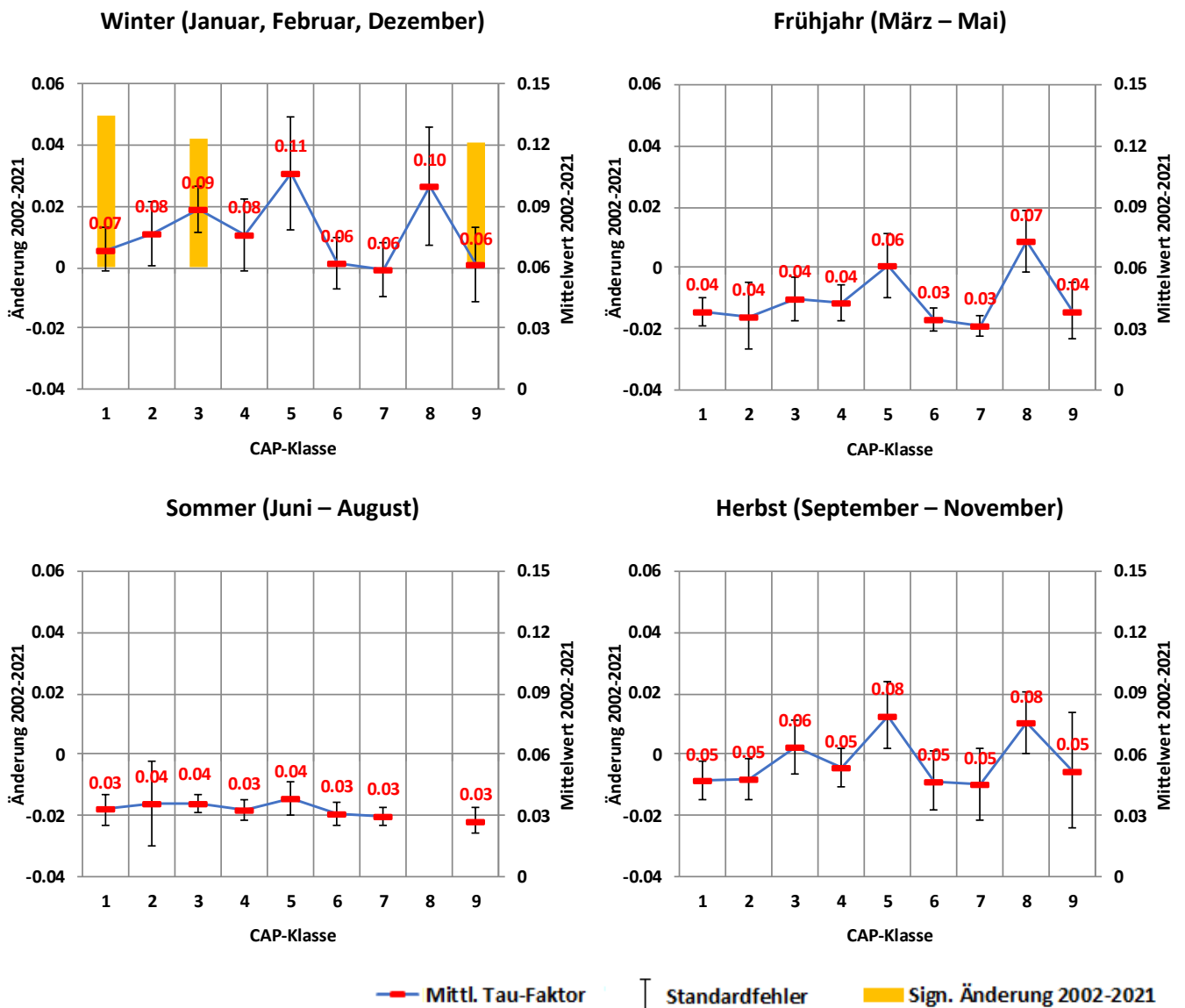


Abbildung 4.19: Tau-Faktor (I_{NOx}/E_{NOx}) bei Erstfeld A2 auf Basis Tagesmittel, Mittelwerte nach CAP9-Klasse, Jahreszeiten 2004-2021.

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. Fast alle CAP-Klassen ausser im Sommer zeigen eine leichte Zunahme der Tau-Faktoren von 2004-2021, in drei Fällen im Winter sogar signifikant. Möglicherweise wurden im HBEFA4.2 die EFA für frühere Jahre leicht zu hoch angesetzt, was dort zu etwas tieferen Tau-Faktoren geführt hat.

4.7. Temperatur und Niederschlag

Es wurden Messdaten der Temperatur an den Stationen Dornbirn ARA und Flughafen Innsbruck von GeoSphere Austria verwendet. Für Dornbirn wurden auch Niederschlagsdaten von GeoSphere Austria herangezogen.

Von 2002-2021 hat sich die **Temperatur** an den beiden Stationen im Jahresmittel um 0.8-0.9 °C erhöht. Je CAP-Klasse gibt es von Jahr zu Jahr große Fluktuationen, und nur bei drei Klassen findet sich eine signifikante Erhöhung (s. Abbildung 4.20): Bei den Klassen 2 (Zyklonale West-Südwestlage), 5 (Hoch über den Alpen) und 8 (Hoch über Mitteleuropa); in der Klasse 8 allerdings gleich um 4-5 °C in 20 Jahren. Die kalten winterlichen Hochdrucklagen sind deutlich wärmer geworden.

Temperatur je CAP9-Klasse

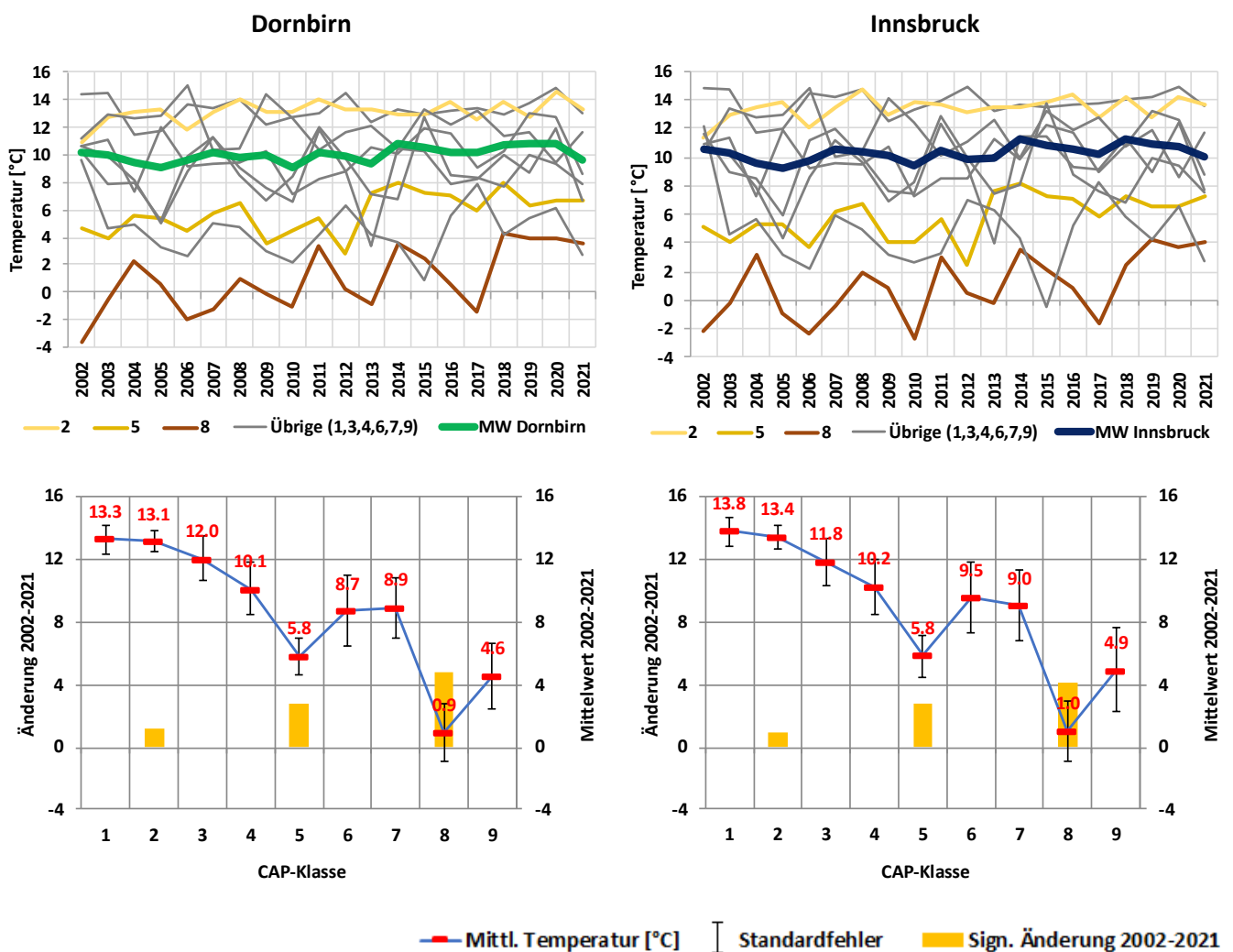


Abbildung 4.20: Oben: Jahresmittelverlauf der Temperatur je CAP-Klasse und insgesamt für Dornbirn (links) und Innsbruck (rechts), 2002-2021. Unten: Temperatur: Änderung, Mittelwerte und Streubereich je CAP9-Klasse, 2002-2021. Erklärung zur Darstellung s. Kap. 3.1.

Es ist bemerkenswert, wie sehr sich die Temperaturverteilungen nach CAP-Klasse an den beiden Standorten ähneln. Lokale Temperatureffekte scheinen da nur eine untergeordnete Rolle zu spielen.

Diese Ähnlichkeit besteht auch bei den einzelnen Jahreszeiten. Obwohl die Temperaturverteilung nach CAP-Klasse unterschiedlich ist je Jahreszeit, gibt es kaum Unterschiede zwischen den beiden Standorten. Über alle Jahreszeiten gesehen sind die Klassen 2 (strömungsschwache zyklonale West-Südwestlage) und 3 (nördliche Westlage) je Jahreszeit am wärmsten und Klasse 8 (Hoch über Mitteleuropa) am kältesten.

Temperatur-Frühjahr & Sommer

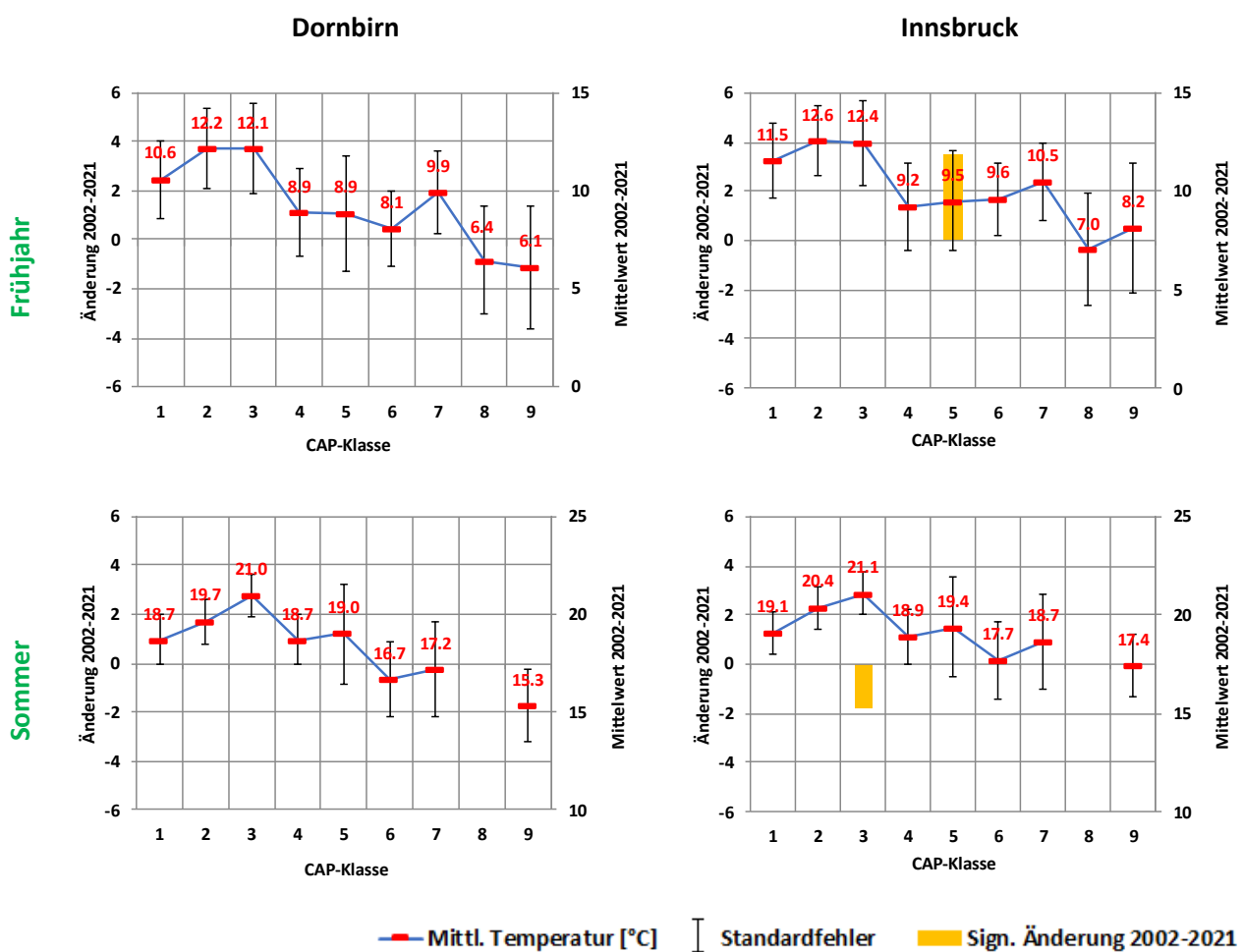


Abbildung 4.21: Temperatur: Änderung, Mittelwerte und Streubereich je CAP9-Klasse, Frühjahr und Sommer 2002-2021. Erklärung zur Darstellung s. Kap. 3.1.

Die Temperaturfluktuationen (Standardfehler) betragen typischerweise ± 2 °C, weit aus mehr als der Temperaturanstieg im Jahresmittel von 0.8-0.9 °C. Deshalb können nur wenige signifikante Änderungen je CAP-Klasse festgestellt werden.

Temperatur-Herbst & Winter

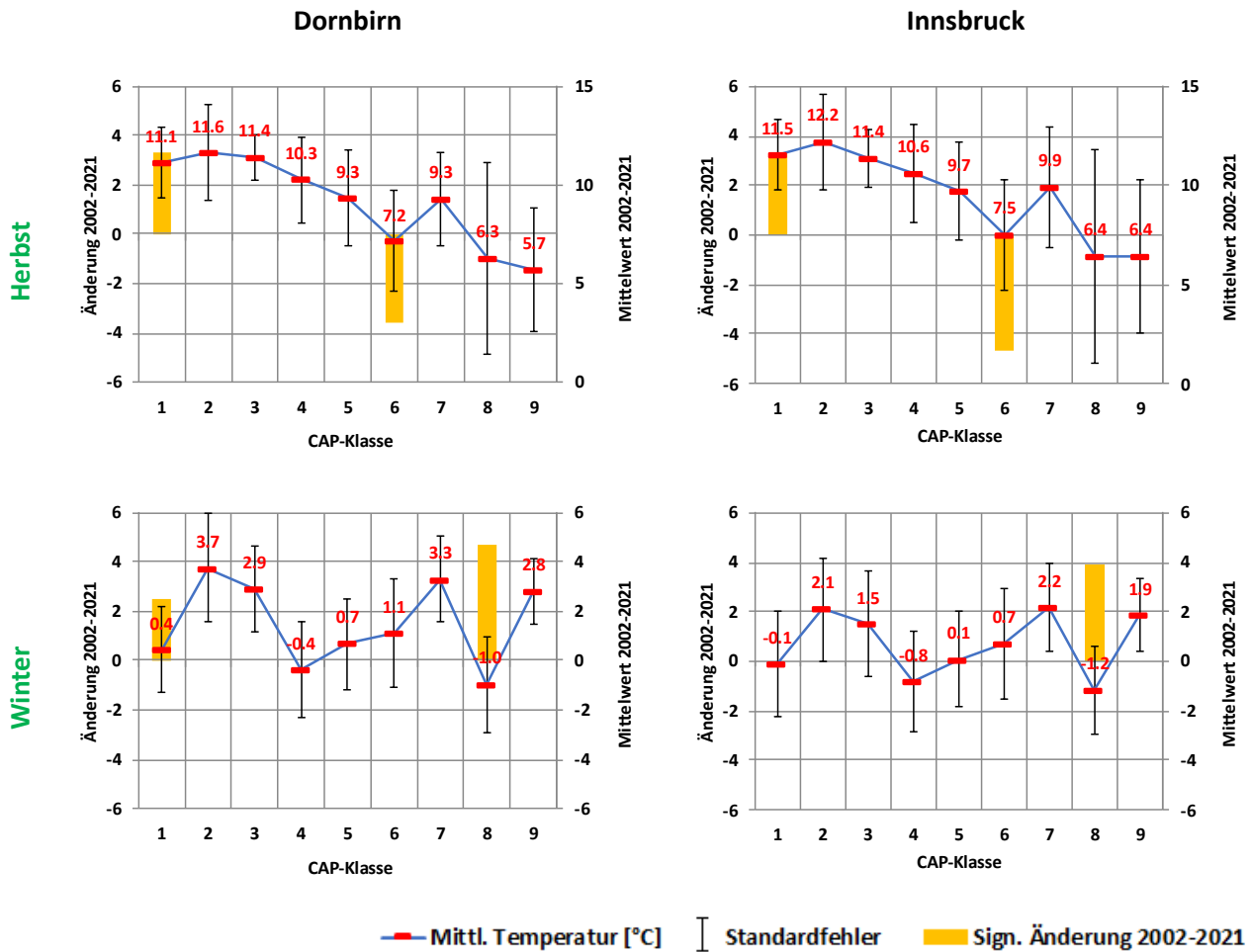


Abbildung 4.22: Temperatur: Änderung, Mittelwerte und Streubereich je CAP9-Klasse, Herbst und Winter 2002-2021. Erklärung zur Darstellung s. Kap. 3.1.

Im Herbst zeigt sich an beiden Standorten eine signifikante Abnahme der Temperatur bei CAP-Klasse 6, eine signifikante Zunahme bei CAP-Klasse 1. Im Winter findet sich eine signifikante Zunahme bei CAP-Klasse 8, die sich auch im Gesamtjahr zeigt.

Übers ganze Jahr gesehen zeigen die CAP-Klassen 5 und 8 (Hoch über den Alpen bzw. über Mitteleuropa) überdurchschnittliche Erwärmungen. Ihr mit der Häufigkeit gewichteter Anteil an der gesamten Erwärmung von 0.8-0.9 °C von 2002-2021 beträgt 0.5-0.6 °C. Die übrigen etwa 0.3 °C kommen von den übrigen 7 CAP-Klassen her, wobei diese Erwärmung in den Fluktuationen von Jahr zu Jahr statistisch untergeht.

Im Weiteren wurde der **Niederschlag bei Dornbirn ARA** in Abhängigkeit der CAP-Klasse untersucht. Zunächst lohnt sich ein Blick auf den Jahresverlauf des Niederschlags für das ganze Jahr bzw. die Vegetationsperiode von März-August für 2001-

2021 (Abbildung 4.22 oben). Es wird dabei der mittlere tägliche Niederschlag in mm gezeigt. Die beiden trockenen Jahre 2003 und 2018 stechen heraus, vor allem während der Vegetationsperiode, aber auch für das ganze Jahr. Normalerweise fällt deutlich mehr als die Hälfte des Jahresniederschlags während der 6 Monate der Vegetationsperiode. Die Ausreißer am Anfang und Ende der Untersuchungsperiode bestimmen den Trend über die 20 Jahre, der nur für diese 20 Jahre gilt (leicht zunehmend).

Niederschlag je CAP9-Klasse Dornbirn

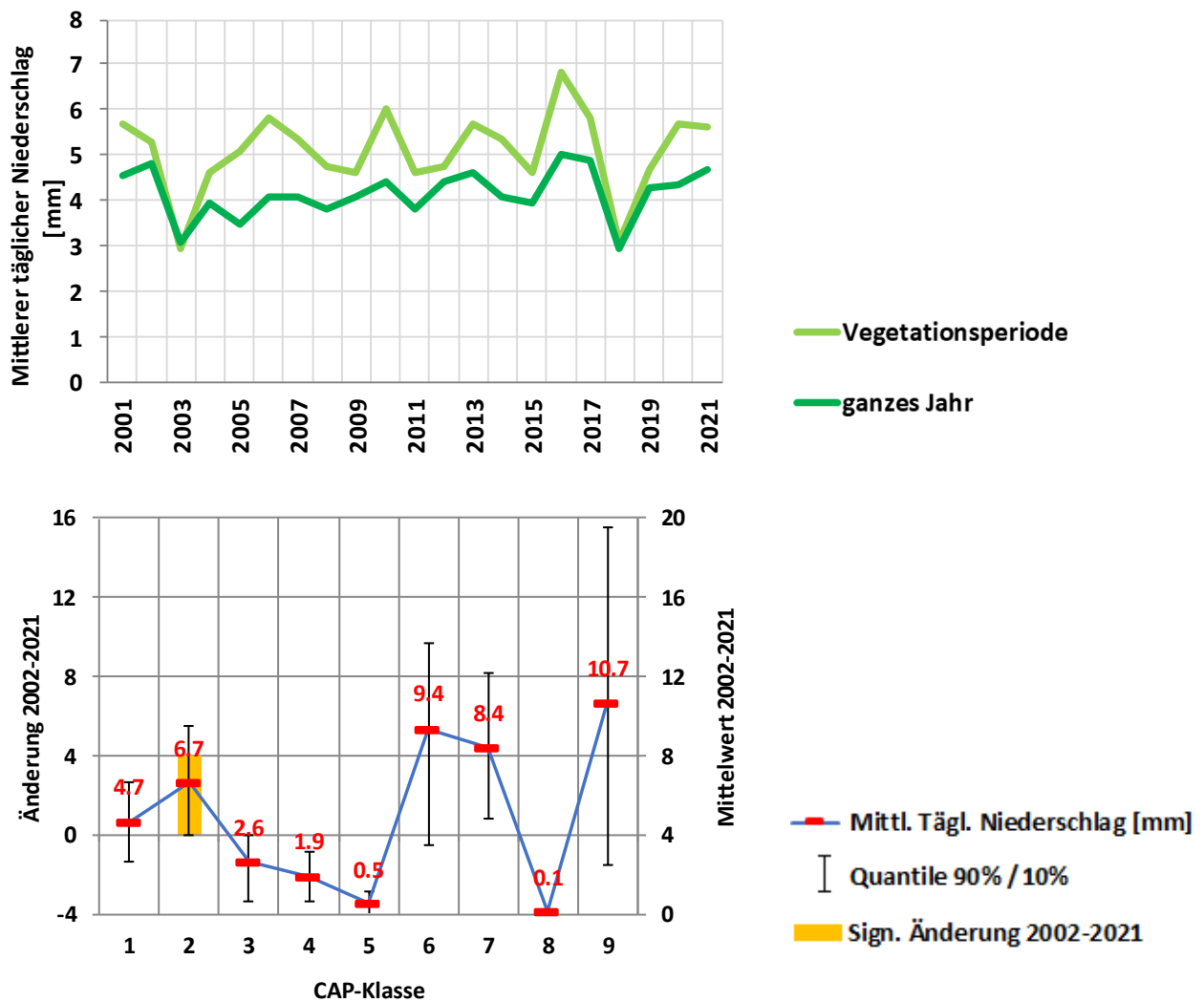


Abbildung 4.23: Mittlerer täglicher Niederschlag pro Jahr: Jahresverlauf für ganzes Jahr und Vegetationsperiode (März-August) 2001-2021 (oben); Änderung, Mittelwerte und Streubereich je CAP9-Klasse, 2002-2021 (unten). Erklärung zur Darstellung unten s. Kap. 3.1.

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.

5. Vergleich des täglichen Ozonmaximums O₃max bei Nordkette und Angerberg

Die beiden Ozonstationen Nordkette (1958 m ü.M.) und Angerberg (602 m ü.M.) liegen an der gegen S-SE exponierten Talflanke des Tiroler Inntals. Währenddem Angerberg etwa 90 m oberhalb des Talbodens liegt, sind es bei der Nordkette rund 1350 m. Hier werden die mittleren täglichen Ozonmaxima je Jahreszeit und CAP-Klasse dargestellt.

O₃max je Jahreszeit

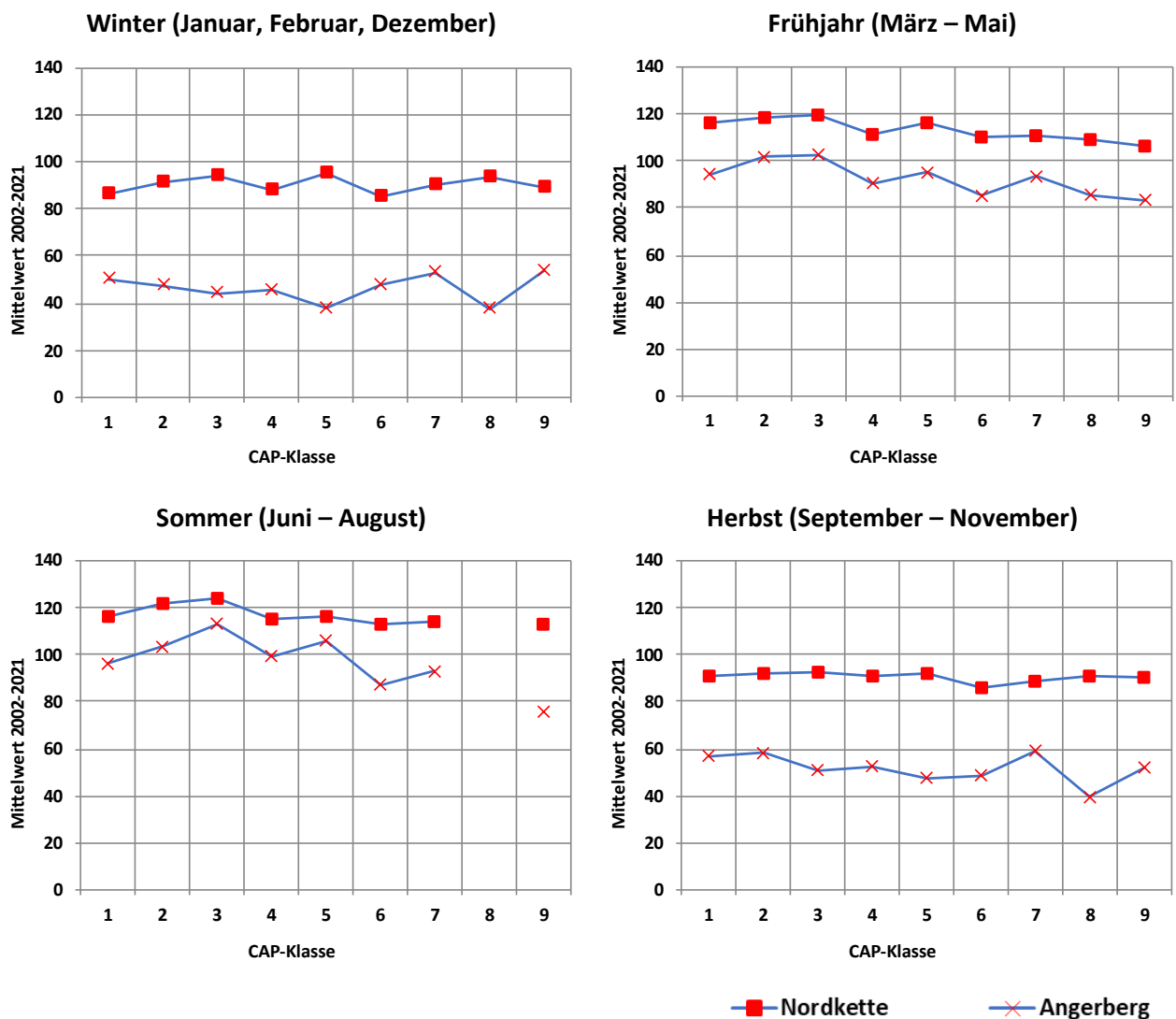


Abbildung 5.1: Mittleres tägliches Ozonmaximum (O₃max) je CAP9-Klasse bei Nordkette und Angerberg, 2002-2021.

Frühjahr und Sommer zeigen ein ähnliches Bild, so wie auch Herbst und Winter. Im Herbst und Winter sind die Unterschiede zwischen den Stationen am größten,

weil dann nur wenig Ozon in den unteren Luftschichten produziert wird. Bei Hochdrucklagen (Klassen 5 und 8) sind die Unterschiede wegen der dann häufigen Inversionen besonders groß.

Im Sommer sind die täglichen Ozonspitzen bei Angerberg denjenigen an der Nordkette am nächsten, besonders bei den CAP-Klassen 3 (nördliche Westlage) und 5 (Hoch über den Alpen). Die CAP-Klasse 3, Spitzenreiter beim Ozon im Frühjahr und Sommer, ist im Sommer auch die wärmste (s. Abbildung 4.21); überhaupt zeigen Temperatur und Ozonmaxima nach CAP-Klasse im Sommer einen recht ähnlichen Verlauf.

6. Anstieg der Inversionshäufigkeit 2014-2021 im Sommer

Von 2014-2021 wurde allgemein ein leichter Anstieg der Inversionshäufigkeit im Sommer beobachtet, nachdem in den Jahren zuvor die Inversionshäufigkeit insgesamt eher abgenommen hatte, vor allem im Winter. Es stellte sich die Frage, ob diese Zunahme der sommerlichen Inversionshäufigkeit mit einer Bewölkungsabnahme einhergehen würde, denn ein klarerer Himmel führt nachts zu mehr Abstrahlung und damit zu einer verstärkten Möglichkeit einer Inversionsbildung.

Zunächst wird der Verlauf der Bewölkung bei der MeteoSchweiz-Station Zürich-Fluntern über den gesamten Zeitraum 2002-2021 untersucht.

6.1. Bewölkung bei Zürich-Fluntern und Wetterlagen

Insgesamt weist die Bewölkung in Zürich/Fluntern von 2002-2021 keinen Trend auf. Auf die 9 CAP-Klassen heruntergebrochen zeigt sich eine signifikante Abnahme um -7% bei der CAP-Klasse 5 (H Alpen) (weniger Nebel?) und eine signifikante Zunahme von 8% bei CAP-Klasse 6 (Zykl. N). Die Streuungen innerhalb der CAP-Klassen sind verhältnismässig gering.

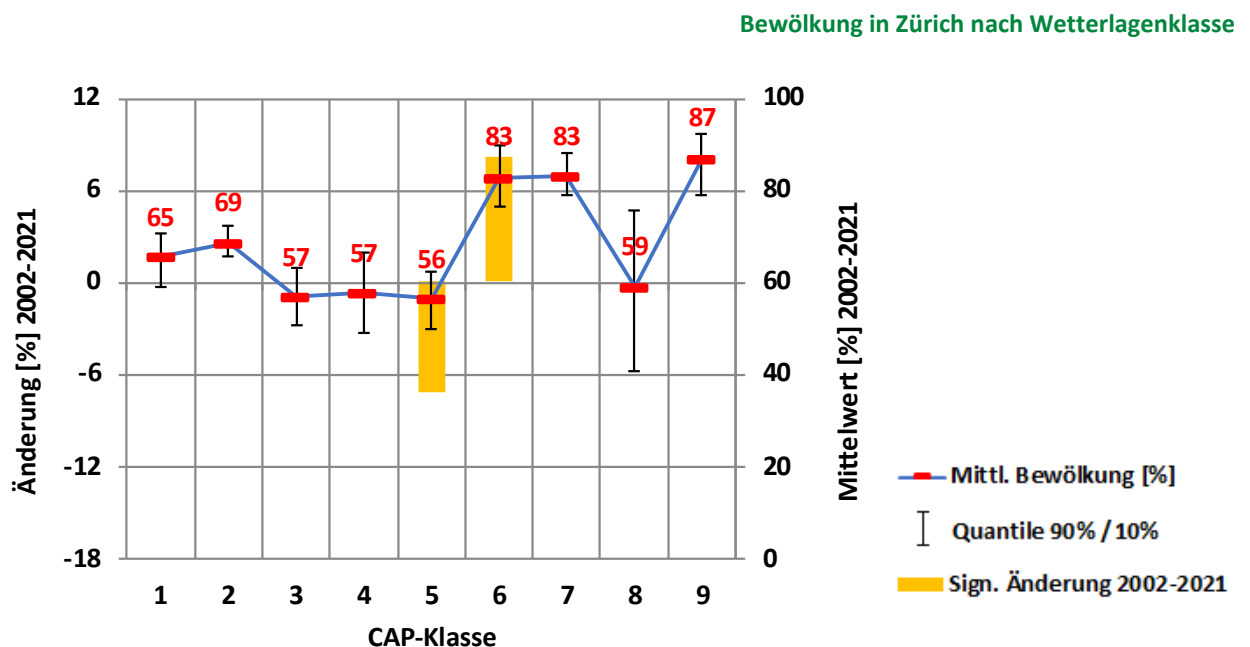


Abbildung 6.1: Bewölkung [%] in Zürich nach CAP9-Klasse, Gesamtjahr 2002-2021.

Auch je Jahreszeit betrachtet zeigen sich keine grossen Änderungen; vor allem im Winter und im Sommer hat sich die mittlere Bewölkung je CAP-Klasse in den letzten 20 Jahren nicht geändert. Im Frühjahr und Herbst haben sich drei signifikante Änderungen eingestellt, wobei zu beachten ist, dass die CAP-Klasse 8 (H M-Europa) im Frühjahr, welche eine grosse Bewölkungsänderung aufweist, nur zu knapp 3% der Zeit vorkommt.

Bewölkung in Zürich nach Wetterlagenklasse

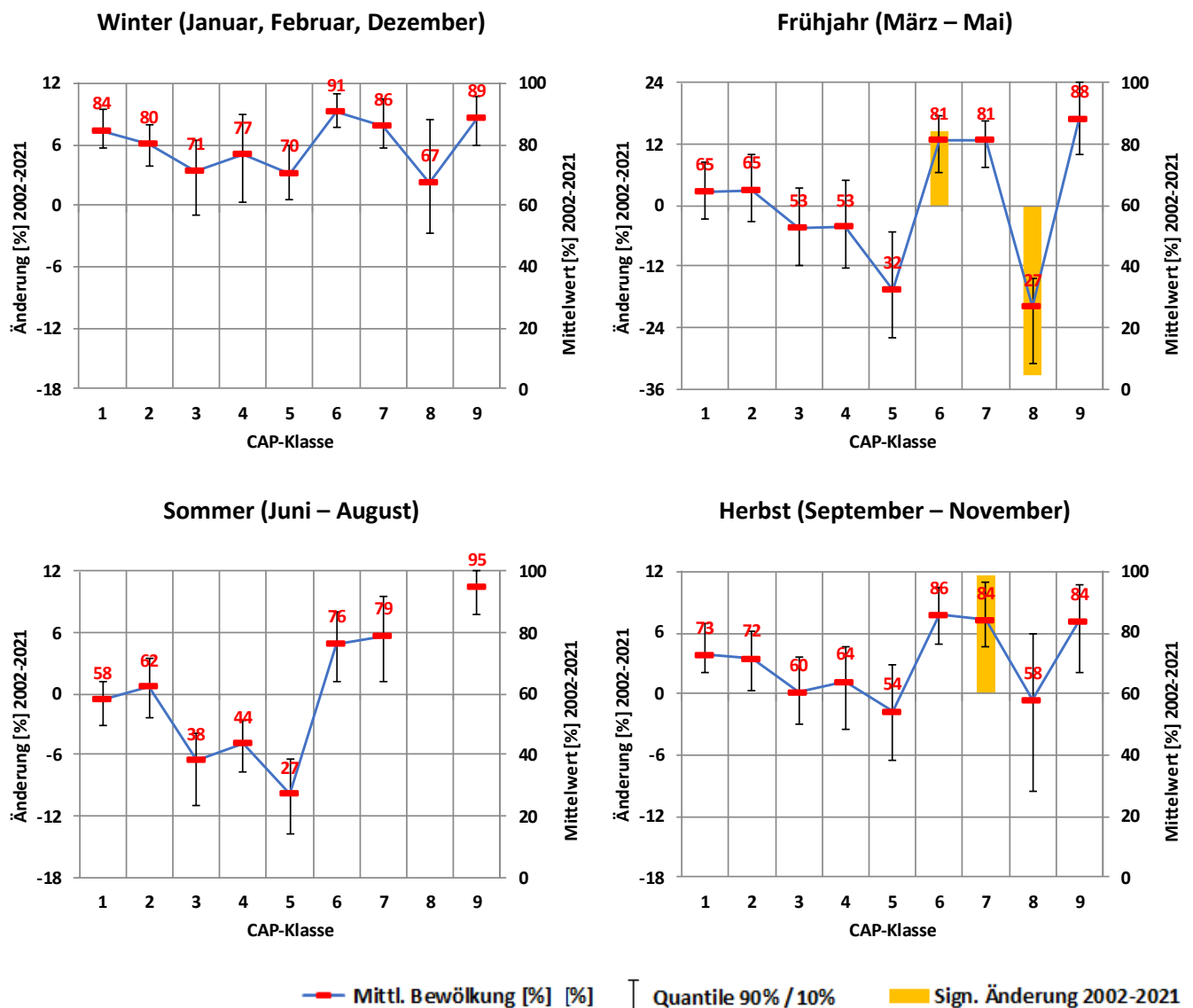


Abbildung 6.2: Bewölkung [%] in Zürich nach CAP9-Klasse, Jahreszeiten 2002-2021.

Insgesamt befinden wir uns in den letzten 20 Jahren nicht in einer Phase mit signifikanten Trends in der Bewölkung. Nun wird der Zeitraum 2014-2021 bzgl. Sommer und Inversionen genauer angeschaut.

6.2. Inversionshäufigkeit 2014-2021 im Sommer am Beispiel Erstfeld

Die linke Grafik unten zeigt eine fluktuierende Inversionshäufigkeit im Sommer bei Erstfeld, die insgesamt eine Zunahme aufweist (Anstieg der Regressionsgeraden). Die Bewölkung im gleichen Zeitraum zeigt keinen Trend. "Dennoch" sieht man in der rechten Grafik unten, dass die Inversionshäufigkeit in den Sommern 2014-2021 von der Bewölkung abhängt: Etwa 50% der Variabilität der Inversionshäufigkeit lassen sich durch die variable Bewölkung erklären (r^2). In der linken Grafik sieht man auch deutlich die entgegen gesetzten Zacken im 2015 und 2018.

Der Umkehrschluss wäre aber falsch: Weil die Inversionshäufigkeit zugenommen hat und weniger Bewölkung zu mehr Inversionen führt, habe die Bewölkung abgenommen. Denn die Bewölkung ist im Mittel konstant geblieben. Für den Trend in der Inversionshäufigkeit müssen andere Variablen zuständig sein, welche in den anderen 50% der Variabilität stecken.

Inversionshäufigkeit im Sommer bei Erstfeld und Bewölkung in Zürich, 2014-2021

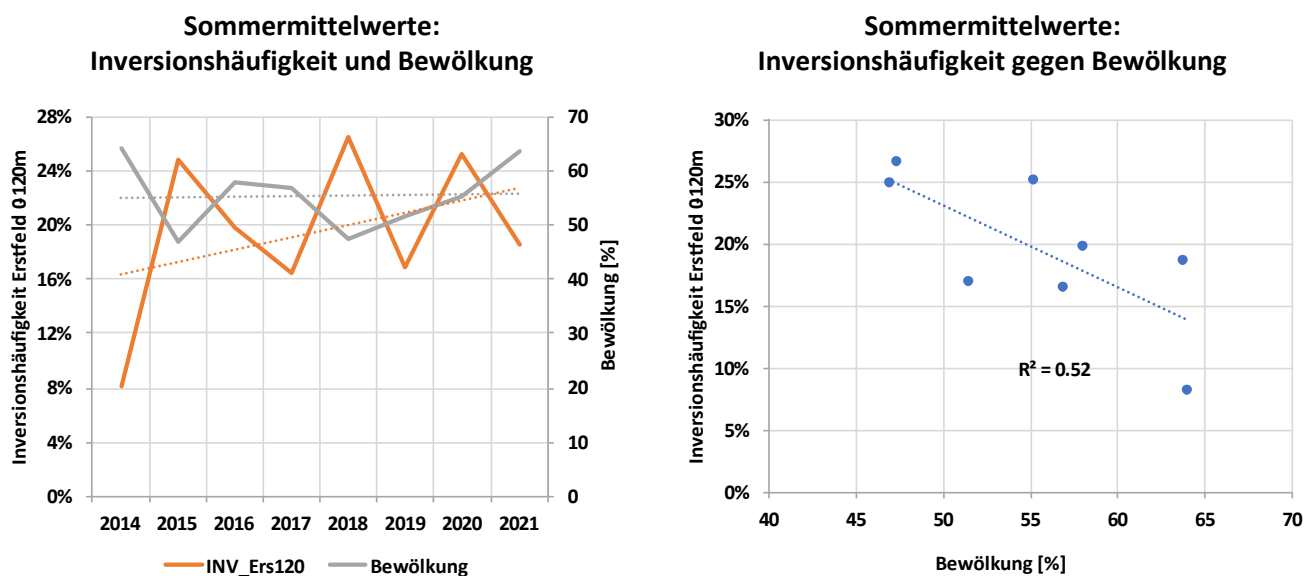


Abbildung 6.3: Inversionshäufigkeit im Sommer bei Erstfeld und Bewölkung in Zürich, 2014-2021. Links: Zeitreihe der Sommermittelwerte. Rechts: Plot der beiden Variablen gegeneinander.

Aufschlussreich ist auch der Plot der Tagesmittelwerte von Inversionshäufigkeit und Bewölkung 2014 und 2020. Zwar hat es im Sommer 2020 mehr gering bewölkte Tage mit höherer Inversionshäufigkeit. Aber auch bei einer *bestimmten* Bewölkung gibt es im 2020 mehr Tage mit erhöhter Inversionshäufigkeit als im 2014, für diese Erhöhung gibt es andere Gründe als die Bewölkung selbst.

Tagesmittelwerte: Inversionshäufigkeit gegen Bewölkung

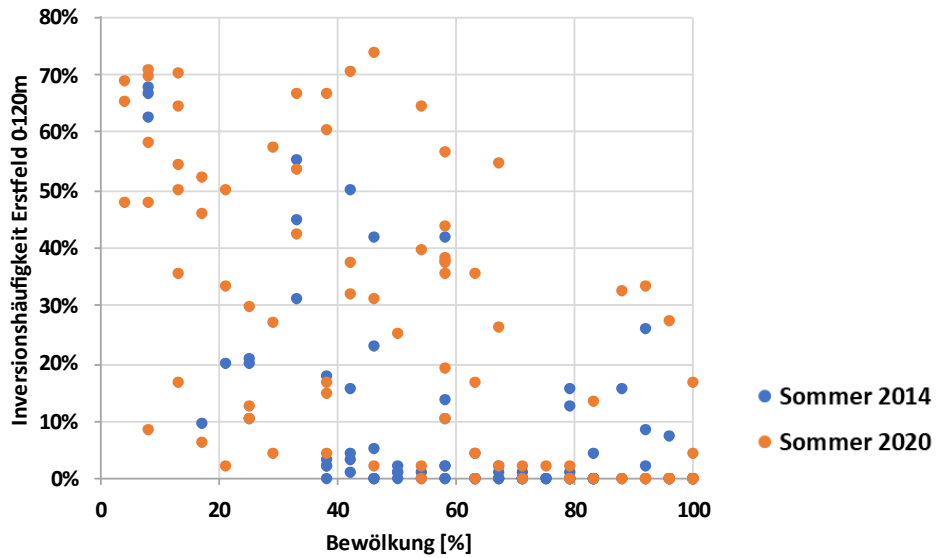


Abbildung 6.4: Tagesmittelwerte im Sommer 2014 und 2020: Inversionshäufigkeit bei Erstfeld gegen Bewölkung in Zürich.

Die Zunahme in der Inversionshäufigkeit im Sommer 2020 gegenüber 2014 stellte sich am Abend und in der Nacht ein.

Inversionshäufigkeit im Tagesgang, Sommer, Erstfeld 0-500m

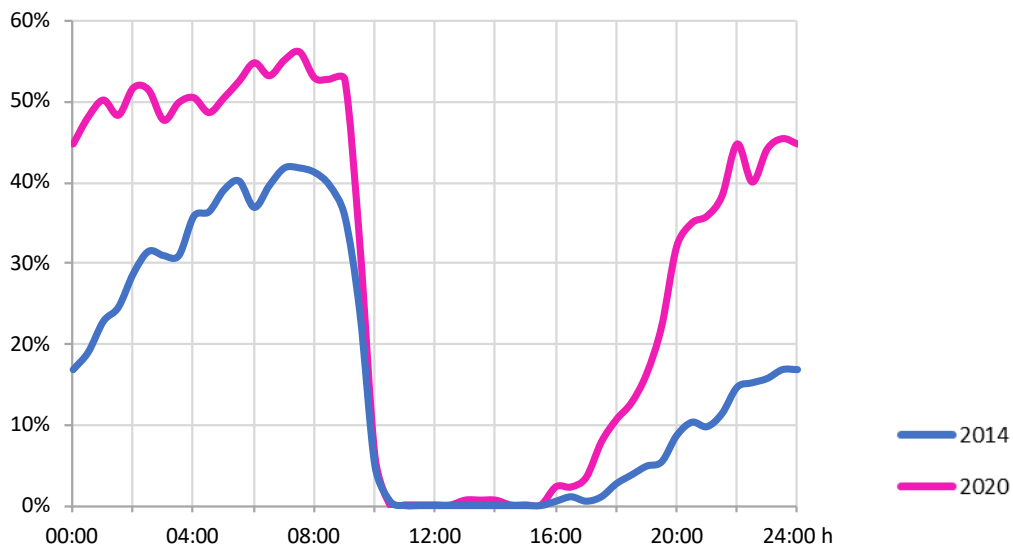


Abbildung 6.5: Inversionshäufigkeit im Tagesgang, Sommer 2014 und 2020, Erstfeld 0-500m.

7. Vergleich zwischen CAP18- und CAP9-Wetterlagenklassifikation

In dieser Studie wurde die CAP9-Klassifikation verwendet. Es hatte sich herausgestellt, dass die CAP18-Klassifizierung nicht Unterklassen von CAP9 enthält (welche man allenfalls teilweise hätte verwenden können), sondern eine eigenständige Klassifizierung ist, deren Klassen jeweils aus mehreren CAP9-Klassen stammen. Damit aber hätte die CAP18-Klassifizierung kaum noch signifikante Änderungen über die betrachteten 20 Jahre zeigen können; somit wurde die CAP9-Klassifizierung verwendet.

Im Folgenden werden die CAP18-Klassen charakterisiert:

Tabelle 7.1: Beschreibung der CAP18-Klassen. Quelle: "Description of (new) Weather Types used at MeteoSwiss", MeteoSchweiz, 2011.

CAP 18	Beschreibung
1	Indifferente West-Nordwestlage, strömungsschwach
2	Antizyklonale West-Nordwestlage, strömungsschwach
3	Indifferente Ostlage
4	Zyklonale West-Südwestlage, strömungsschwach
5	Antizyklonale Südlage
6	Indifferente Südostlage
7	Zyklonale Südlage, strömungsschwach
8	Zyklonale Nordwestlage
9	Zyklonale Nordostlage
10	Hoch über den Alpen
11	Zyklonale Westlage
12	Antizyklonale Ost-Südostlage
13	Zyklonale Ostlage
14	Zyklonale West-Südwestlage
15	Nördliche Westlage
16	Tief über den Alpen
17	Hoch über dem östlichen Mitteleuropa
18	Südliche zyklonale Westlage

Die folgende Abbildung zeigt die prozentuale Zusammensetzung der einzelnen CAP9-Klassen aus Klassen von CAP18. Eine CAP9-Klasse setzt sich aus mindestens drei und bis zu acht CAP18-Klassen zusammen. Und bis auf CAP18-Klasse 17 und 18 kommen alle CAP18-Klassen in mehreren CAP9-Klassen vor.

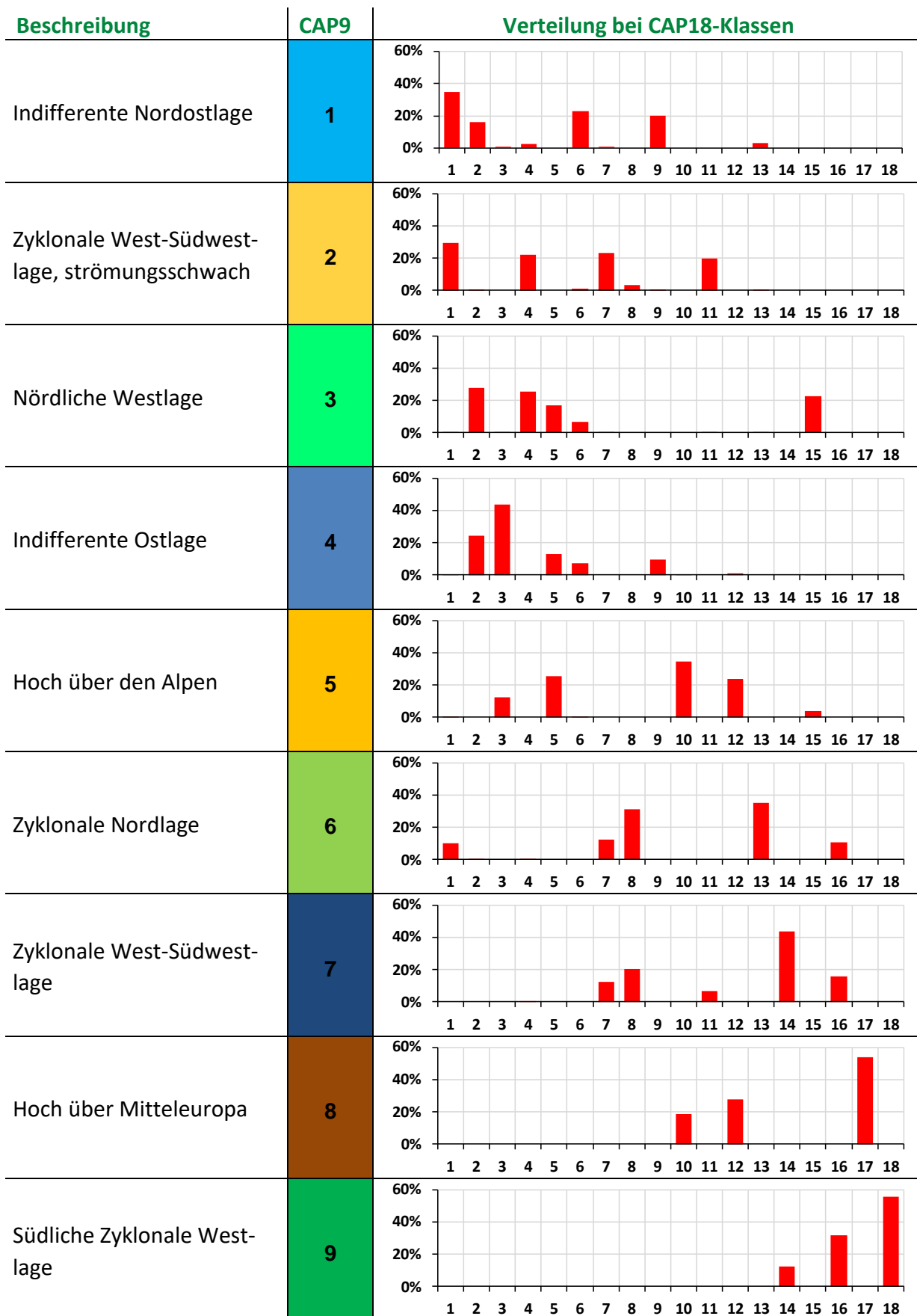


Abbildung 7.1: Prozentuale Zusammensetzung der einzelnen CAP9-Klassen aus Klassen von CAP18.

8. Zusammenfassung

Ausgangspunkt dieses Projektes ist der Bericht "Zur Entwicklung der Häufigkeit atmosphärischer Inversionen im Alpenraum 1997 – 2021", Oekoscience, Januar 2023. Der Einfluss von Wetterlagen auf Inversionen und Immissionen wurde in den beiden österreichischen Bundesländern Vorarlberg und Tirol sowie in den beiden Kantonen Uri und Graubünden untersucht. Der Untersuchungszeitraum beläuft sich auf 2002-2021.

Daten

Es wurden Inversionen an den fünf verschiedenen Orten Dornbirn (Vorarlberg), Erstfeld (Uri), Rothenbrunnen und San Vittore (Graubünden) sowie Innsbruck (Tirol) anhand dort installierter Temperaturprofile untersucht, im Fall von Erstfeld und Innsbruck für zwei verschiedene Luftschichten. Diesen Profilen wurden Immissionsmessstationen aus der Region zugeordnet. Die untersuchten Immissionen waren NO_x, PM₁₀ und tägliches Ozonmaximum. Im Weiteren wurde die Wetterlagenabhängigkeit von Temperatur und Niederschlag bei Dornbirn und Innsbruck untersucht.

Trends Inversionen

Bis ins Jahr 2014 zeigte sich ein deutlicher Trend zu abnehmenden Inversionshäufigkeiten in praktisch allen Profilen (bodennah und hochreichend). Nachfolgend ergab sich eine Stabilisierung und ein leichter Wiederanstieg, vor allem im Sommer, der bislang im 2020 kumulierte.

Wetterlagenklassifikation

Es wurde die CAP-Klassifizierung ("Cluster Analysis of Principal Component") 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. Die Temperaturverteilungen nach CAP-Klasse ähneln sich an den beiden Standorten sehr; lokale Temperatureffekte scheinen da nur eine untergeordnete Rolle zu spielen.

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 $\tau = I_{\text{NOx}} [\text{strassennahe Station}] / E_{\text{NOx}} [\text{Strasse}]$ 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.

CAP9 und CAP18

In dieser Studie wurde die CAP9-Klassifikation verwendet. Es hatte sich herausgestellt, dass die CAP18-Klassifizierung nicht Unterklassen von CAP9 enthält (welche man allenfalls teilweise hätte verwenden können), sondern eine eigenständige Klassifizierung ist, deren Klassen jeweils aus mehreren CAP9-Klassen stammen. Damit aber hätte die CAP18-Klassifizierung kaum noch signifikante Änderungen über die betrachteten 20 Jahre zeigen können; somit wurde die CAP9-Klassifizierung verwendet.