

Vertiefende Analysen des erweiterten Innsbrucker Hangprofiles

Basierend auf der Periode 1999 – 2020

Durchführung
Kundenservice Tirol und Vorarlberg

Erstellt von
Dr. Johannes Vergeiner und
Dr. Susanne Drechsel

Innsbruck, 20. Jänner 2021

www.zamg.at

6020 Innsbruck
Fürstenweg 180
Tel.: +43 (0) 512 / 28 55 98 DW 3529
Fax: +43 (0) 512 / 28 56 26
E-Mail: innsbruck@zamg.ac.at

Inhaltsverzeichnis

1	Trends in der Inversionshäufigkeit	4
2	Zeitlicher Verlauf der Inversionen.....	6
3	Der Stadteffekt auf die Temperatur.....	12
4	Der Stadteffekt auf den Wind.....	16
5	Appendix.....	19
5.1	Trendplots der Inversionshäufigkeit	19
5.1.1	Inversionshäufigkeiten im Jahr und in der Inversionsperiode Oktober bis Februar	19
5.1.2	Inversionshäufigkeiten in den Jahreszeiten	25
5.2	Jährliche Zeitreihenplots.....	35

1 Trends in der Inversionshäufigkeit

Im diesjährigen Entwicklungsprojekt werden die Trendanalysen nicht mehr wie zuletzt auf die mittlere Stabilität einer Schicht (in K/100 m) angewendet, sondern auf die hinsichtlich von Schadstoffkonzentrationen interessanteren Inversionshäufigkeiten. Neben einer ganzjährigen, monatlichen und saisonalen Betrachtung wurde auch die „Inversionssaison“ von Oktober bis Februar ausgewertet.

Untersucht wurden die Schichten Flughafen – Hungerburg (FLH-HBG), Hungerburg – Rastlboden (HBG-RAB) und Rastlboden – Patscherkofel (RAB-PAK), sowie alle Schichten von der Talstation FLH aus. Dass die bodennahe Schicht durch FLH – HBG repräsentiert wird, hat sich bewährt.

Die Datengrundlage der Trendanalyse basiert auf der Periode Jänner 1999 bis Februar 2020. Neben dem Gesamttrend der Periode 1999 bis 2019 (bzw. 99/00 bis 19/20) wurde ein kürzerer Trend bis zum Endjahr 2015 (bzw. 15/16) gerechnet. Aus dem Unterschied der beiden Trends kann ersehen werden, inwiefern das neue, seit 2016 bestehende Hangprofil systematisch andere Inversionshäufigkeiten liefert als das alte. Die Abbildungen gibt es für absolute Inversionshäufigkeiten und als Abweichungen vom Mittel. Die Trendergebnisse sind natürlich unabhängig von der absoluten oder relativen Betrachtung. Die wichtigsten Abweichungsplots sind im Anhang unter Punkt 1 dargestellt. Unter 1.1 werden die Jahrestrends und jene für die Inversionssaison gezeigt, unter 1.2 jene für die vier Jahreszeiten. Die Zusammenstellung der Trendwerte findet sich in den beiden unten stehenden Tabellen 1 und 2.

In Tabelle 1 werden Ergebnisse für die drei oben genannten Schichten sowie die ganze Talatmosphäre gezeigt. Generell ist zu sagen, dass hier alle Trends nicht signifikant¹ sind. Weiters ist anzumerken, dass die Trendwerte in Relation zu den mittleren Inversionshäufigkeiten (in Spalte 3) zu sehen sind². Betrachtet man die gesamte Talatmosphäre, so gibt es im Jahr und in der Inversions-Saison Okt – Feb eine leichte (nicht signifikante) Abnahme an Inversionen. Je näher am Boden, desto größer ist das Potential der Veränderung. In der Schicht Flughafen - Hungerburg werden durchwegs negative Trends für die Reihe 1999 – 2019 ausgegeben. Dies relativiert sich jedoch, wenn man nur die alte Tempis-Reihe bis zum Endjahr 2015 analysiert. Über das Jahr ist gar kein Trend vorhanden, in der Inversionssaison gerade einmal -0,06 % pro Jahr.

¹ Auf dem 5 % Niveau

² Die Einheit Prozent pro Jahr (%/a) könnte dazu verleiten, in den Trendwerten eine relative Änderung zu sehen. Es sind aber absolute Änderungen der prozentuellen Inversionshäufigkeit.

Schicht	Schichtdicke (m)	Inv.häufigkeit 1999-2019 (%)	# Jahre mit Datenverf. > 80 %	Trend 1999 - 2015 (%/a)						Trend 1999 - 2019 (%/a)					
				MAM	JJA	SON	DJF	Jahr	Okt - Feb	MAM	JJA	SON	DJF	Jahr	Okt - Feb
FLH-HBG	340	28,0	17	0,04	0,00	0,17	n.a.	0,00	-0,06	-0,17	-0,29	-0,21	-0,24	-0,25	-0,17
HBG-RAB	320	13,5	16	n.a.	0,07	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	-0,11	0,02	n.a.	n.a.	-0,03	-0,14
RAB-PAK	1010	0,9	15	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	0,01	0,00	n.a.	0,02	n.a.	0,02
FLH-PAK	1670	5,5	21	0,04	0,00	0,09	-0,21	-0,02	-0,03	0,02	0,00	-0,11	0,02	-0,05	-0,03

Tabelle 1: Trends der Inversionshäufigkeiten in aufeinanderfolgenden Schichten sowie in der gesamten Talatmosphäre. Signifikante Trends sind in fett gedruckt. Die zu Grunde gelegte Datenreihe reicht bis Februar 2020, die letzten 2 Monate fließen in die Berechnung des Winterwertes 2019 und jenes für Okt. – Feb. 2019/20 ein.

Die Trends von der Basisstation Flughafen zu allen höher gelegenen Standorten werden in Tabelle 2 gezeigt. Bis zum Olympischen Dorf (ODO) und dem Alpenzoo (ALP) ist die Schichtdicke sicherlich zu gering für eine sinnvolle Auswertung, hinzu kommen der Stadteffekt und gerade beim ALP eine zeitweise schlecht gewartete Station. Abgesehen von diesen beiden Stationen sieht man wenig Trend in der Entwicklung bis 2015 und tendenziell abnehmende Häufigkeiten (größtenteils aber nicht signifikant) für die Gesamtperiode. Die neuen Stationen Hungerburg und Rastlboden scheinen seit 2016 besser belüftet zu sein und damit weniger zu Überhitzung zu neigen.

Schicht	Schichtdicke (m)	Inv.häufigkeit 1999-2019 (%)	# Jahre mit Datenverf. > 80 %	Trend 1999 - 2015 (%/a)						Trend 1999 - 2019 (%/a)					
				MAM	JJA	SON	DJF	Jahr	Okt - Feb	MAM	JJA	SON	DJF	Jahr	Okt - Feb
FLH-ODO	55	55,8	17	0,11	n.a.	0,11	-0,58	0,04	-0,44	-0,18	0,40	-0,09	-0,65	-0,12	-0,51
FLH-ALP	90	52,6	19	1,47	1,48	n.a.	0,15	1,15	0,43	0,66	1,23	0,42	-0,09	0,61	-0,02
FLH-HBG	340	28,0	17	0,04	0,00	0,17	n.a.	0,00	-0,06	-0,17	-0,29	-0,21	-0,24	-0,25	-0,17
FLH-RAB	660	22,7	16	n.a.	0,08	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	-0,13	-0,16	n.a.	-0,17	-0,09	-0,11
FLH-SEE	1340	10,8	6	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
FLH-PAK	1670	5,5	21	0,04	0,00	0,09	-0,21	-0,02	-0,03	0,02	0,00	-0,11	0,02	-0,05	-0,03
FLH-HAK	1700	5,2	3	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.

Tabelle 2: Trends der Inversionshäufigkeiten von der Basisstation Flughafen. Signifikante Trends sind in fett gedruckt, positive Trends rot, negative Trends blau. Die zu Grunde gelegte Datenreihe reicht bis Februar 2020, die letzten 2 Monate fließen in die Berechnung des Winterwertes 2019 und jenes für Okt. – Feb. 2019/20 ein.

2 Zeitlicher Verlauf der Inversionen

Abbildung 1 zeigt zusammenfassend die mittlere Inversionshäufigkeit und –stärke als Funktion der Tageszeit in den drei Schichten FLH – HBG (Schichtdicke $dH = 340$ m), HBG – RAB ($dH = 320$ m) und RAB – PAK ($dH = 1010$ m) für die Periode 1999 bis 2020. Die Monate sind von oben Juli bis unten Juni angeordnet. Die Inversionsstärke wird zu den Zeiten, an denen eine Inversion vorhanden ist, gebildet.

Aus der Abbildung sind die folgenden Charakteristika von Inversionen im Inntal rund um Innsbruck ablesbar:

- Sowohl die Inversionshäufigkeit als auch deren Stärke nehmen im Mittel von oben nach unten deutlich zu.
- Inversionshäufigkeit und –stärke sind korreliert. D. h. Zeiten, in denen die meisten Inversionen auftreten sind im Mittel auch jene, in denen diese am stärksten ausgeprägt sind und umgekehrt. Wenn Inversionen sehr selten sind, ist die Bestimmung der zugehörigen Inversionsstärke wenig überraschend anfälliger für Ausreißer.
- Jahreszeitlich sind Inversionen in den Monaten November, Dezember und Jänner am häufigsten und stärksten. Der Zusammenhang mit der Besonnung ist augenscheinlich, Monate mit vergleichbarem Sonnenstand zeigen auch eine ähnliche mittlere tageszeitliche Inversionsverteilung, zum Beispiel Oktober bis Februar, September bis März.
- Auch die tageszeitliche Verteilung von Inversionshäufigkeit und –stärke hängt klar mit der Tageslänge zusammen. Das Minimum an Inversionen tritt am frühen Nachmittag auf, da die Luft in Nähe des Talbodens stärker erwärmt wird als jene in höheren Schichten. Diese etwa 2-stündige Verschiebung gegenüber dem Sonnenhöchststand spiegelt die Verzögerung bei der Erwärmung wider.

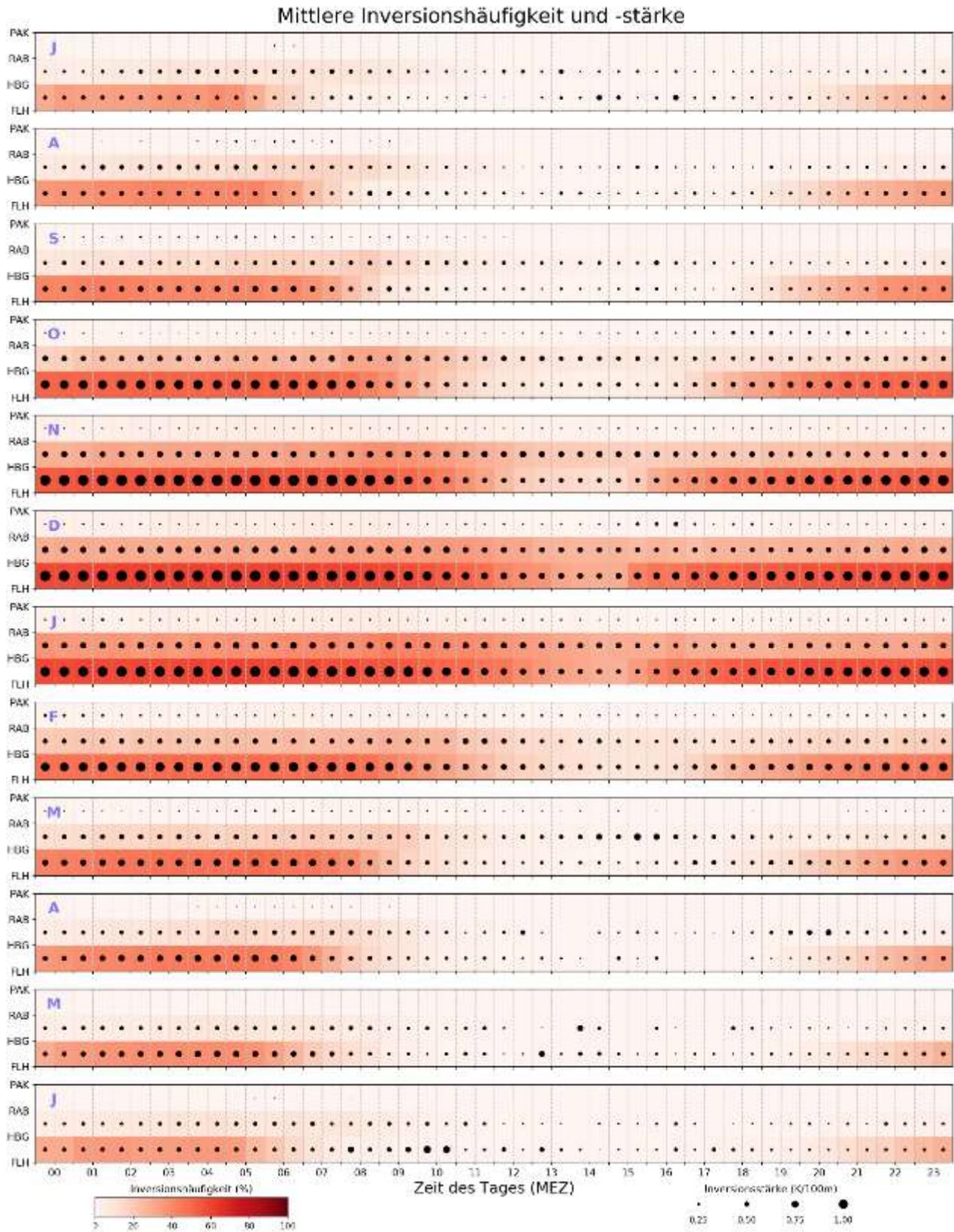


Abbildung 1: Monatliche mittlere Inversionshäufigkeit und – stärke als Funktion der Zeit des Tages und in halbstündlicher Auflösung in den drei Schichten Flughafen-Hungerburg, Hungerburg – Rastlboden und Rastlboden – Patscherkofel für die Periode 1999 bis 2020 von Juli (ganz oben) bis Juni (ganz unten).

Für die Erfassung des vollständigen zeitlichen Verlaufes der Inversionen wurden Zeitreihenplots erstellt. Analysiert werden wiederum die drei Schichten FLH – HBG (dH = 340 m), HBG – RAS (dH = 320 m) und RAS – PAK (dH = 1010 m), die Periode umfasst den Zeitraum Jänner 1999 bis Dezember 2020.

Die Abbildungen gibt es in zwei Varianten: einmal Grafiken für jedes Jahr mit zwölf Subplots für die Monate von Jänner bis Dezember, und zum anderen Grafiken für die Monate mit Subplots für die Jahre von 1999 bis 2020. In der ersten Variante wurden auch Föhnzeiten im Wipptal markiert. Diese beruhen auf Föhnwahrscheinlichkeiten anhand von Messungen am Sattelberg und in Ellbögen, Föhn wurde ab einer Wahrscheinlichkeit von 50 % angenommen. Bis 2018 wurde eine Rekonstruktion anhand von ERA5-Daten von Deborah Morgenstern³ verwendet, die den großen Vorteil hat, dass keine Fehlzeiten vorkommen. Diese Jahresgrafiken sind im Anhang zu finden.

Die Inversionsstärke wird über die Farbkodierung in Schritten von 0,5 K/100 m ausgedrückt, Fehlzeiten werden über einen grauen Balken sichtbar gemacht.

Die Betrachtung des zeitlichen Verlaufes ist sehr aufschlussreich. Sie verbindet Informationen zur Dauer, Stärke und Schichtdicke der Inversionen, und zwar für jede einzelne Periode. Gleichzeitig erkennt man auch die witterungsabhängige Abfolge sowie jahres- und tageszeitliche Typiken. Auch der Einfluss von Föhn im Wipptal kann studiert werden.

Nachfolgend werden einige der wichtigen und augenscheinlichen Erkenntnisse dargelegt, die sich aus dem Studium der Zeitreihenplots im Anhang ergeben. Wo es passend erscheint, wird auch auf die entsprechenden Inversionskategorien in Tabelle 3 verwiesen.

- Die Festlegung der Inversions-Saison auf Oktober – Februar wird als sinnvoll bestätigt. In den Monaten März bis September gibt es kaum länger anhaltende Inversionsperioden, vielmehr sind in diesem Zeitraum Abfolgen von nächtlichen Inversionen (meist in der bodennahen Schicht) mit Aufbrechen der Inversion untertags typisch. Dies erkennt man auch daran, wann bei den ausgesuchten Inversionsperioden in Tabelle 3 hochwinterliche Phasen (HW) und wann eine Tag-Nacht Abfolge (TN) auftritt.
- Inversionslagen zwischen Oktober und Februar enden typischerweise durch synoptischen Einfluss (SE). Manchmal kann auch durchgreifender Föhn (FE) die Inversion bis zum Talboden ausräumen. Im Frühjahr werden nächtliche Inversionen (TN) aufgrund der zunehmenden Erwärmung der Talatmosphäre von Tag zu Tag kürzer und schwächer.
- Die Unterschiede von Jahr-zu-Jahr sind bedeutend, der Einfluss länger (über einige Wochen) anhaltender Witterungslagen ist deutlich zu erkennen. Treten im Hochwinter über einige

³ Die Methodik ist beschrieben in Morgenstern, D., 2020: „Multidecadal Foehn time series reconstruction using machine learning and ERA5 reanalysis data“, Masterarbeit an der Universität Innsbruck, Jänner 2020.

<https://diglib.uibk.ac.at/urn:nbn:at:at-ubi:1-61794>

Tage keine Inversionen (NI) auf, so ist dies in aller Regel mit West- oder Nordwestlagen und Niederschlag und/oder ins Tal durchgreifendem Wind verbunden.

- Meist reichen die Inversionen nicht über den Rastlboden (660 m über Talgrund) hinaus. Auch abgehobene Inversionen (AI) in der Schicht Rastlboden bis Patscherkofel sind selten. Allerdings ist die vertikale Schichtdicke mit gut 1000 m auch groß, eventuell vorhandene dünnere Inversionsschichten bleiben dadurch unerkant.
- Der Föhn im Wipptal (FE) ist im Winter, wenn Inversionen häufig sind, oft nicht imstande, die im Inntal liegende bodennahe Kaltluft auszuräumen. In aller Regel löst er die Inversion aber in der Schicht HBG – RAS auf, die darunter liegende Inversion wird dadurch dann sogar verstärkt.

Nr	Periode	Kategorie/ Abfolge	Anmerkung
1	4.-7.1.1999	HW	Datenausfall am 8.1.
2	15.-27.1.1999	FE, HW, SE	Ende mit Kaltfront und schwachem Niederschlag (1.8mm)
3	8.-16.9.1999	TN	Lang anhaltende Hochdruckphase, gegen Ende kurz Föhn, I-Ende mit Front
4	2.-18.1.2000	HW, SE	Stabiles Hoch (Unterbrechung 9.-11.), zum 18. Warmfront mit stürmischem W-Wind
5	9.-27.8.2000	TN	Sommerliches Hoch, zeitweise Inversionsabschwächung durch Gewitter/Niederschlag
6	1.-9.12.2000	FE	Anhaltende, an Stärke variierende SW-Lage
7	24.-27.12.2000	FE	SW-Lage, in IBK vorföhniger Westwind, nur am 26. kurz Südwind
8	11.-20.10.2001	TN	Recht starke Inversionen nachts, stabiles Hoch, gg. Ende mit FE
9	20.11.2001	AI	Hochdruck von Westen mit Warmluftadvektion in der Höhe
10	1.-20.1.2002	HW	Kurzes Aufbrechen der Inversion am 13./14. durch kleinräumiges Höhentief
11	1.-4.2.2002	FE	Inversion zuerst hochreichender, dann flach und sehr ausgeprägt. Schwache Kaltfront, dann Hoch mit zunehmend Südwestwind
12	10.-23.6.2002	TN	
13	13.-20.8.2002	TN	Nächtliche Inversionen werden von Tag zu Tag länger bei steigendem Temperaturniveau. Dominant ist Warmluftzufuhr in Kammniveau
14	5.-17.1.2006	HW, FE, SE	Ende Föhn am PAK am 18., ca. 3 Uhr, mit Warmfront gefolgt von Kaltfront
15	13.-17.12.2008	FE	Inversion zuerst hochreichender, dann flach und sehr ausgeprägt, am 14. mit Föhn-Durchbruch Inversions-Pause
16	6.-14.1.2009	HW, AI, SE	AI von 7./8., Ende mit Niederschlag
17	28.-29.11.2009	FE	Föhn bricht am 29. durch, Inversion ausgeräumt

18	8.-10.1.2010	AI	Schwacher südöstlicher Höhenwind, kräftiger Temperatur-Anstieg in der Höhe
19	12.-16.1.2010	FE	Drei kurze Föhnphasen (PAK), räumt immer obere Inversion aus, bodennahe bleibt. Am Boden trotz Niederschlag am 14. (nachts) keine Unterbrechung
20	18.-24.12.2010	HW	Meist flache Inversion, aber andauernd und teils sehr ausgeprägt
21	3.-18.1.2011	HW, FE, SE	Einige Tage Föhneinfluss (flache Inversion, stark), Unterbrechung ab 13. durch Frontdurchgang, Ende durch Durchzug von schwachem Störungsausläufer
22	28.1.-18.2.2011	HW, FE	Am Schluss Föhn, Übergang von hochwinterlich durch spürbaren Sonneneinfluss
23	10.+15.10.2011	AI	Warmluftadvektion von Nordwest am 10.10. +15.10.
24	8.11.-3.12.2011	HW, FE	Noch nicht Hochwinter, aber lange stabile Phase, am Schluss Föhn
25	6.-10.1.2012	NI	Fast keine Inversionen durch Abfolge von Fronten
26	20.-28.3.2012	TN	Hochdruck (bis auf Kaltlufttropfen von 24. auf 25.
27	17.-27.10.2012	FE, AI	Am Anfang Föhn und sehr ausgeprägte Inversion (für Okt), abgehobene Inversion von 23.-25., Ende mit Kaltfront aus Norden
28	14.-28.11.2012	HW	Lange stabile herbstliche Phase
29	22.-28.12.2012	FE	Süd am 24./25. und 27., sonst stürmische Westlage mit rascher Abfolge von Systemen
30	10.-17.1.2013	NI	Fast keine Inversionen durch frontale Niederschläge aus Nord und Süd
31	20.-26.9.2013	TN	Inversionen werden mit zunehmendem Hochdruckeinfluss hochreichender und dann mit beginnender Vorderseite wieder seichter
32	12.-19.11.2013	AI, FE	Länger abgehobene Inversion, am Schluss mit Föhneinfluss oben ausgeräumt, dafür bodennahe Inversion
33	7.-24.12.2013	HW, FE	Länger anhaltend, ab 17. Föhneinfluss, Ende mit Föhndurchbruch am 24.12.
34	2.-3.11.2014	FE	Starke Inversion wird durch Föhn ausgeräumt
35	23.10.-20.11.2015	HW, FE, SE	Lange stabile herbstliche Phase, einige Tage mit Föhneinfluss, Ende mit markanter Kaltfront
36	Dez 15	HW	Lange stabile Phase
37	21.1.-3.2.2016	HW	Ende der Inversionslage durch kräftige Kaltfront
38	1.12.16 - 3.1.17	HW	Lange stabile Phase
39	18.1.-6.2.2017	AI, HW, FE, SE	Ende der Inversionslage mit Okklusion aus Nordost (aus Italientief herumgeführt)
40	10.-22.10.2017	TN, SE	Zwei Mal kurze Föhnphasen
41	25.-27.12.2017	FE, SE	Inversion zuerst oben ausgeräumt, unten verstärkt, dann bricht Föhn durch, dann Niederschlag
42	5.-8.1.2018	FE, SE	Inversion zuerst oben ausgeräumt, unten verstärkt, dann bricht Föhn durch.

43	23.1.-1.2.2018	HW, FE, SE	Ende mit Kaltfront eines Tiefs aus der Nordsee nach kurzer Föhnphase
44	14.-18.11.2018	AI	Meist aber nicht immer abgehobene Inversion. Hochdruck mit nordöstlicher Höhenströmung.
45	2.-11.1.2019	NI	Fast keine Inversionen durch anhaltende feuchte Atlantikluft aus Nordwest mit viel Niederschlag/ Schnee.
46	13.-21.2.2019	HW	Ruhige Hochdruckphase, wird zusehends schwächer (Winterende)
47	14.-15.10.2019	FE	Inversion wird zunächst durch Föhn im Wipptal seichter und dann mit Föhndurchbruch ausgeräumt
48	21.-23.11.2019	FE	Inversion wird zunächst durch Föhn im Wipptal seichter und dann mit Föhndurchbruch ausgeräumt, bildet sich in der Nacht auf 24. wieder neu aus
49	3.-9.12.2019	AI,HW, SE	Zuerst Hochdruck, starker Westwind ab 8.12. kann Inversion noch nicht ausräumen (!?), sondern erst frontaler Niederschlag am 9.12.
50	11.-20.12.2019	AI,HW, FE	Ende mit Föhndurchbruch am 20.12.
51	29.12.19-18.1.20	AI,HW, SE	Anfangs abgehobene Inversion, dann länger stabil mit kurzer Unterbrechung (4./5. 1.)

Tabelle 3: Ausgesuchte Inversionsperioden. Die Bedeutung der Kategorien in Spalte 3 ist der Tabelle 4 zu entnehmen, mehrere Nennungen sind als Abfolge in der entsprechenden Periode zu verstehen. Die Anmerkungen beruhen auf der Beschreibung des Inversionsablaufes in den Zeitreihenplots, der Identifizierung von Niederschlag, Temperaturentwicklung und Föhndurchbruch im Inntal anhand von Darstellungen im TAWES-Wizard der Stationen Innsbruck Flughafen und Patscherkofel sowie den Beschreibungen der Wetterlage in den täglichen Prognosen für Tirol.

Kürzel	Beschreibung
HW	Hochwinterliche Inversionslage, länger anhaltend, Hochdruck, starke Inversionen. Auch längere stabile Lagen in den Übergangsjahreszeiten
FE	Föhneinfluss, z.B. Ausräumen der Inversion HBG-RAS, Verstärkung bis zur HBG
TN	Tag-Nachtabfolge, nachts Inversion, tags Auflösung, typischerweise März bis September
SE	Synoptischer Einfluss, Auflösen der Inversion mit Front/ Niederschlag
AI	Periode mit abgehobener Inversion
NI	No-Inversion: fast keine Inversionen trotz Hochwinter

Tabelle 4: Beschreibung der in Tabelle 3 verwendeten Kategorie Kürzel.

Es gibt wie immer auch offene Punkte, die im Rahmen dieses Projektes nicht untersucht werden konnten. Zum Beispiel wäre es durchaus interessant, den Zusammenhang zwischen Inversionen und Hochnebel oder auch den Einfluss einer Schneebedeckung (am Talboden) auf die Inversionshäufigkeit zu beleuchten.

3 Der Stadteffekt auf die Temperatur

Meist ist mit dem Begriff „Stadteffekt“ die unterschiedliche Temperaturentwicklung gemeint, welche von unterschiedlichen thermischen Eigenschaften des verbauten und versiegelten städtischen Bereichs gegenüber einer unverbauten Graslandschaft verursacht wird. Eben dieser Effekt wird in einem ersten Teil recht ausführlich anhand der Stationen Flughafen (FLH) und Innsbruck Universität (UNI) analysiert. Städtische Verbauung wirkt sich allerdings nicht nur auf die Temperaturentwicklung aus, sondern hat auch aufgrund der hohen Rauigkeitslänge einen Einfluss auf die Windverhältnisse. Dies wird in einem zweiten Teil mit den Stationen FLH, UNI sowie der Station Olympisches DORF (ODO) untersucht.

Die Messstation UNI liegt ca. 2,3 km östlich der Messstelle FLH. Während die Umgebung des FLH nur wenig bebaut ist und hauptsächlich von freien Flächen des Flughafens mit Wiesen und Asphalt geprägt wird, befindet sich die UNI im Westteil des Stadtgebietes, zwischen höheren Gebäuden der Klinik, Villen und neueren Wohnanlagen. Da beide Stationen auf gleicher Seehöhe (580 m) liegen, eignen sie sich dank der relativ geringen horizontalen Distanz, den Effekt der städtischen Verbauung zu untersuchen. Dieser sogenannte Stadteffekt wirkt sich insbesondere auf die Temperaturverhältnisse, aber auch auf den Wind aus.

Mit den Halbstundenwerten aus der gut 20-jährigen Datenreihe wird im Folgenden zuerst auf die Temperaturunterschiede eingegangen, wobei hier die Differenz „UNI – FLH“ verwendet wird. Positive Werte bedeuten damit, dass es in der Stadt an der UNI wärmer ist, und umgekehrt. Die Extremwerte reichen von -8 °C bis $+10,8\text{ °C}$ und haben nichts mit einem Stadteffekt an sich zu tun, sondern mit dem teils zeitlich versetzten Durchbruch von Föhn. Das 10er- und das 90er-Perzentil grenzen den Stadteffekt auf einen Wertebereich von $0,0$ bis $1,5\text{ °C}$ ein. Im Mittel ist es in der Stadt (UNI) immer wärmer, der Median der Temperaturdifferenz beträgt $0,6\text{ °C}$, das arithmetische Mittel $0,7\text{ °C}$.

Tabelle 5 kann man entnehmen, dass der Stadteffekt im Median zwei Maxima von $0,7$ bis $0,8\text{ °C}$ aufweist: einerseits in den Wintermonaten (DJF) nachts bis in den Vormittag, und andererseits in den beiden Sommermonaten Juni und Juli am Nachmittag von 13 bis 17 Uhr. Dieser Wärmeinseleffekt wird in der kalten Jahreszeit wahrscheinlich vor allem durch die beheizten Gebäude bei gleichzeitig windschwachen Verhältnissen verursacht. Im Sommer ist die nachmittägliche Überhitzung vermutlich auf die starke Flächenversiegelung (weniger Verdunstungs-Abkühlung und geringere Albedo) zurückzuführen. Im Herbst fällt die nachmittägliche Überhitzung deutlich geringer aus – mit der sich zu Ende neigenden Vegetationsperiode lässt auch abseits der Stadt die kühlende Verdunstung nach, gleichzeitig nimmt die Überhitzung in der Stadt durch den niedrigeren Sonnenstand ab.

Am geringsten ist die Temperaturdifferenz ca. 1-2 Stunden nach Sonnenaufgang mit den niedrigsten Werten von $0,3\text{ °C}$ in den Herbstmonaten (SON) sowie im Juni und Juli. Nach dem morgendlichen Minimum nimmt die städtische Überwärmung bis etwa zur Mittagszeit wieder zu,

im Juni und Juli werden dann auch die tageszeitlichen Maxima erreicht, dann lässt der Stadteffekt bis Sonnenuntergang nochmals etwas nach.

Tageszeitliche Temperaturdifferenz UNI – FLH [°C]												
hh (MEZ)	Januar	Feber	März	April	Mai	Juni	Juli	August	Sept.	Okt.	Nov.	Dez.
0	0,8	0,7	0,7	0,7	0,6	0,6	0,7	0,6	0,6	0,6	0,7	0,8
1	0,8	0,7	0,7	0,7	0,6	0,6	0,7	0,6	0,6	0,6	0,6	0,8
2	0,7	0,7	0,7	0,8	0,6	0,6	0,7	0,6	0,5	0,6	0,6	0,7
3	0,8	0,7	0,7	0,7	0,6	0,5	0,7	0,6	0,6	0,6	0,6	0,7
4	0,8	0,7	0,7	0,8	0,6	0,5	0,6	0,5	0,5	0,5	0,6	0,7
5	0,7	0,6	0,7	0,7	0,5	0,5	0,6	0,6	0,5	0,5	0,6	0,7
6	0,7	0,6	0,7	0,7	0,4	0,3	0,3	0,4	0,5	0,5	0,6	0,7
7	0,7	0,7	0,6	0,5	0,4	0,4	0,4	0,4	0,3	0,5	0,6	0,7
8	0,7	0,7	0,4	0,4	0,5	0,5	0,5	0,4	0,3	0,4	0,6	0,7
9	0,6	0,6	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,4	0,3	0,5
10	0,6	0,7	0,6	0,6	0,5	0,6	0,5	0,5	0,5	0,5	0,4	0,4
11	0,7	0,7	0,6	0,6	0,5	0,6	0,6	0,5	0,4	0,5	0,4	0,5
12	0,7	0,7	0,6	0,6	0,6	0,6	0,7	0,5	0,4	0,4	0,4	0,5
13	0,6	0,7	0,6	0,6	0,6	0,7	0,7	0,6	0,4	0,3	0,3	0,4
14	0,5	0,6	0,6	0,7	0,6	0,8	0,8	0,6	0,4	0,3	0,3	0,4
15	0,5	0,6	0,6	0,7	0,6	0,8	0,8	0,7	0,4	0,3	0,3	0,4
16	0,6	0,5	0,5	0,6	0,6	0,7	0,8	0,7	0,4	0,3	0,4	0,6
17	0,6	0,5	0,4	0,6	0,5	0,7	0,7	0,6	0,4	0,4	0,5	0,6
18	0,6	0,5	0,4	0,5	0,4	0,6	0,6	0,5	0,4	0,4	0,6	0,7
19	0,7	0,5	0,5	0,5	0,4	0,5	0,6	0,6	0,6	0,5	0,7	0,7
20	0,8	0,6	0,6	0,5	0,5	0,5	0,7	0,6	0,6	0,5	0,6	0,7
21	0,8	0,6	0,6	0,5	0,5	0,6	0,7	0,6	0,6	0,6	0,7	0,7
22	0,8	0,6	0,6	0,6	0,5	0,6	0,7	0,6	0,6	0,6	0,6	0,7
23	0,8	0,7	0,7	0,6	0,5	0,6	0,7	0,6	0,6	0,6	0,6	0,7

Tabelle 5: Tageszeitliche Temperdurdifferenz dT [°C] zwischen UNI und FLH in den verschiedenen Monaten. Die Uhrzeit umfasst die halbe Stunde davor und die halbe Stunde danach, z.B. 10 Uhr sind die Halbstundenwerte von 10:00 und 10:30 Uhr MEZ, welche die Temperatur in der Zeit von 9:30 bis 10:30 Uhr MEZ beinhalten.

Neben dem tages- und jahreszeitlichen Verlauf des Stadteffekts wurde dieser auch in Abhängigkeit von Stabilität, Windrichtung und Windgeschwindigkeit betrachtet. Am stärksten ist die Korrelation mit der Stabilität. Es zeigt sich, dass der Temperaturunterschied umso größer ist, umso stabiler die Luft zwischen FLH und HBG geschichtet ist (Tabelle 6).

Temperaturdifferenz UNI – FLH [°C] in Abhängigkeit von der Stabilität					
Schichtung FLH-HBG	sehr labil	labil	neutral	stabil	sehr stabil
Häufigkeit [%]	0,5	14,3	40,4	26,2	18,6
Median Wind [m/s]	2,5	2,1	1,5	1,0	1,2
dT [°C]	0,1	0,4	0,4	0,7	1,2

Tabelle 6: Temperaturdifferenz dT [°C] zwischen UNI und FLH in Abhängigkeit von der Stabilität in der Schicht FLH-HBG. Zudem sind die Häufigkeit [%] der einzelnen Schichtungen und der Median der dabei auftretenden Windgeschwindigkeit [m/s] angeführt. Die Stärke des Stadteffekts ist farbcodiert, wobei eine stärkere städtische Überwärmung ins rötliche geht.

Dies ist darauf zurückzuführen, dass hohe Stabilität mit windschwachen Verhältnissen einhergeht. Durch den eingeschränkten Luftaustausch treten lokale Einflüsse stärker hervor. Im Winter ist es

während stabiler Situationen zudem meist relativ kalt, das Beheizen und der dadurch verursachte Wärmeinseleffekt nehmen zu.

Im Median ist es in den seltenen sehr labilen Situationen an der UNI nur geringfügig wärmer als am FLH (+0,1 °C). Die Überwärmung der Stadt kann leicht „nach oben“ entweichen. Zudem ist der Wind meist stärker (der Median an der UNI beträgt 2,5 m/s gegenüber 1,2 m/s bei sehr stabilen Schichtungen), was die Temperatur zwischen Stadt und FLH besser ausgleicht. Der Temperaturunterschied nimmt auf 0,4 °C bei labilen und neutralen Schichtungen zu, in stabilen Schichtungen beträgt er 0,7 °C, in sehr stabilen Situationen 1,2 °C.

Bringt man den Stadteffekt mit der Windgeschwindigkeit an der UNI in Verbindung, so ist die städtische Überwärmung in den meisten Jahreszeiten tendenziell stärker, umso schwächer der Wind ist (Tabelle 7). Im Vergleich mit der Stabilität ist diese Abhängigkeit aber deutlich geringer. Am stärksten ausgeprägt ist das Muster im Winter, also während der Heizperiode. Hier treten bei Windstille bzw. windschwachen (bis 2 m/s) Verhältnissen die größten Temperaturunterschiede auf. Die allgemein selten auftretenden hohen Windgeschwindigkeiten (ab 7,5 m/s) gleichen die städtischen Überwärmung so wie im Frühjahr und Herbst auf 0,3 °C im Median aus. Nur im Sommer weicht dieses Muster ab, bis zu 7,5 m/s nimmt der Unterschied sogar zu. Dies dürfte damit zusammenhängen, dass die nachmittägliche Überhitzung in der Stadt gleichzeitig mit kräftigem Taleinwind einhergeht. Erst bei noch höheren Windgeschwindigkeiten gleicht sich die Wärmeentwicklung in der Stadt und dem Umland wieder besser aus.

Temperaturdifferenz UNI – FLH [°C] in Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit					
Windgeschwindigkeit	Kalmen	0.5 - 2 m/s	2 - 5 m/s	5 - 7,5 m/s	> 7,5 m/s
Häufigkeit [%] gesamt	10,9	57,9	26,0	4,5	0,6
Winter	0,7	0,7	0,6	0,5	0,3
Frühling	0,5	0,6	0,6	0,5	0,3
Sommer	0,4	0,5	0,7	0,8	0,6
Herbst	0,5	0,5	0,5	0,4	0,3
dT [°C] gesamt	0,5	0,6	0,6	0,6	0,3

Tabelle 7: Temperaturdifferenz dT [°C] zwischen UNI und FLH in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit an der UNI in den verschiedenen Jahreszeiten und insgesamt. Zudem ist die Häufigkeit [%] der einzelnen Geschwindigkeitsklassen angeführt. Die Stärke des Stadteffekts ist farbcodiert, wobei eine stärkere städtische Überwärmung ins rötliche geht.

Auch mit der Windrichtung am FLH findet man einen Zusammenhang mit dem Stadteffekt, wobei Kalmen-Situationen (weniger als 0,5 m/s) nicht berücksichtigt wurden. Anhand der Windrosen der jährlichen TEMPIS-Berichte wurden die Richtungen in Talwind (205 bis 305 Grad), Taleinwind (25 bis 105 Grad) und Föhn (150 – 195 Grad mit mindestens 5 m/s) unterteilt. Diese Richtungen machen rund 86 % des auftretenden Windes aus. Die Grenzbereiche zwischen diesen Richtungen, sowie Wind aus Nord wurden nicht näher analysiert. Sie sind nicht eindeutig bestimmten Phänomenen zuordenbar, z.B. kann Wind aus nördlicher Richtung bei Hangabwinden oder Föhnwalzen bei unterschiedlichen Stabilitäten und unterschiedlichen Geschwindigkeiten auftreten. Die städtische Überwärmung liegt bei diesen „sonstigen“ Windrichtungen mit einem Median von

0,5 °C (nicht gezeigt) knapp unter dem Median aller Werte, eine Interpretation ist damit nicht trivial. Bei der häufigsten Windrichtung, dem Talauswind (205 bis 315 Grad) an der UNI ist die städtische Überwärmung insgesamt mit 0,7 °C am stärksten (Tabelle 8). Dies trifft für alle Jahreszeiten zu, wobei wiederum im Winter mit 0,9 °C der größte Temperaturunterschied zu finden ist. Dies hängt damit zusammen, dass der Talauswind vor allem nachts auftritt, wo der Stadteffekt abgesehen von Sommernachmittagen allgemein am größten ist (vgl. Tabelle 5) und im Winter zusätzlich durch das Beheizen der Gebäude verstärkt wird. Bei Taleinwind (25 bis 105 Grad), der zweithäufigsten Windrichtung, ist die städtische Überwärmung im Winter und Herbst mit 0,3 °C gering und steigt sehr wahrscheinlich strahlungsbedingt im Frühling auf 0,5 °C und im Sommer auf 0,6 °C. Föhn an der UNI lässt sich auf den Sektor 150 bis 195 Grad eingrenzen und wird hier mit einer Mindestgeschwindigkeit von 5 m/s von nächtlichen Ausfließen aus dem Wipptal abgegrenzt. Die relativ hohen Windgeschwindigkeiten gleichen den Temperaturunterschied fast unabhängig von der Jahreszeit zwischen Stadt und Umgebung aus. An der UNI ist es damit „nur“ noch um rund 0,3 °C wärmer als am FLH. Der geringfügig höhere Temperaturunterschied von 0,4 °C im Sommer dürfte wiederum auf die nachmittägliche Einstrahlung zurückzuführen sein.

Temperaturdifferenz UNI – FLH [°C] in Abhängigkeit von der Windrichtung			
Windrichtung [Grad]	Talauswind (205-305)	Taleinwind (25 – 105)	Föhn (150 – 195, ≥ 5 m/s)
Häufigkeit [%] gesamt	46,3	37,5	2,3
Winter	0,9	0,3	0,3
Frühling	0,7	0,5	0,3
Sommer	0,6	0,6	0,4
Herbst	0,7	0,3	0,3
dT [°C] gesamt	0,7	0,4	0,3

Tabelle 8: Temperaturdifferenz dT [°C] zwischen UNI und FLH in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit an der UNI in den verschiedenen Jahreszeiten und insgesamt. Die Häufigkeitsangaben [%] beziehen sich auf die Gesamtdaten. Die Stärke des Stadteffekts ist farbcodiert, wobei eine stärkere städtische Überwärmung ins rötliche geht. Kalmensituationen (Windgeschwindigkeiten $\leq 0,5$ m/s) wurden nicht berücksichtigt.

4 Der Stadteffekt auf den Wind

Wie bereits erwähnt, wirkt sich die städtische Bebauung nicht nur auf die Temperatur, sondern auch auf die Windverhältnisse aus. Gegenüber offenem, freiem Gelände mit niedriger Vegetation wird der Wind von den Gebäuden im Stadtbereich abgeschwächt. Für die Analyse des Stadteffekts auf die Windgeschwindigkeit werden die Stationen FLH, UNI und ODO verwendet. Die Windmessstellen befinden sich am FLH in 25 m Höhe über Grund auf dem Flughafentower, in 47 m Höhe über Grund an der UNI auf dem Universitätsgebäude „Bruno Sander Haus“, bzw. in 65 m Höhe über Grund auf dem Hochhausturm im ODO. Zwar wäre die Umrechnung der Windgeschwindigkeit auf eine einheitliche Höhe prinzipiell möglich (unter Annahme eines stabilitätsabhängigen, logarithmischen Windprofils), aufgrund des Einflusses der städtischen Grenzschicht wäre dies aber äußerst komplex. Deshalb wurde hier darauf verzichtet, die Vergleiche im folgenden Abschnitt sind daher als eine Annäherung zu verstehen.

Aus dem gesamten Datensatz sind aufgrund von Ausfallszeiten und Messproblemen (v.a. im ODO) in Summe gut 170.000 gleichzeitige Halbstundenwerte vorhanden, im Wesentlichen seit 2009. Dies entspricht einer Gesamtzeit von rund 50 %. Im Median sind die Windgeschwindigkeiten relativ niedrig und liegen bei 1,5 m/s am FLH und im ODO, bzw. bei 1,3 m/s an der UNI. Um den Stadteffekt zu untersuchen, wurde der Wind an der UNI analog zum vorigen Abschnitt in die Richtungen Talauswind (205 bis 305 Grad), Taleinwind (25 bis 105 Grad) und Föhn (150 bis 195 Grad mit mindestens 5 m/s) unterteilt.

Windrichtung UNI	Häufigkeit [%]	Windgeschwindigkeit [m/s]			Windrichtung [Grad]		
		FLH	UNI	ODO	FLH	UNI	ODO
Talauswind (205-305 Grad)	46,7	1,5	1,1	1,3	261	247	246
Taleinwind (25-105 Grad)	36,6	1,7	2,0	2,8	94	73	81
Föhn (150-195 Grad, ≥ 5 m/s)	2,1	7,6	6,6	10,3	140	182	199

Tabelle 9: Auswertung der Windgeschwindigkeitsverhältnisse und -differenzen bei verschiedenen Windrichtungen an der UNI. In Klammern sind die Häufigkeiten der verschiedenen Windrichtungen angegeben. Sie unterscheiden sich vom vorigen Kapitel geringfügig, da nur Werte berücksichtigt wurden, wenn an allen drei Stationen Messungen vorhanden sind.

In dieser Betrachtung (Tabelle 9) zeigt sich, dass der Talein- und Talauswind jeweils an der stromabwärts liegenden Messstelle schwächer (bzw. im Fall von Ausfließen im ODO gleich wie an der UNI) ist als an der/den stromaufwärts liegenden Messstelle(n) – unabhängig von der Messhöhe. Die Stadt mit ihren Gebäuden bremst den herankommenden Wind aufgrund der hohen Rauigkeit so ab, dass die Geschwindigkeit in der Stadt und in ihrem Lee geringer ist. Die Windrichtungen unterscheiden sich nur um wenige Grad. Das Einfließen ist dabei an allen Stationen (zum Teil deutlich) stärker als das Ausfließen. Bei Föhn an der UNI (Windrichtung 150-195 °, Windgeschwindigkeit > 5 m/s) ist die Windgeschwindigkeit an den Stadträndern höher als an der UNI, wobei die höchsten Geschwindigkeiten im ODO auftreten. Mit der Barriere, die die Nordkette bei Föhn darstellt, unterscheiden sich die Windrichtungen dabei erheblich. Am FLH kommt der Wind vornehmlich aus Südost (140 °), an der UNI aus Süd (182 °) und im ODO aus Südwest (199 °).

Anhand der Differenz der Windgeschwindigkeit zwischen der innerstädtischen Station UNI und den Stadtrandstationen FLH und ODO wurde geschaut, in wie fern sich eine Verringerung der Windgeschwindigkeit durch die städtische Bebauung nachweisen lässt. Dabei wurde wie oben in die drei Strömungstypen Talauswind, Taleinwind und Föhn unterschieden. Die Ergebnisse sind als Histogramme in Abbildung 2 dargestellt.

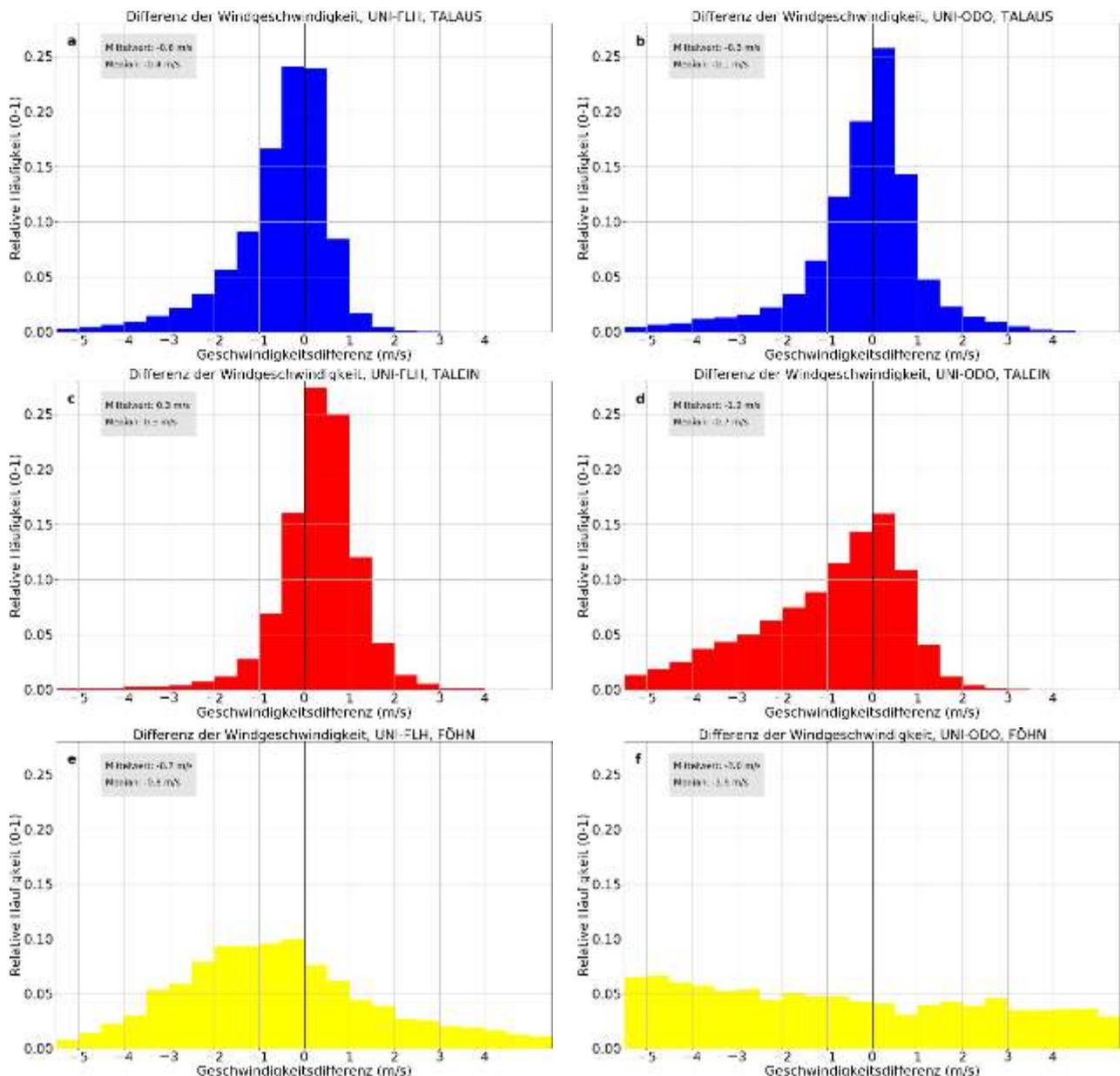


Abbildung 2: Verteilung der Windgeschwindigkeitsdifferenzen in m/s zwischen UNI und FLH (links) und UNI und ODO (rechts) bei (a,b) Talauswind, (c,d) Taleinwind, (e,f) Föhn. Die Abgrenzung dieser Strömungen ist dem Text oben zu entnehmen.

In der linken Spalte ist die Differenz von UNI zur westlich gelegenen Station FLH zu finden. Bei Talauswind (von Westen) ist die Verteilung linkslastig, d. h. in der Mehrzahl sind die Geschwindigkeiten am FLH höher als in der Stadt. Bei Taleinwind (von Osten) kehrt sich das Bild jedoch um, die Verteilung ist rechtslastig. Dies entspricht der Erwartung, dass der Wind gebremst

wird, wenn er den innerstädtischen Bereich mit hoher Bebauungsdichte und damit erhöhter Bodenrauigkeit überstreicht. Auch bei Föhn aus dem Wipptal ist der Wind am FLH tendenziell stärker als an der UNI.

Die rechte Spalte zeigt die Verteilungen anhand der Stationen UNI und ODO. Bei Talauswind ist die Verteilung relativ symmetrisch, d. h. der Wind ist an der UNI bereits gebremst und die Windgeschwindigkeit bleibt bis ins ODO ungefähr gleich. Bei Taleinwind ist die Verteilung linkslastig, der Wind im O-Dorf somit meistens stärker, im Mittel um 1,2 m/s. Dies ist ein weiteres Indiz für die Reduzierung der Windgeschwindigkeit im innerstädtischen Bereich. Ganz anders schaut die Verteilung bei Föhn aus. Es gibt kein klares Häufigkeitsmaximum, die turbulente Natur des Föhns wird anhand der starken Streuung der (zeitgleich betrachteten) Geschwindigkeitsdifferenzen sichtbar. Öfter weht der Föhn im ODO stärker, das hat aber nicht nur mit der Bebauung, sondern auch mit dem in der Regel gut ausgebildeten Föhnast ins Tiroler Unterland zu tun.

5 Appendix

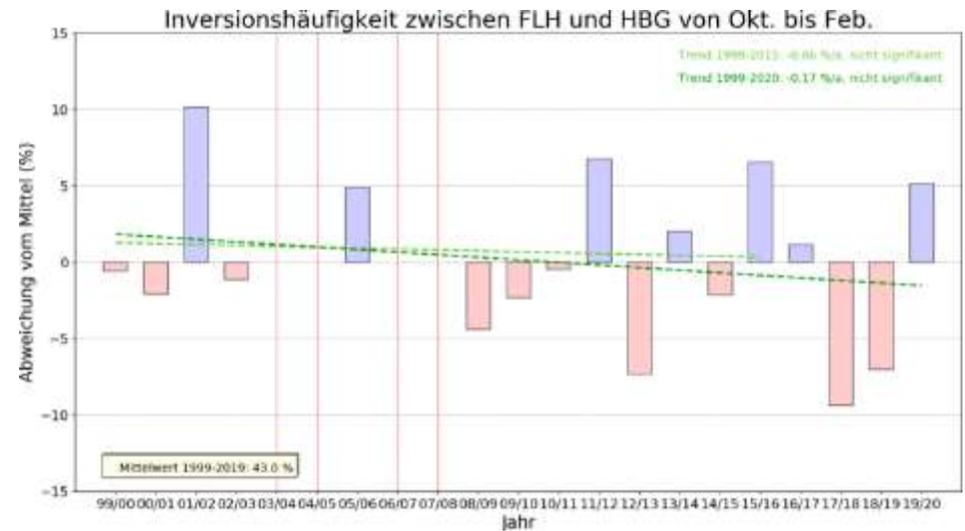
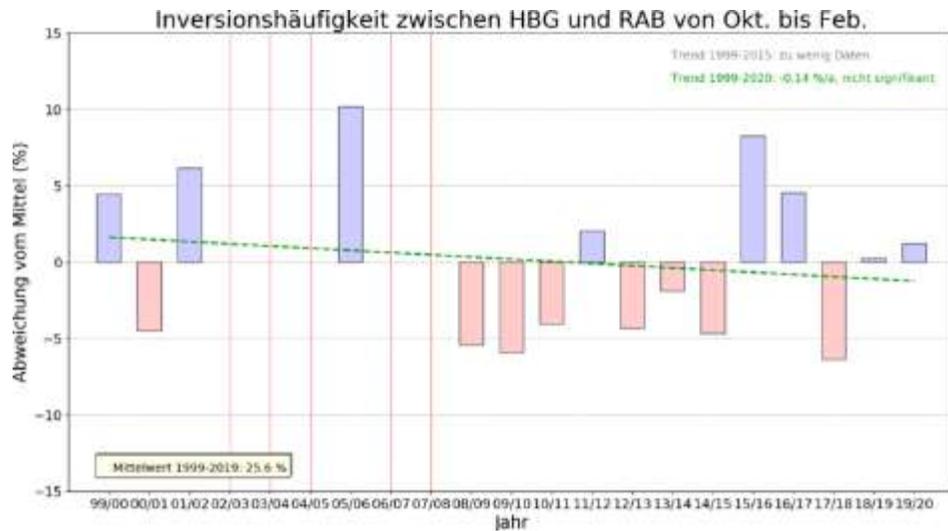
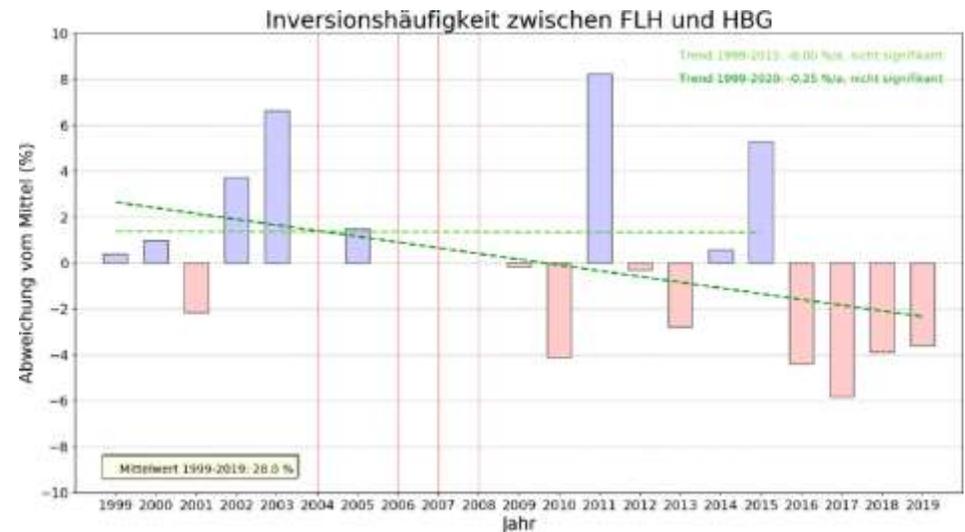
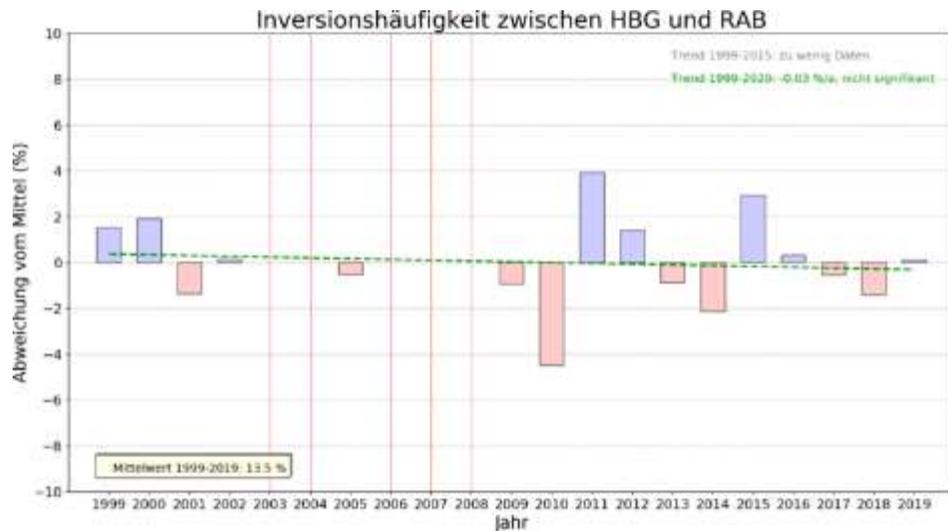
5.1 Trendplots der Inversionshäufigkeit

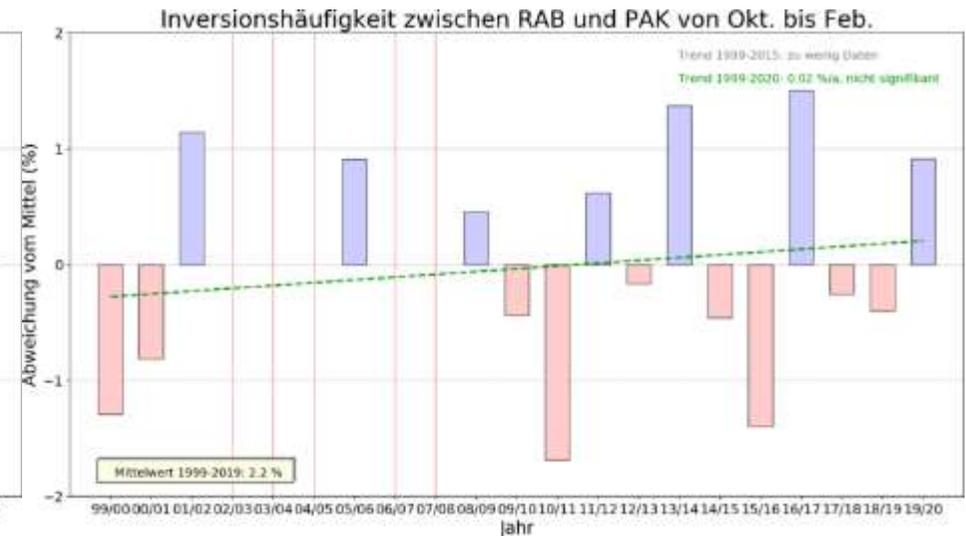
5.1.1 Inversionshäufigkeiten im Jahr und in der Inversionsperiode Oktober bis Februar

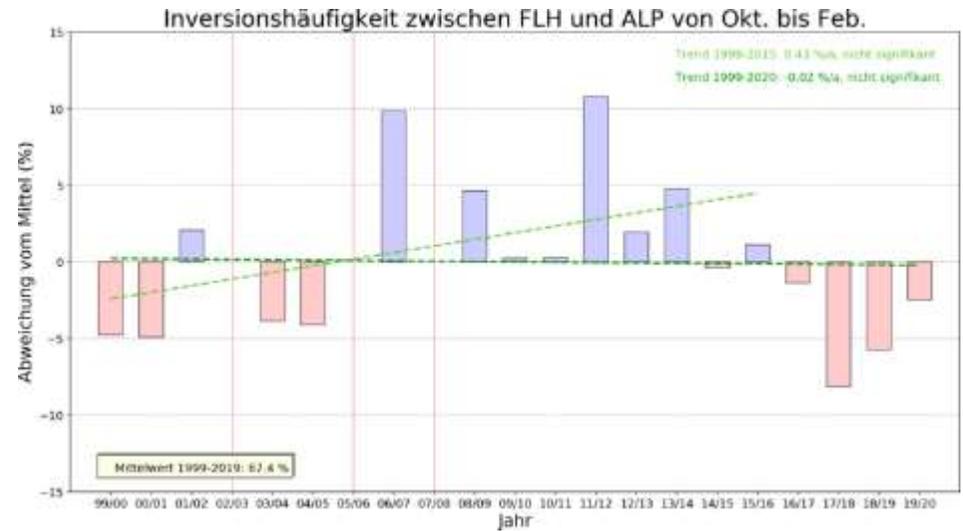
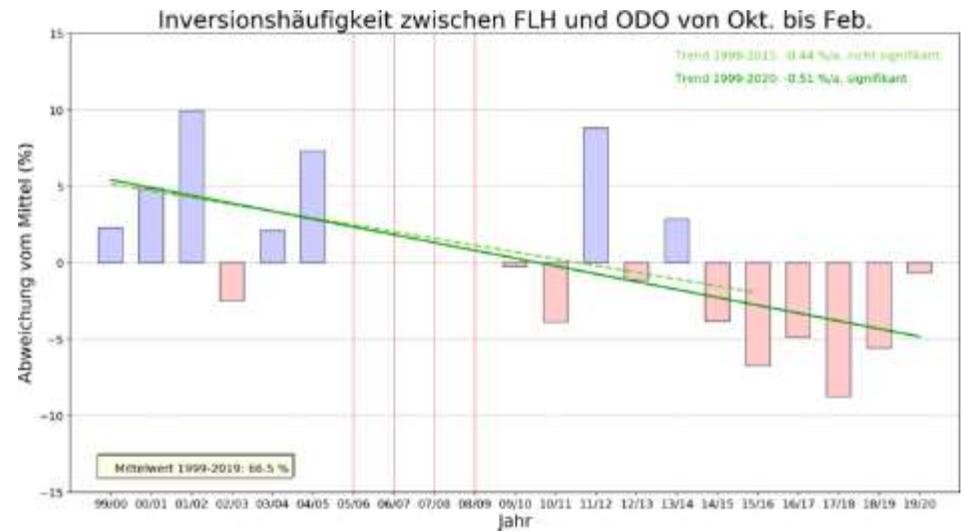
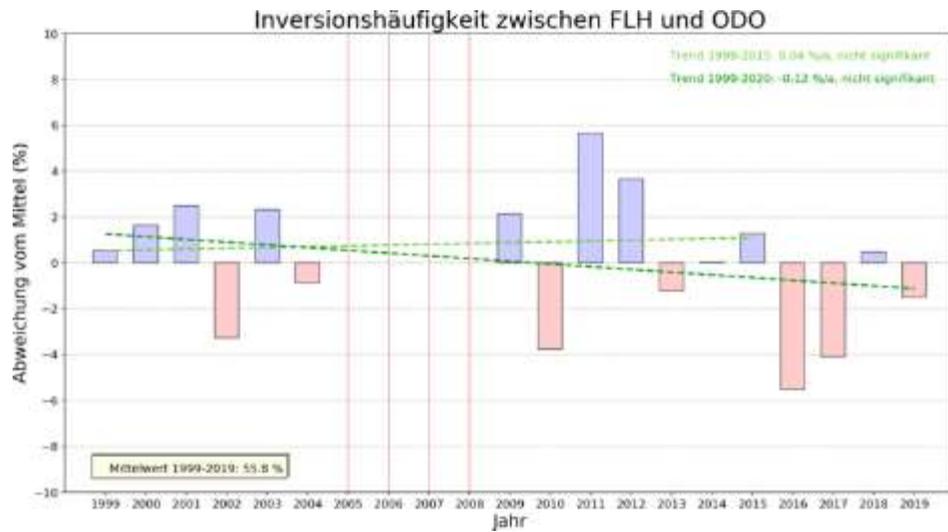
In den folgenden Abbildungen werden die Inversionshäufigkeiten samt den analysierten Trends relativ zum Mittelwert in der Gesamtreihe 1999 – 2019 (bzw. Feber 2020) dargestellt. In der linken Spalte finden sich die Ergebnisse bezogen auf die Daten im gesamten Jahr, in der rechten Spalte für die Inversionssaison von Oktober bis Februar. Trends der Periode 1999 – 2015 (bis zur Neuerichtung der Tempis-Stationen) sind in hellgrün, jene der Periode 1999 – 2020 in dunkelgrün dargestellt. Fehlwerte im Jahr bzw. der Inversionssaison mit einer Datenverfügbarkeit unter 80 % werden mit einem senkrechten roten Strich gekennzeichnet.

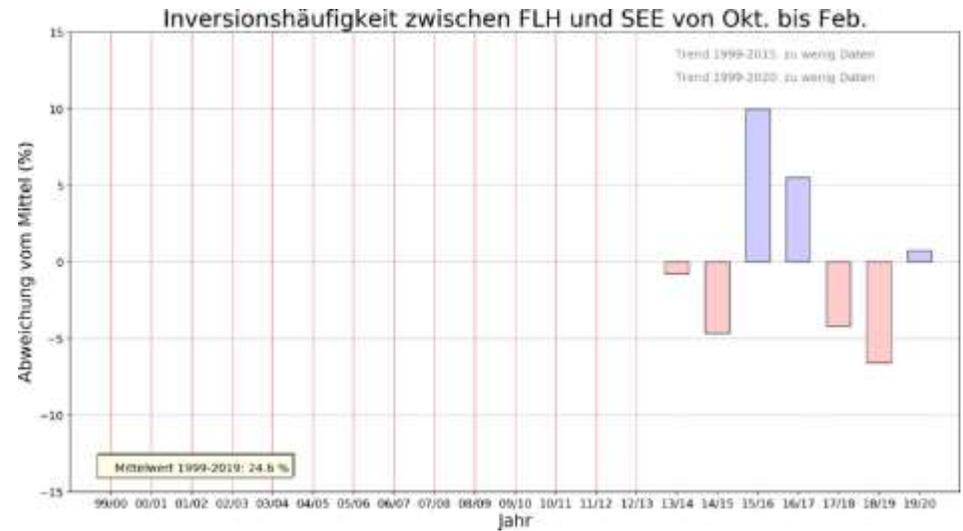
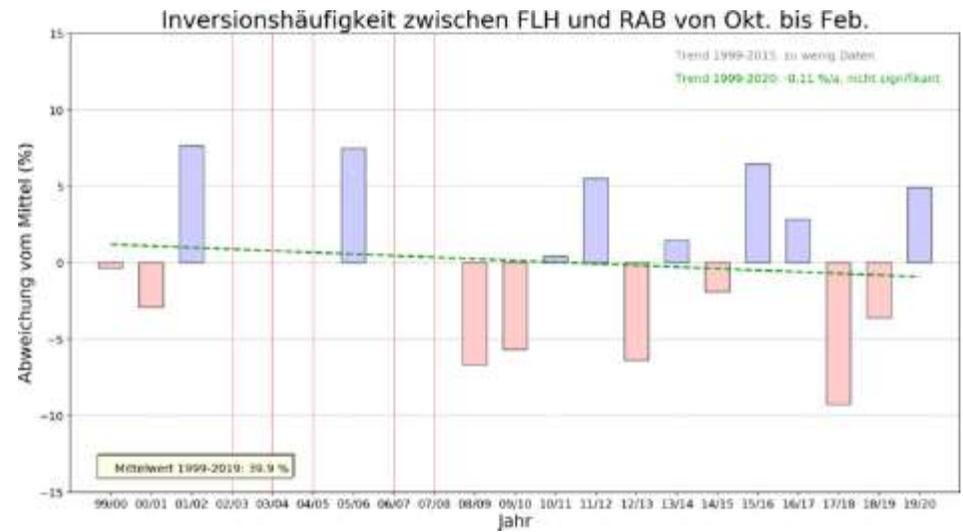
Zunächst werden die auch in den Zeitreihenplots analysierten aufeinander aufbauenden Schichten FLH – HBG, HBG – RAS und RAS – PAK gezeigt. Anschließend daran werden alle Schichtungen von der Basisstation FLH zu der jeweiligen höher gelegenen Station ausgewertet.

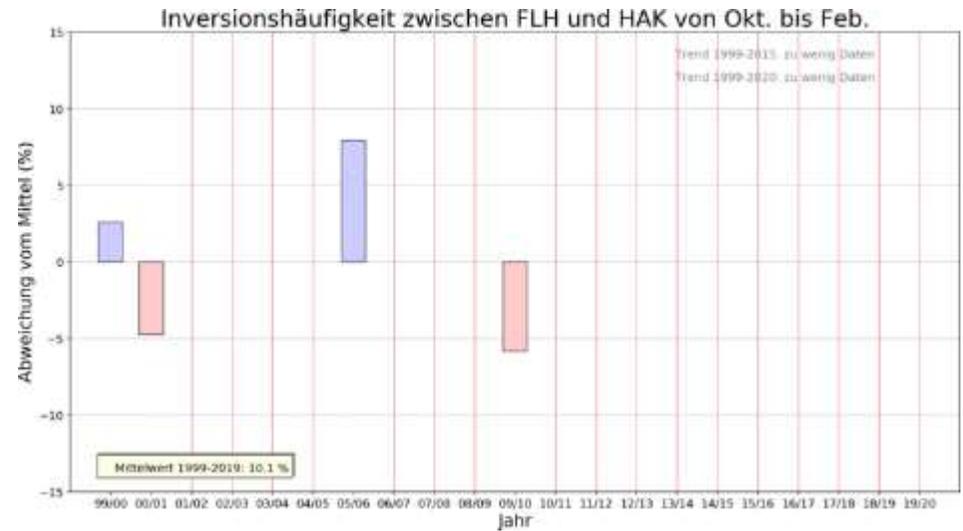
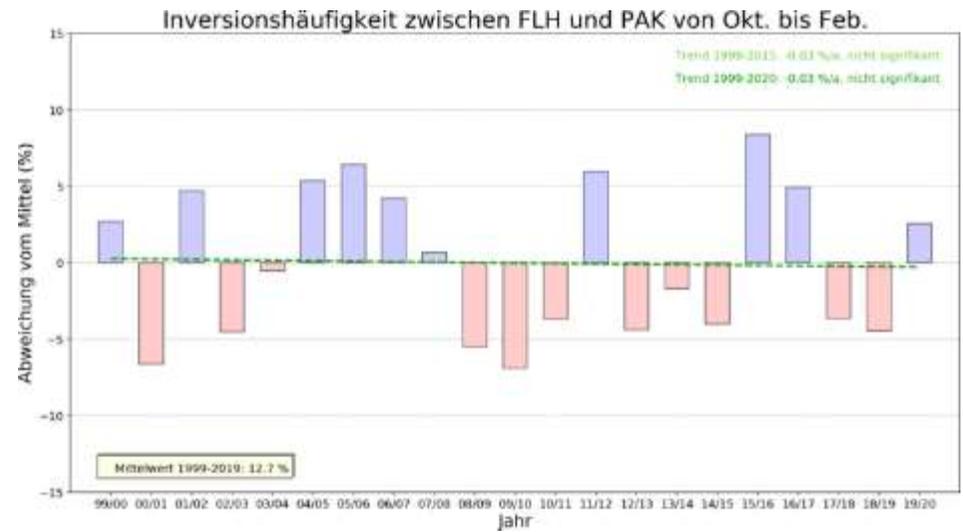
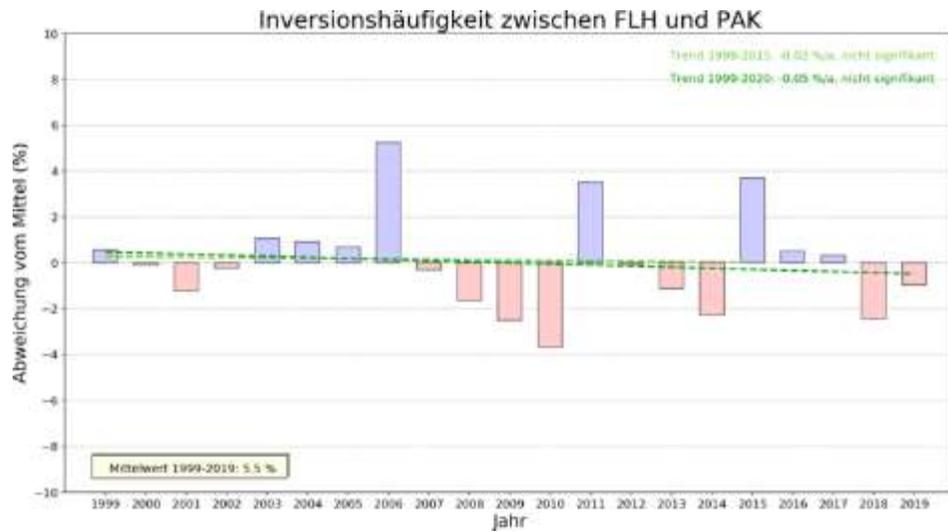
Analoge Abbildungen wurden auch für die absolute Inversionshäufigkeit erstellt, diese werden hier jedoch nicht gezeigt. Für die Trendauswertung spielt es keine Rolle, ob die Häufigkeiten relativ zu einem Mittelwert oder absolut betrachtet werden.









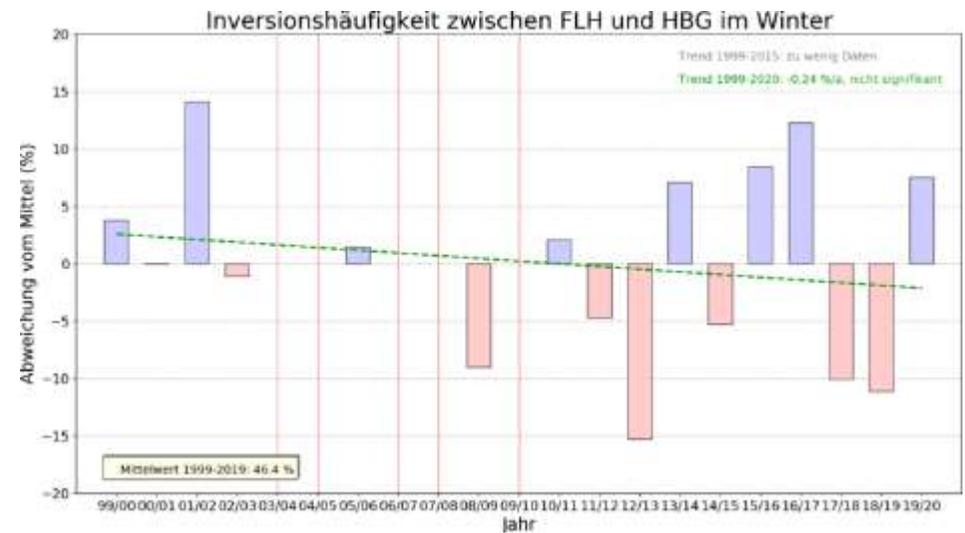
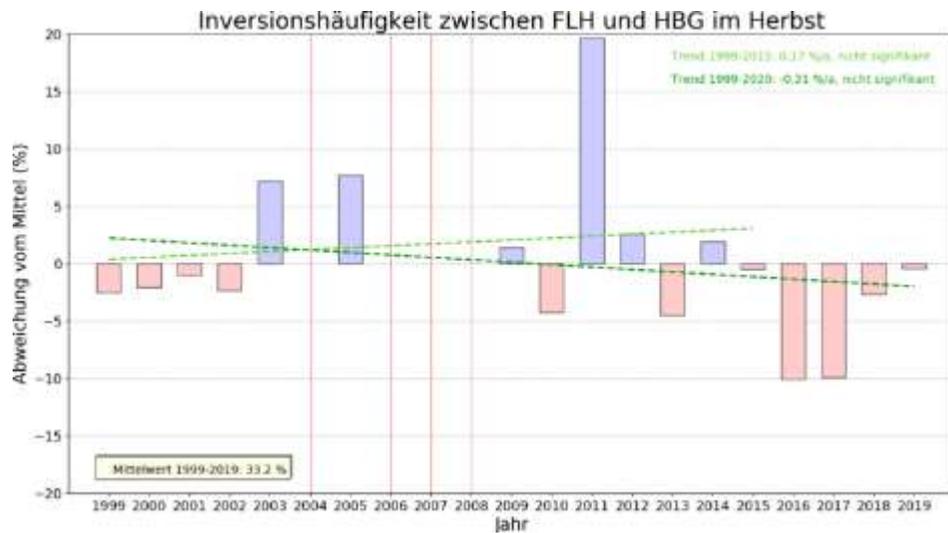
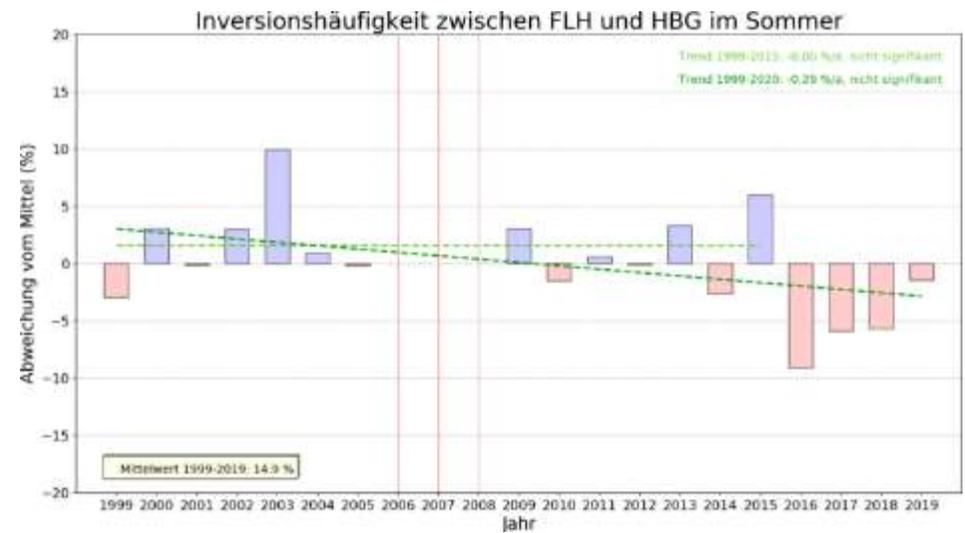
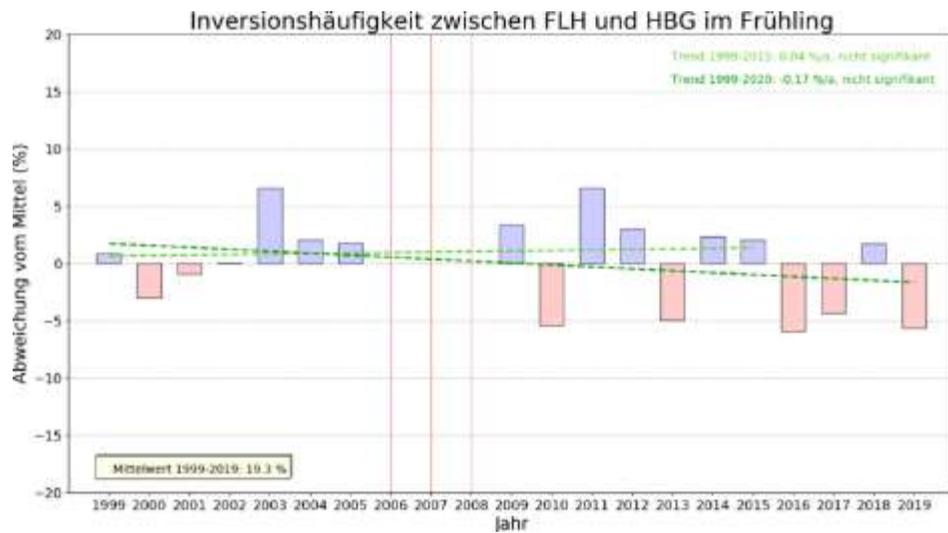


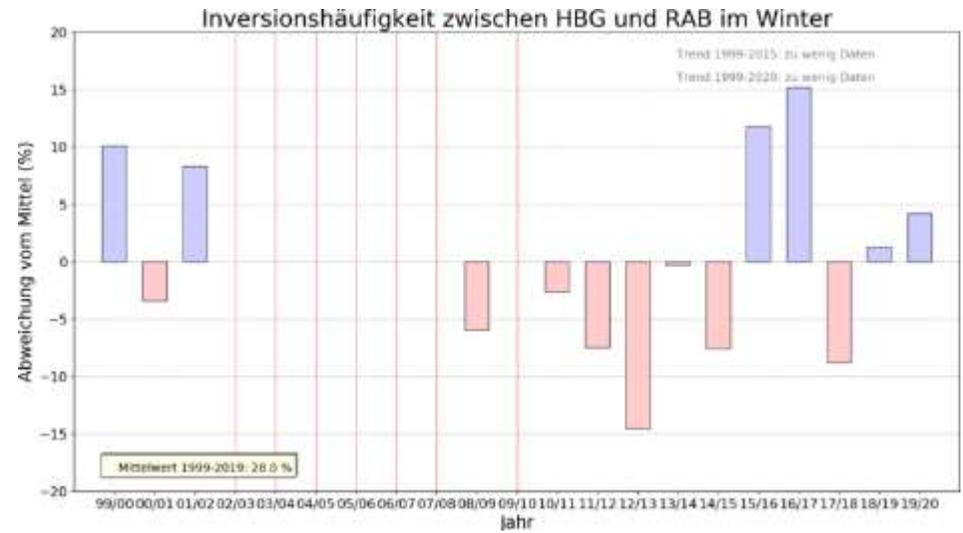
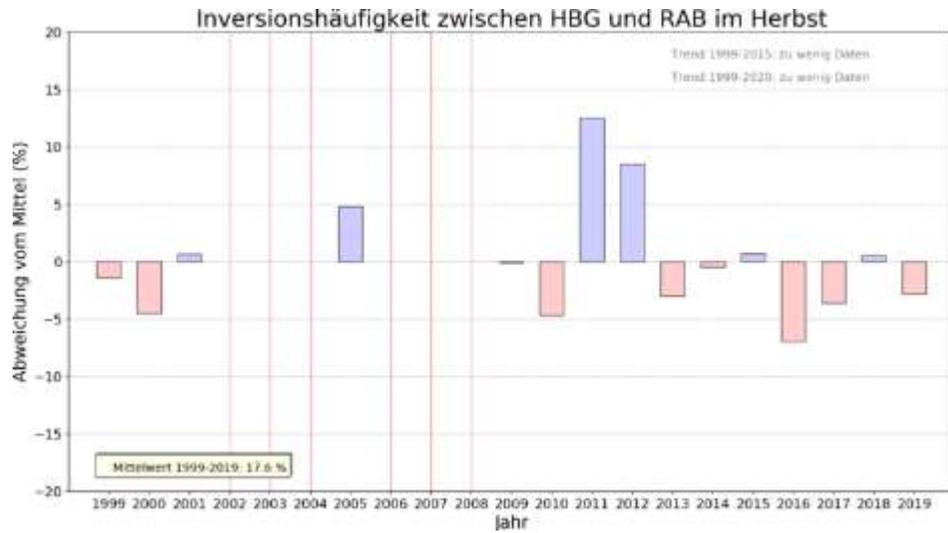
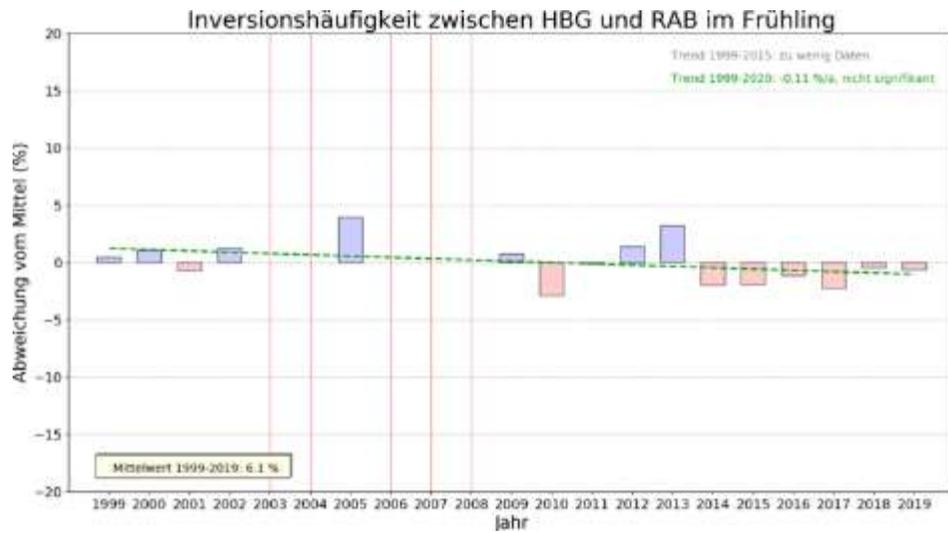
5.1.2 Inversionshäufigkeiten in den Jahreszeiten

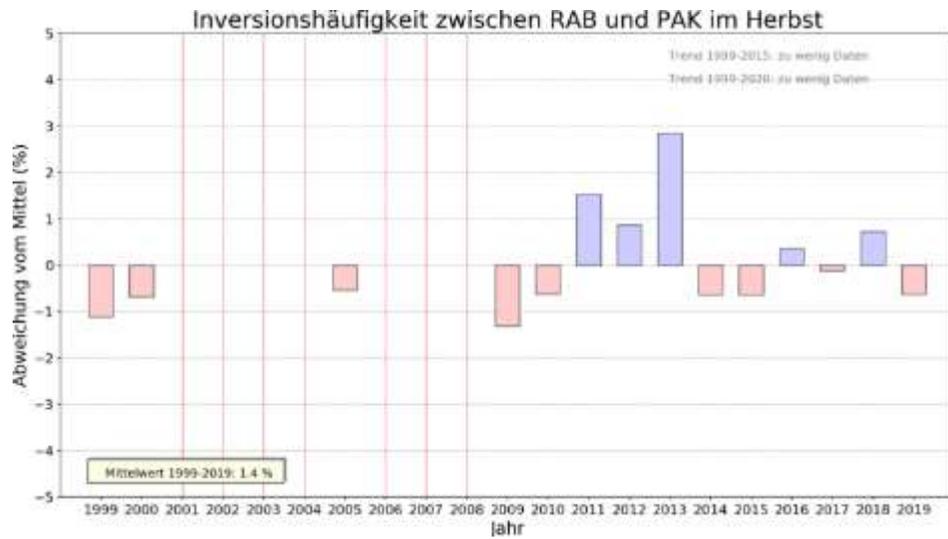
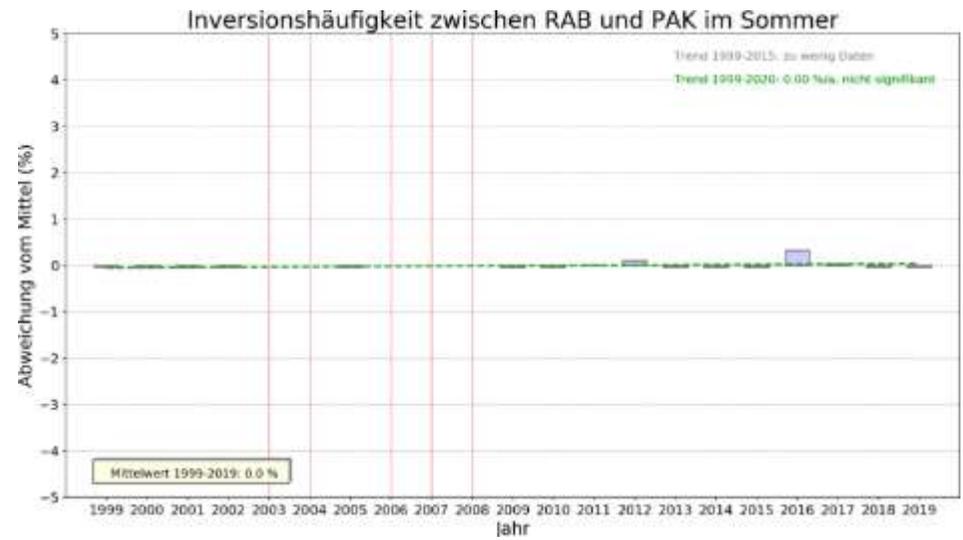
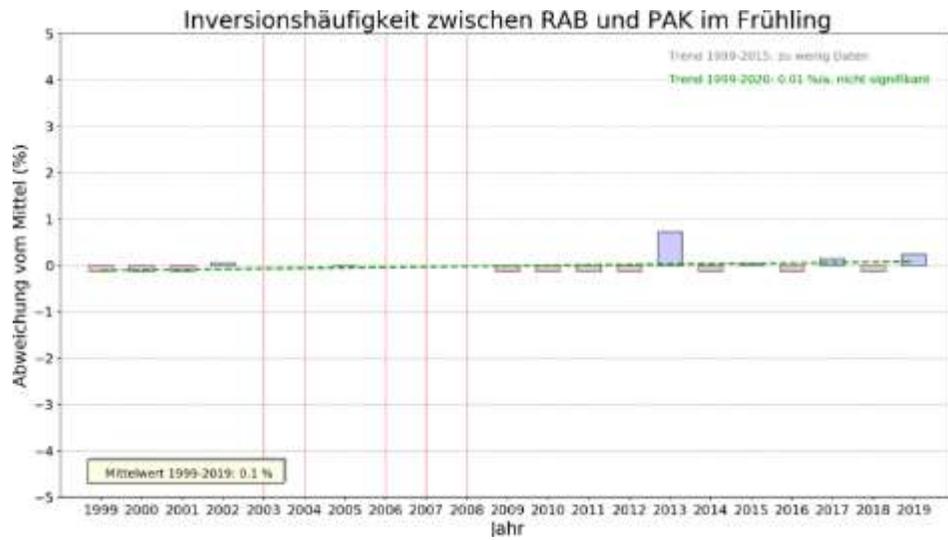
Analog zu den in Abschnitt 5.1.1 dargestellten Abbildungen sind im Folgenden die jahreszeitlichen Plots zu finden.

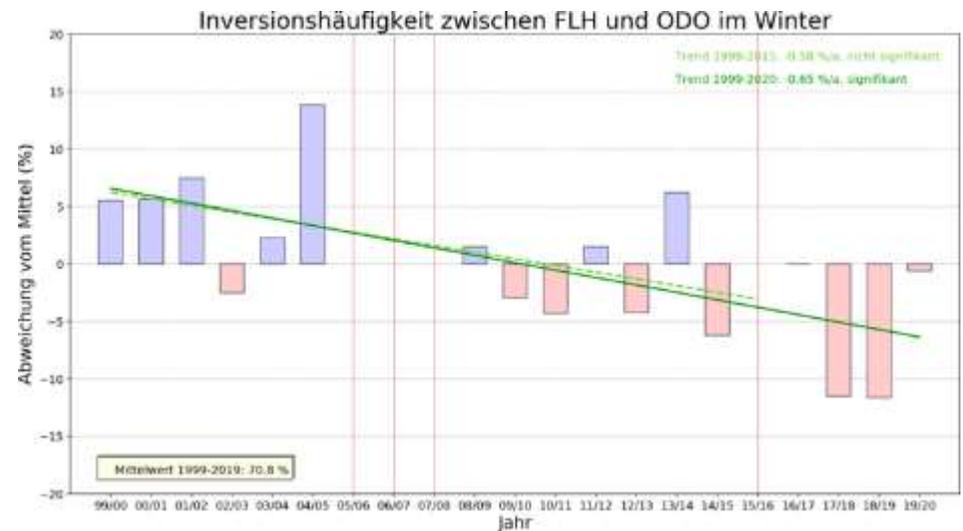
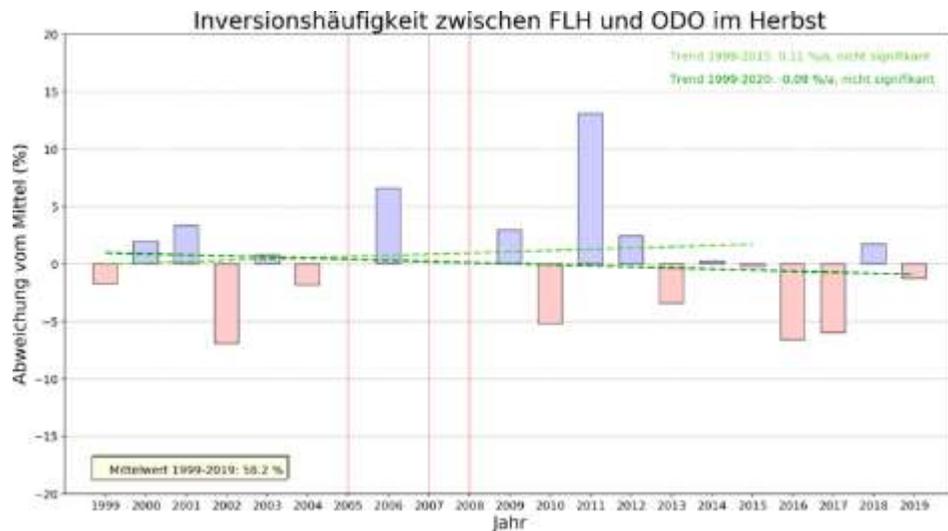
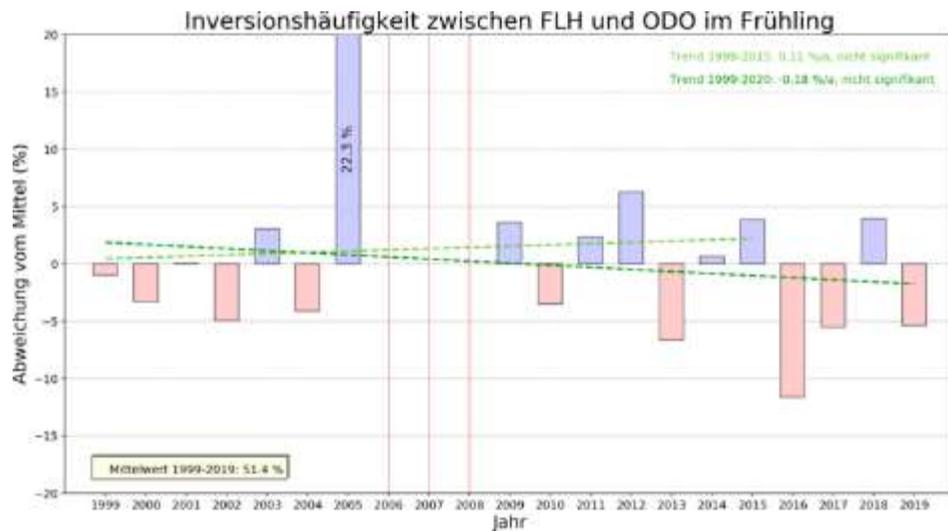
Die Abgrenzung der Jahreszeiten entspricht der in der Klimaanalyse üblichen Zusammenfassung von jeweils drei Monaten. Der Frühling umfasst beispielsweise die Monate März, April und Mai (MAM).

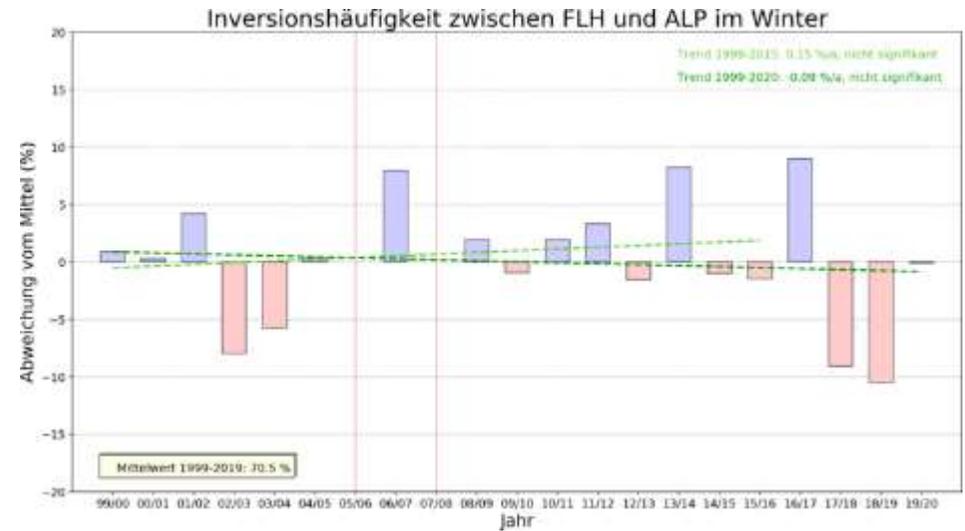
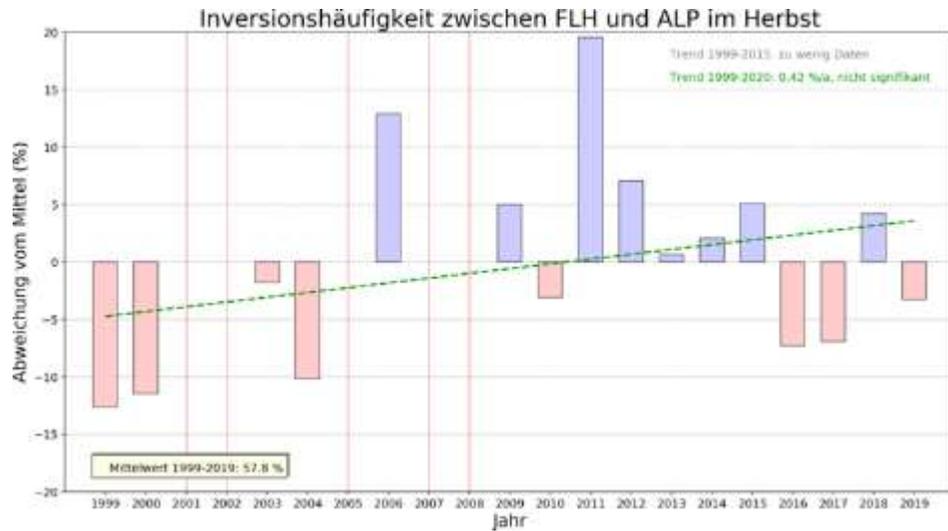
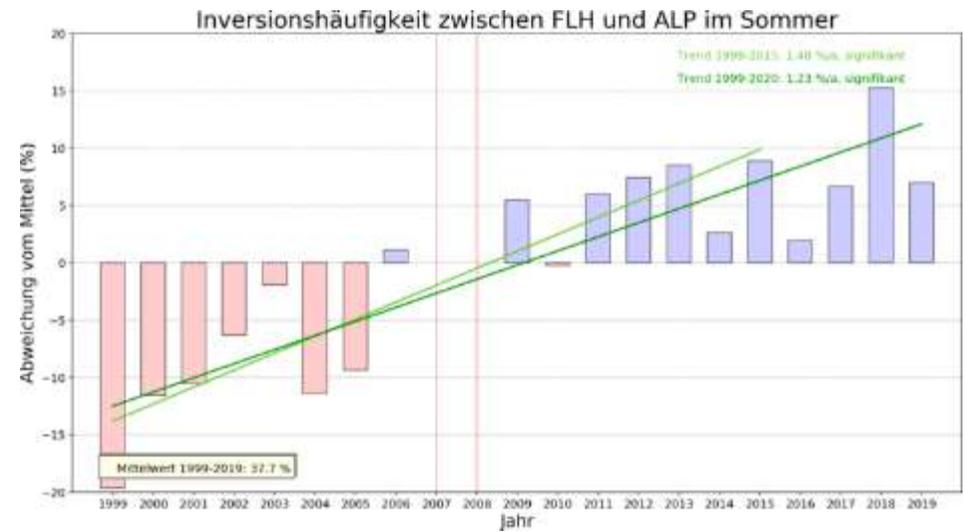
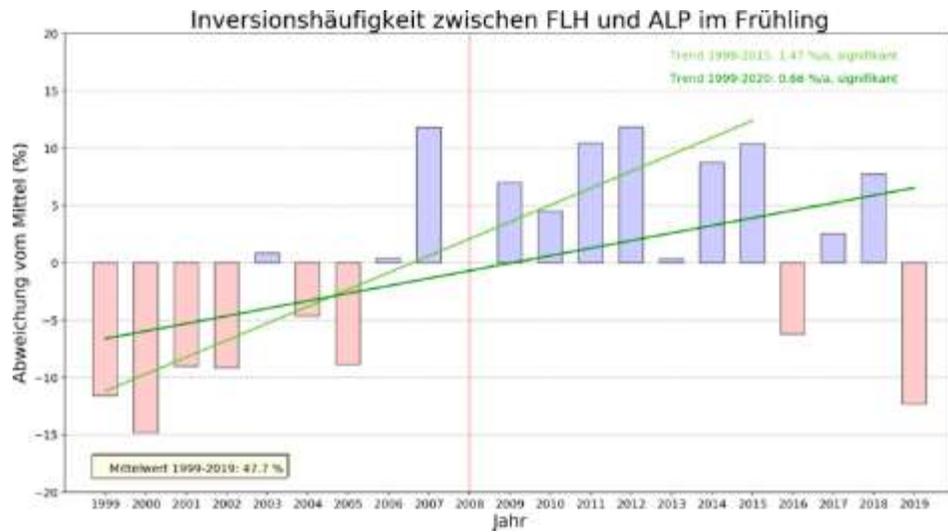
Zunächst werden die auch in den Zeitreihenplots analysierten aufeinander aufbauenden Schichten FLH – HBG, HBG – RAS und RAS – PAK gezeigt. Anschließend daran werden alle Schichtungen von der Basisstation FLH zu der jeweiligen höher gelegenen Station ausgewertet.

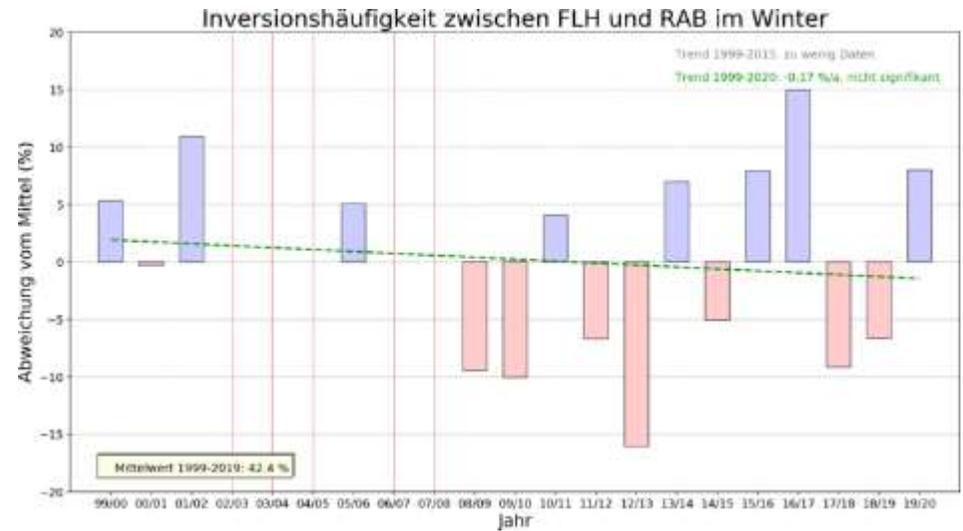
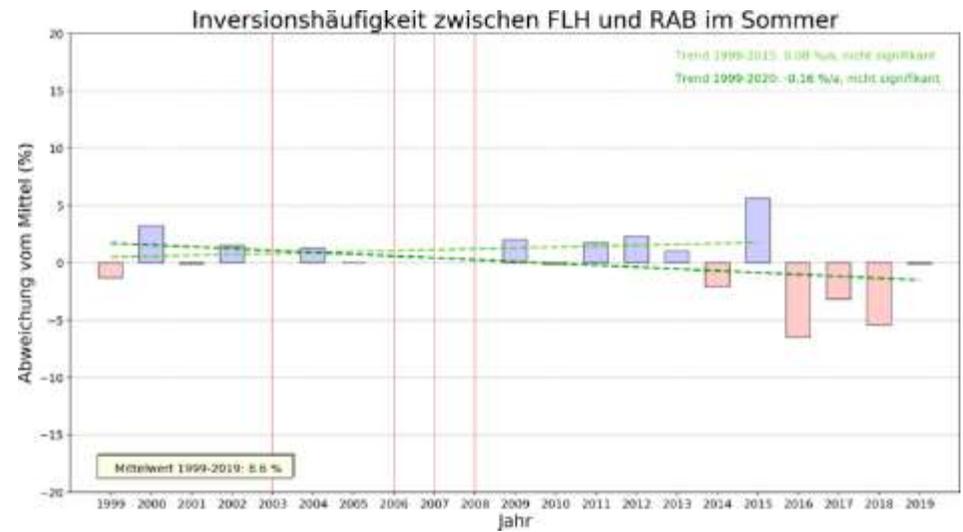


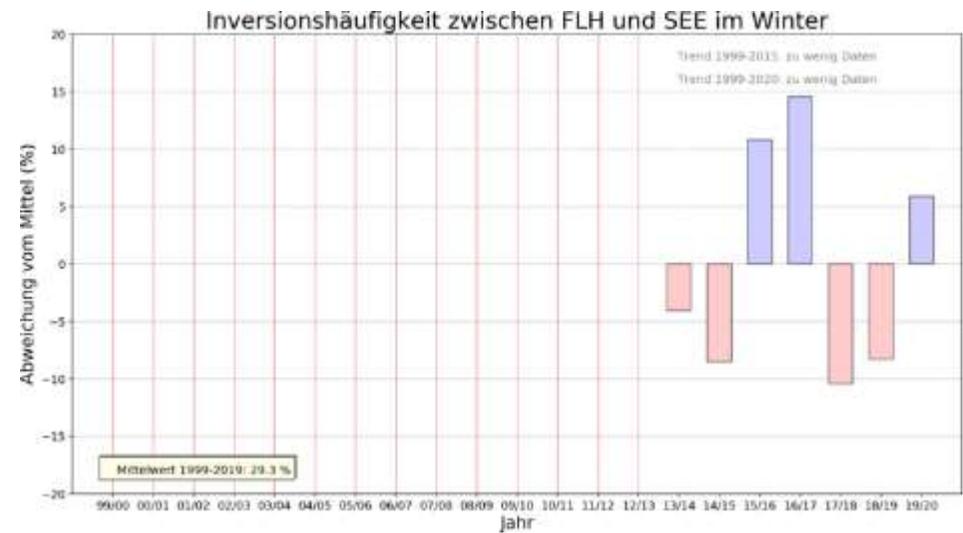


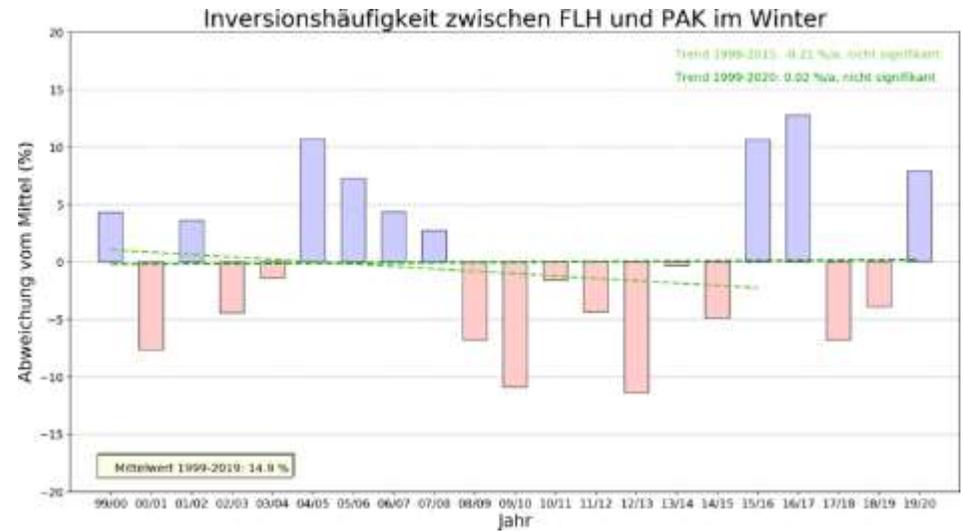
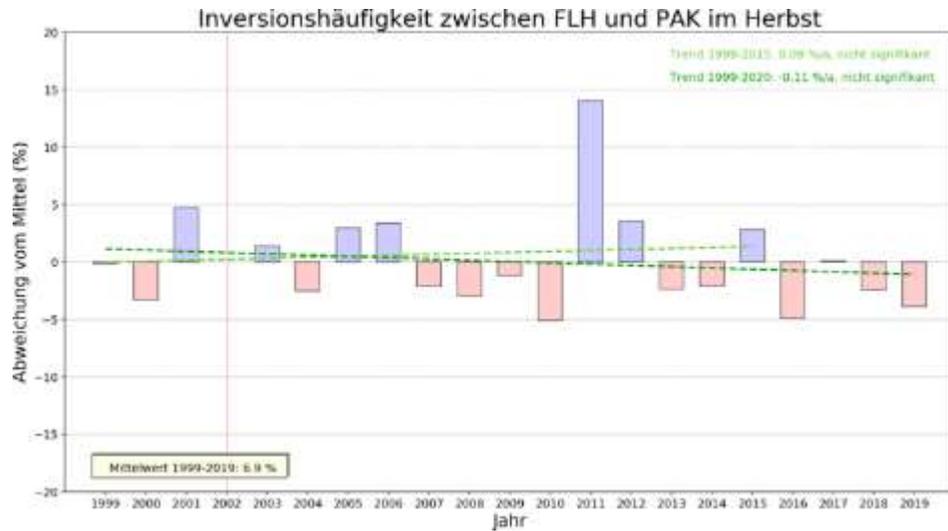




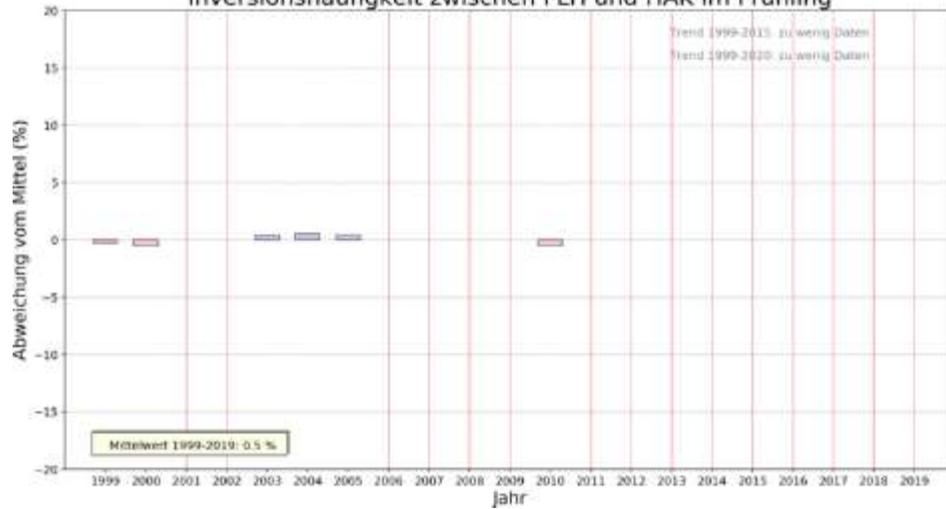




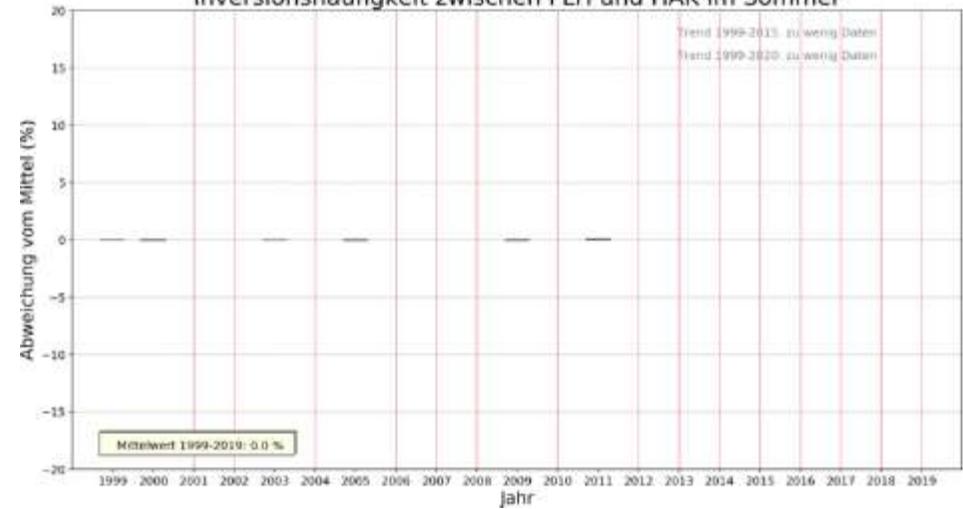




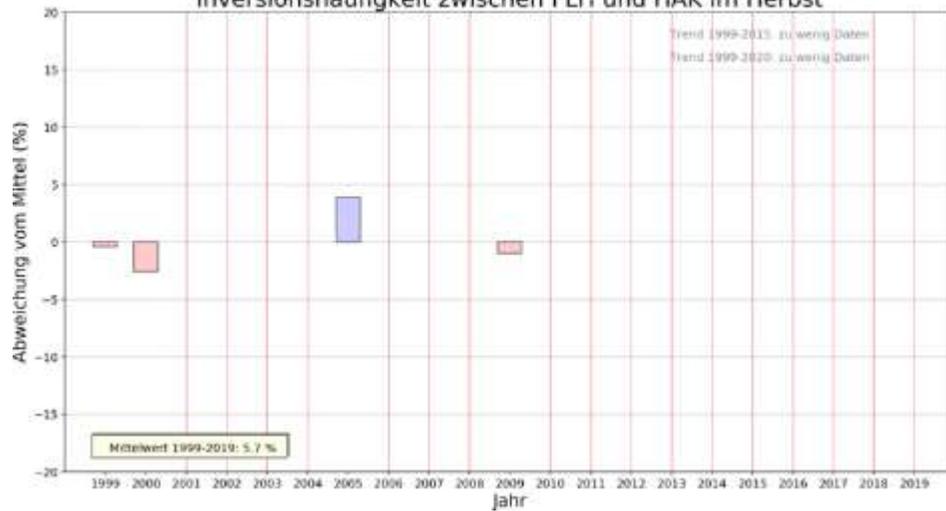
Inversionshäufigkeit zwischen FLH und HAK im Frühling



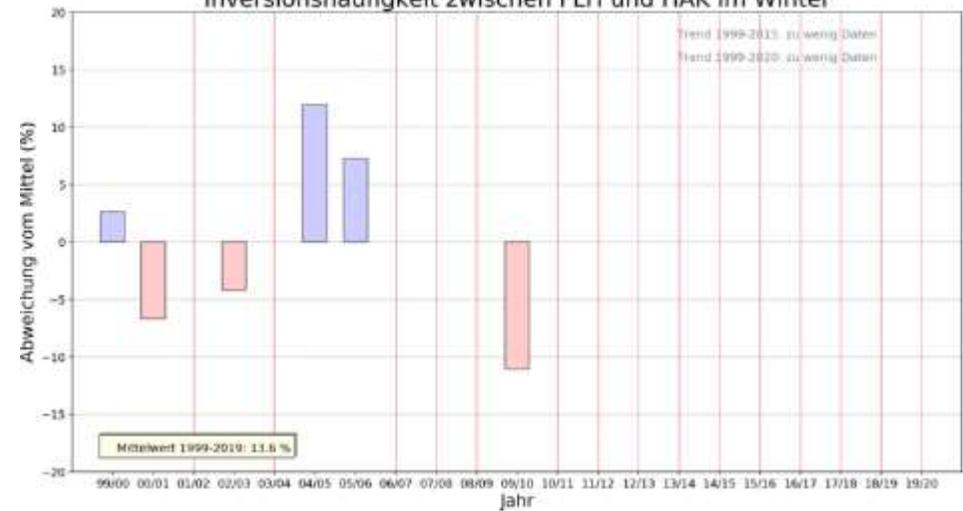
Inversionshäufigkeit zwischen FLH und HAK im Sommer



Inversionshäufigkeit zwischen FLH und HAK im Herbst



Inversionshäufigkeit zwischen FLH und HAK im Winter



5.2 Jährliche Zeitreihenplots

In den Abbildungen ab der folgenden Seite sind die jährlichen Zeitreihenplots in der Periode 1999 bis 2020 angeführt. Ausgewertet wurden die Schichten Flughafen – Hungerburg (Schichtdicke: 340 m), Hungerburg - Rastlboden (320 m) und Rastlboden – Patscherkofel (1010 m). Die Inversionsstärke wird über die in Abbildung 3 gezeigte Farbkodierung in Schritten von 0.5 K/100 m ausgedrückt.

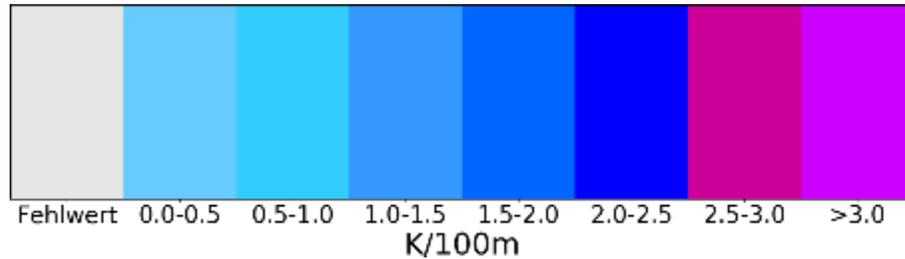


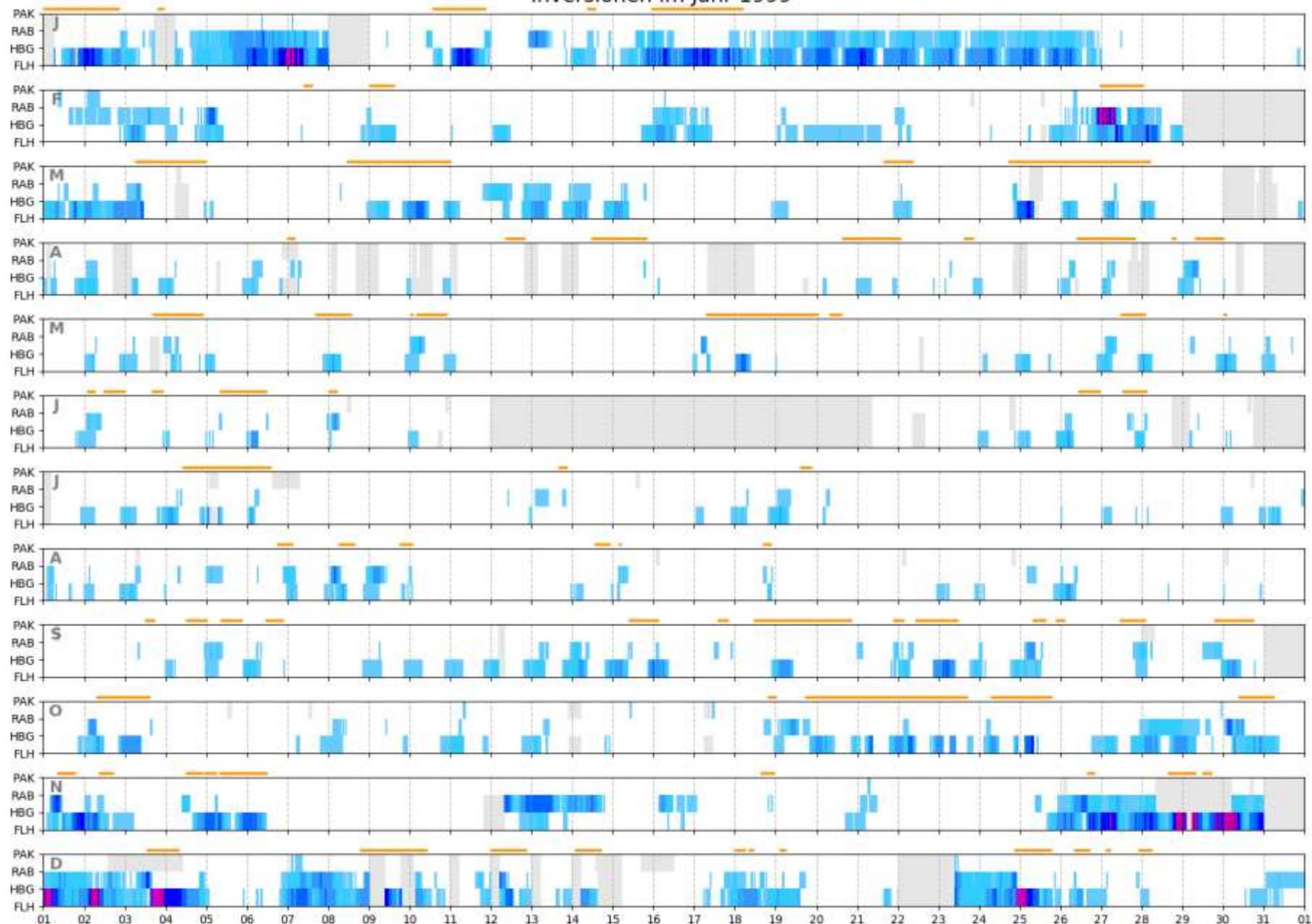
Abbildung 3: Farbskala für die Zeitreihenplots der Inversionen.

Fehlzeiten (bzw. Tage, die es in einem Monat nicht gibt) werden über einen grauen Balken sichtbar gemacht.

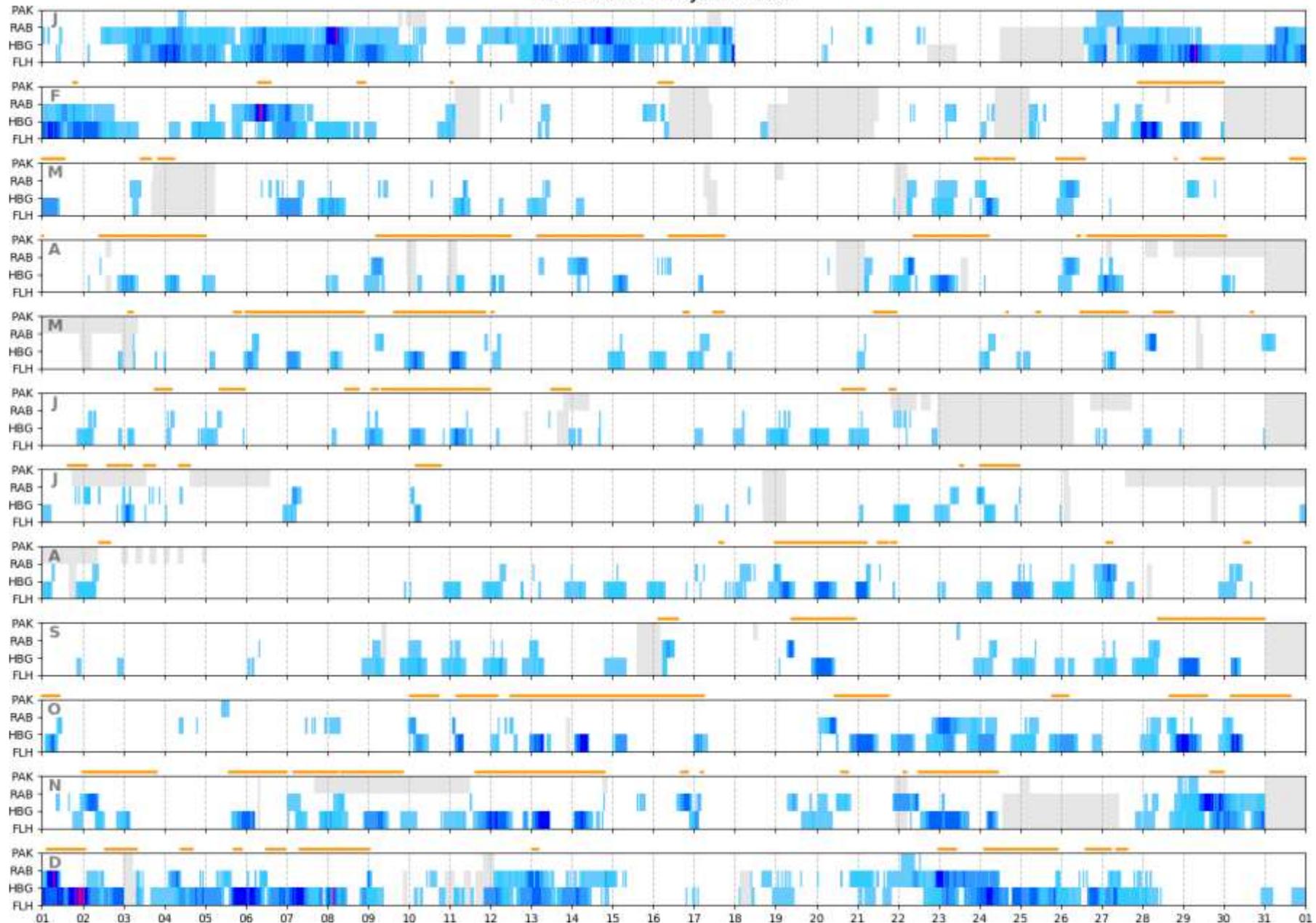
Über jedem Subplot sind Föhnzeiten im Wipptal in orange angegeben. Bis einschließlich 2018 basieren die Föhnzeiten auf einer Rekonstruktion anhand von ERA5-Daten, ab 2019 wurden die Föhnwahrscheinlichkeiten direkt aus den Messungen am Sattelberg und in Ellbögen abgeleitet, daher gibt es hier auch Fehlzeiten, die als graue Punkte bzw. Balken gekennzeichnet sind.

Genauere Informationen bzw. die Interpretation der Ergebnisse sind dem Kapitel 2 im Bericht zu entnehmen.

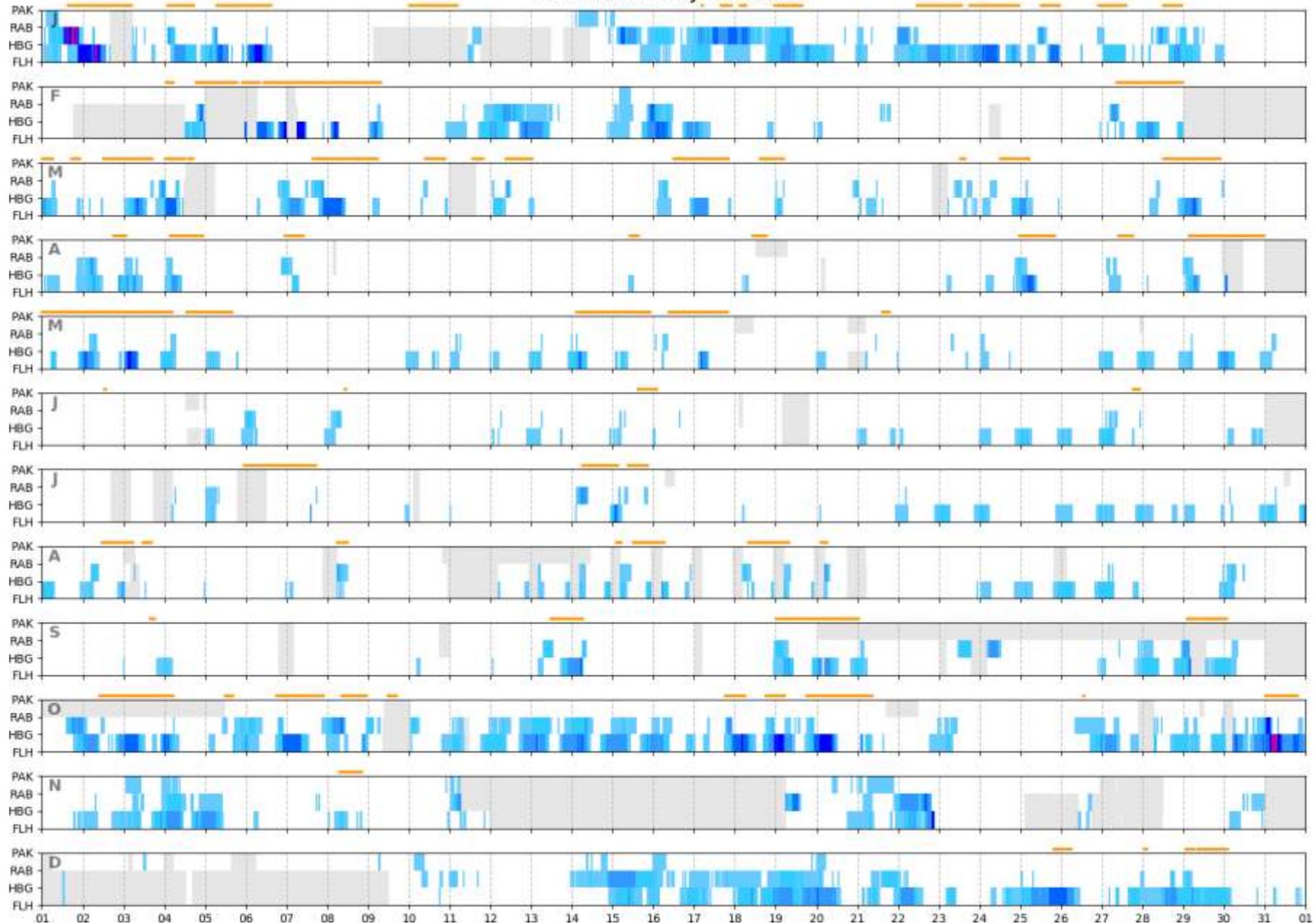
Inversionen im Jahr 1999



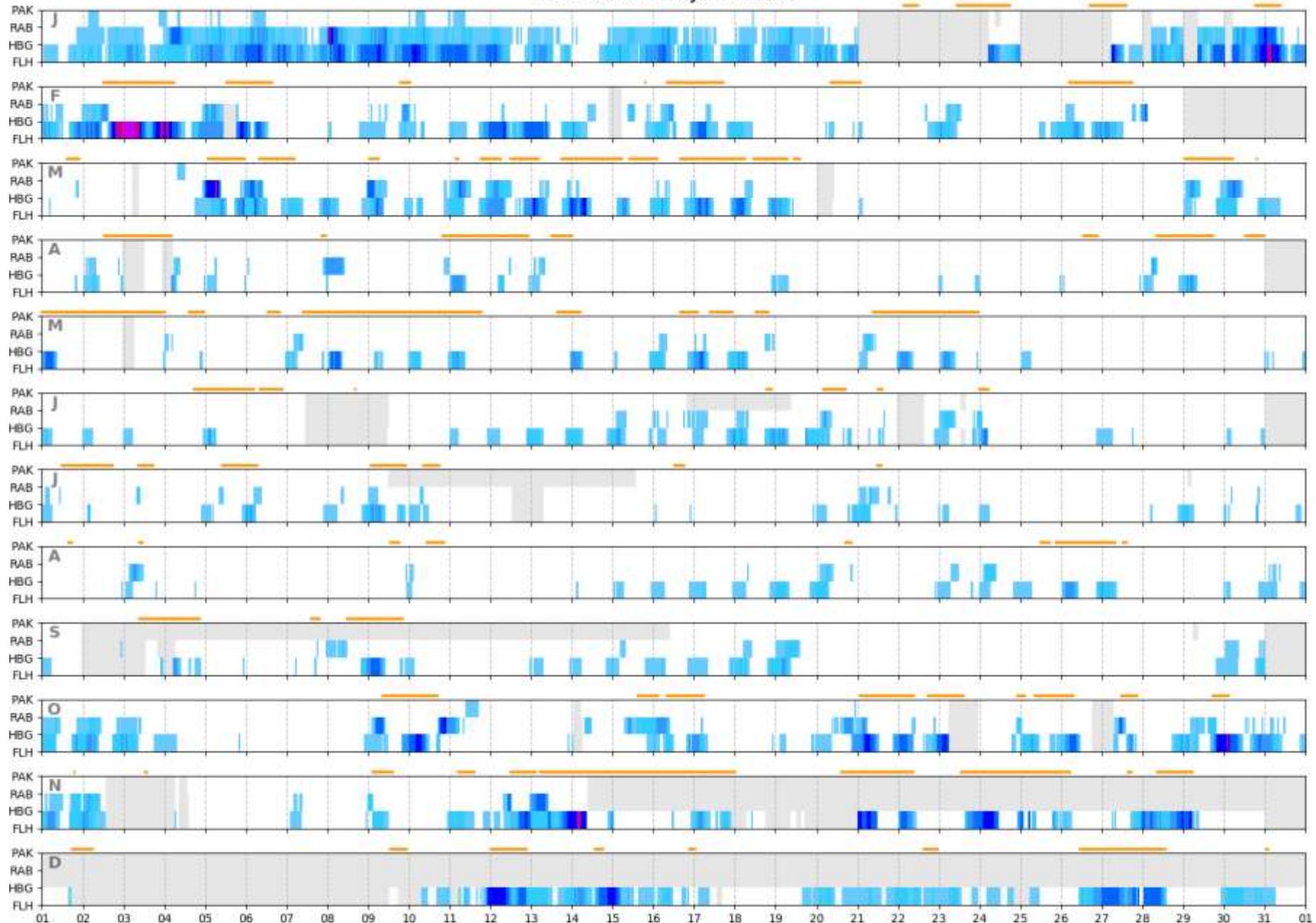
Inversionen im Jahr 2000



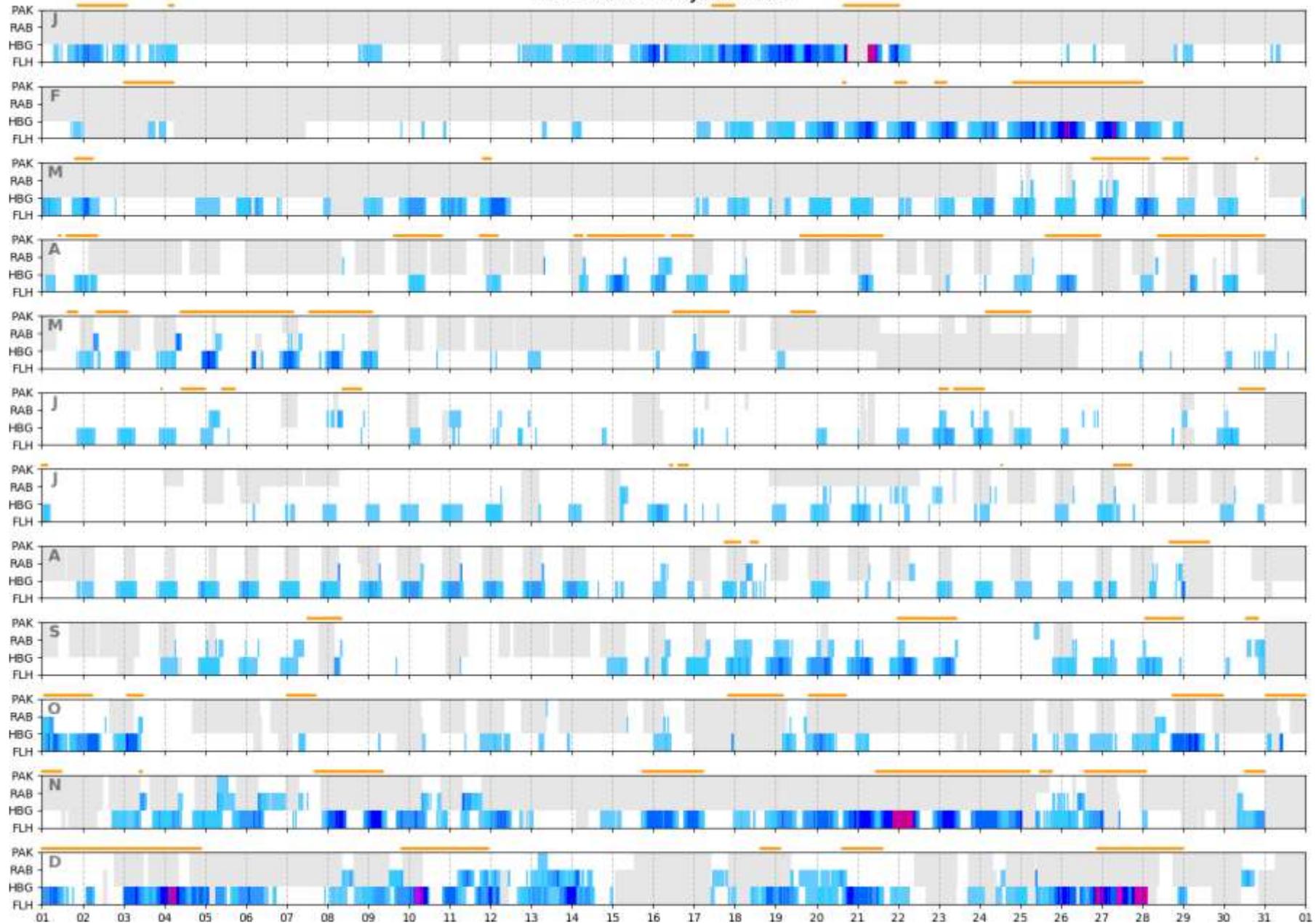
Inversionen im Jahr 2001



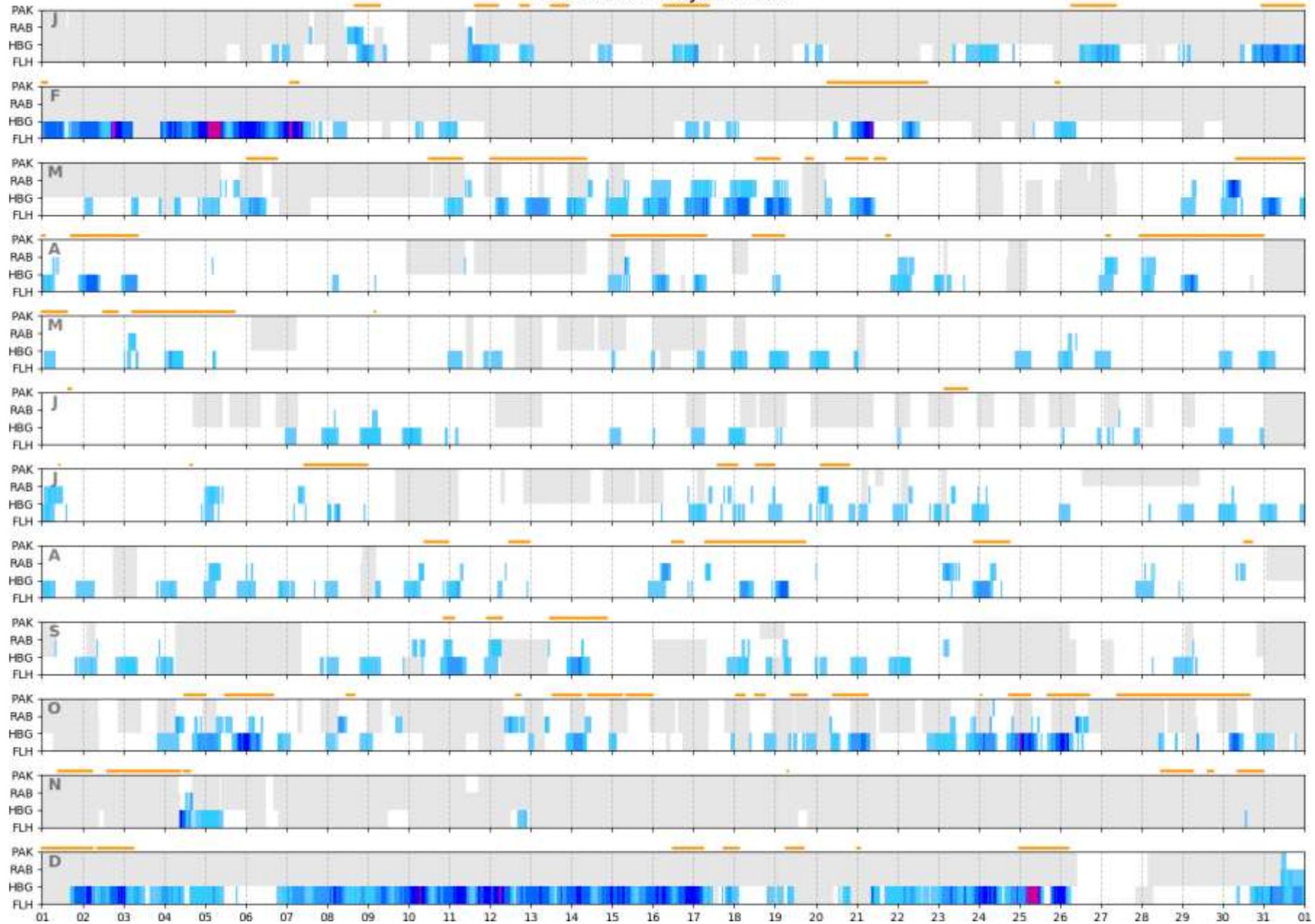
Inversionen im Jahr 2002



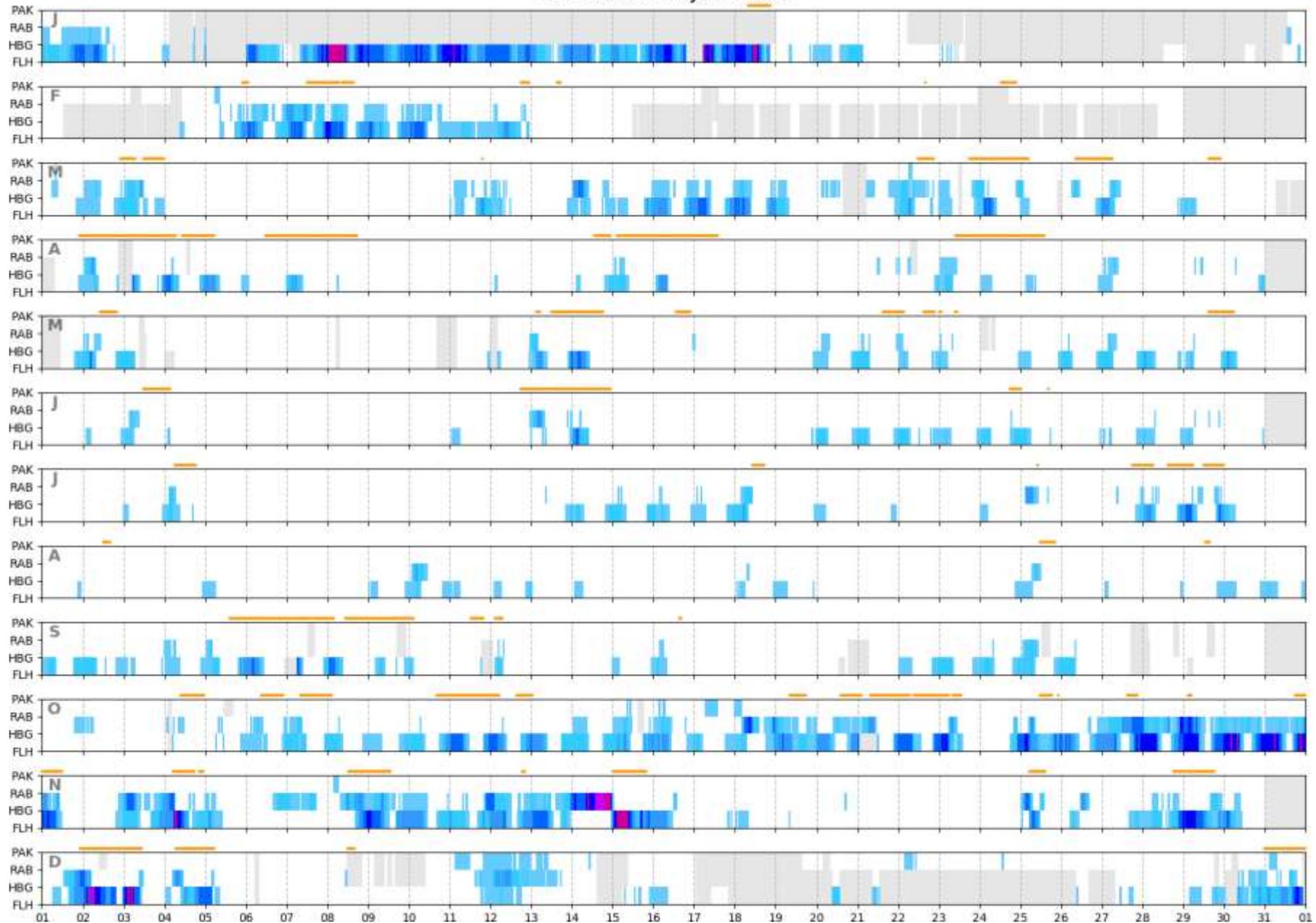
Inversionen im Jahr 2003



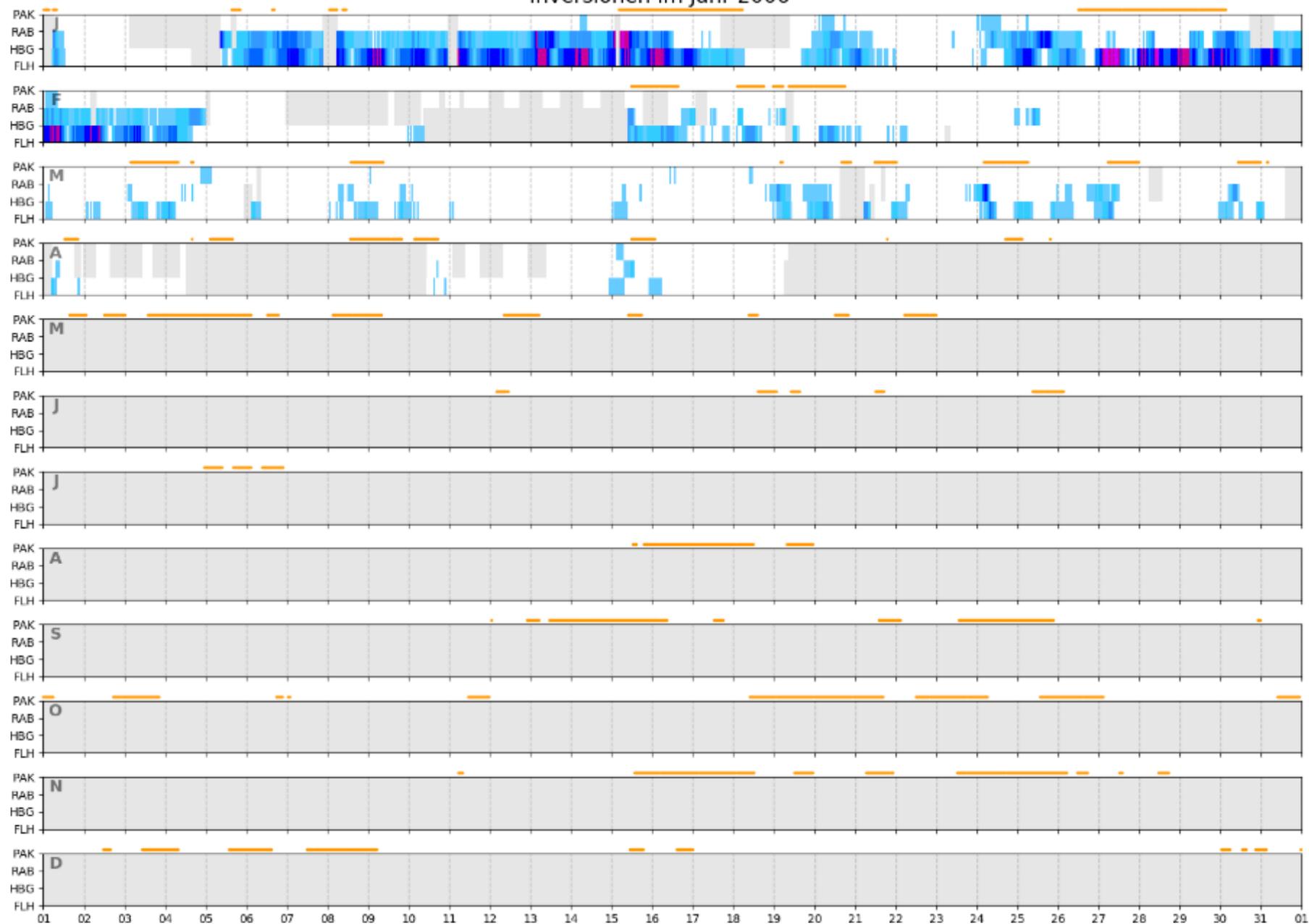
Inversionen im Jahr 2004



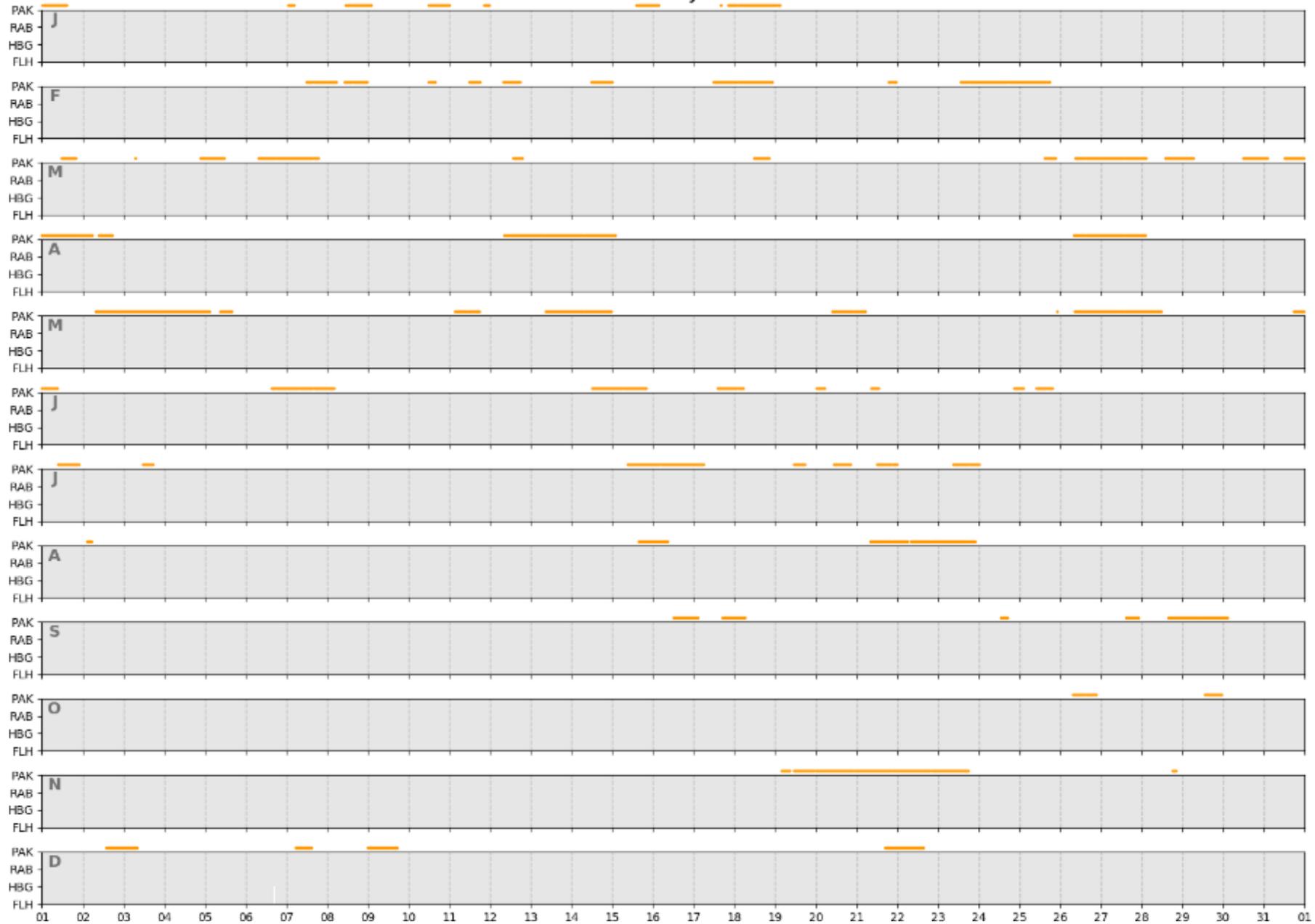
Inversionen im Jahr 2005



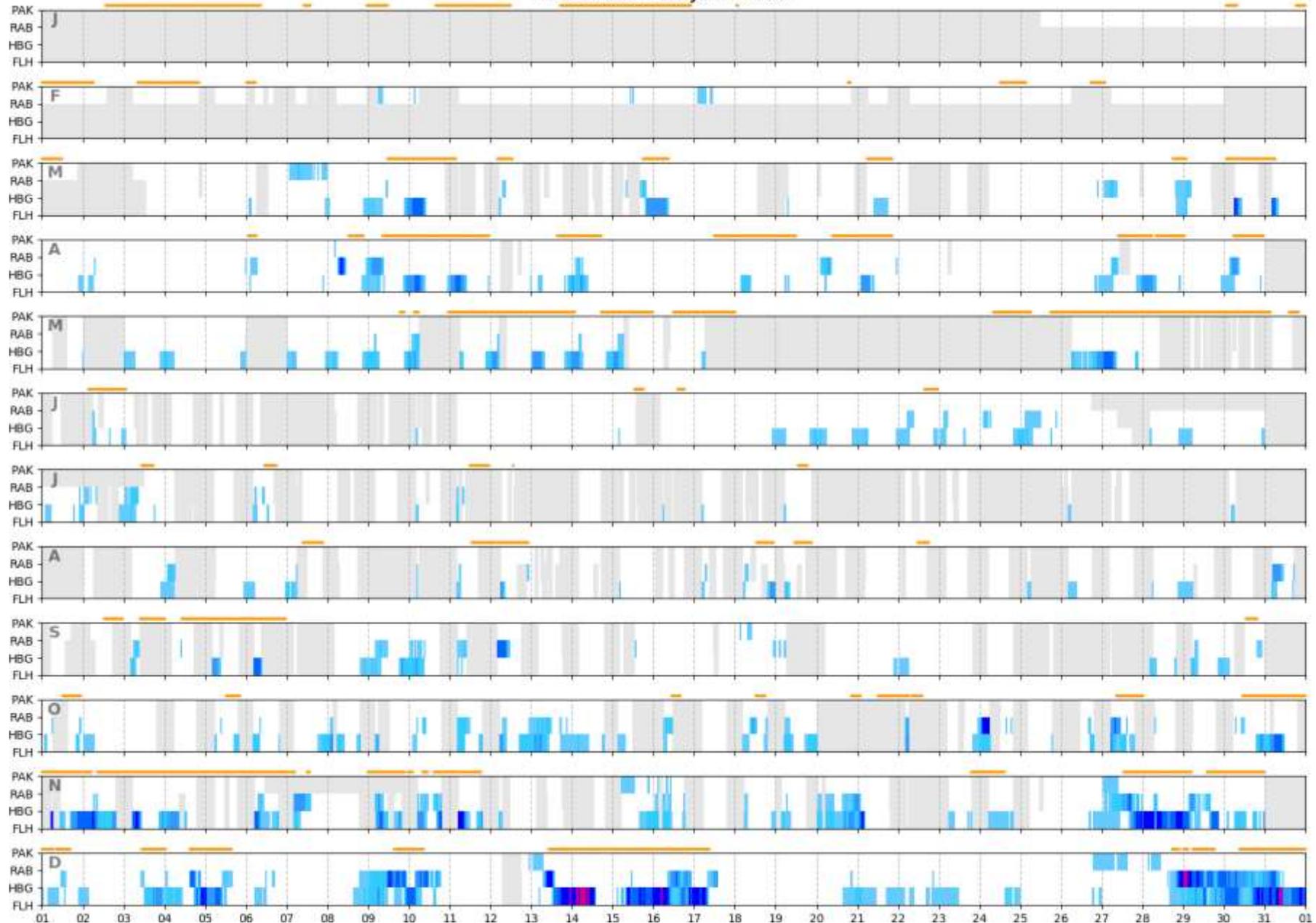
Inversionen im Jahr 2006



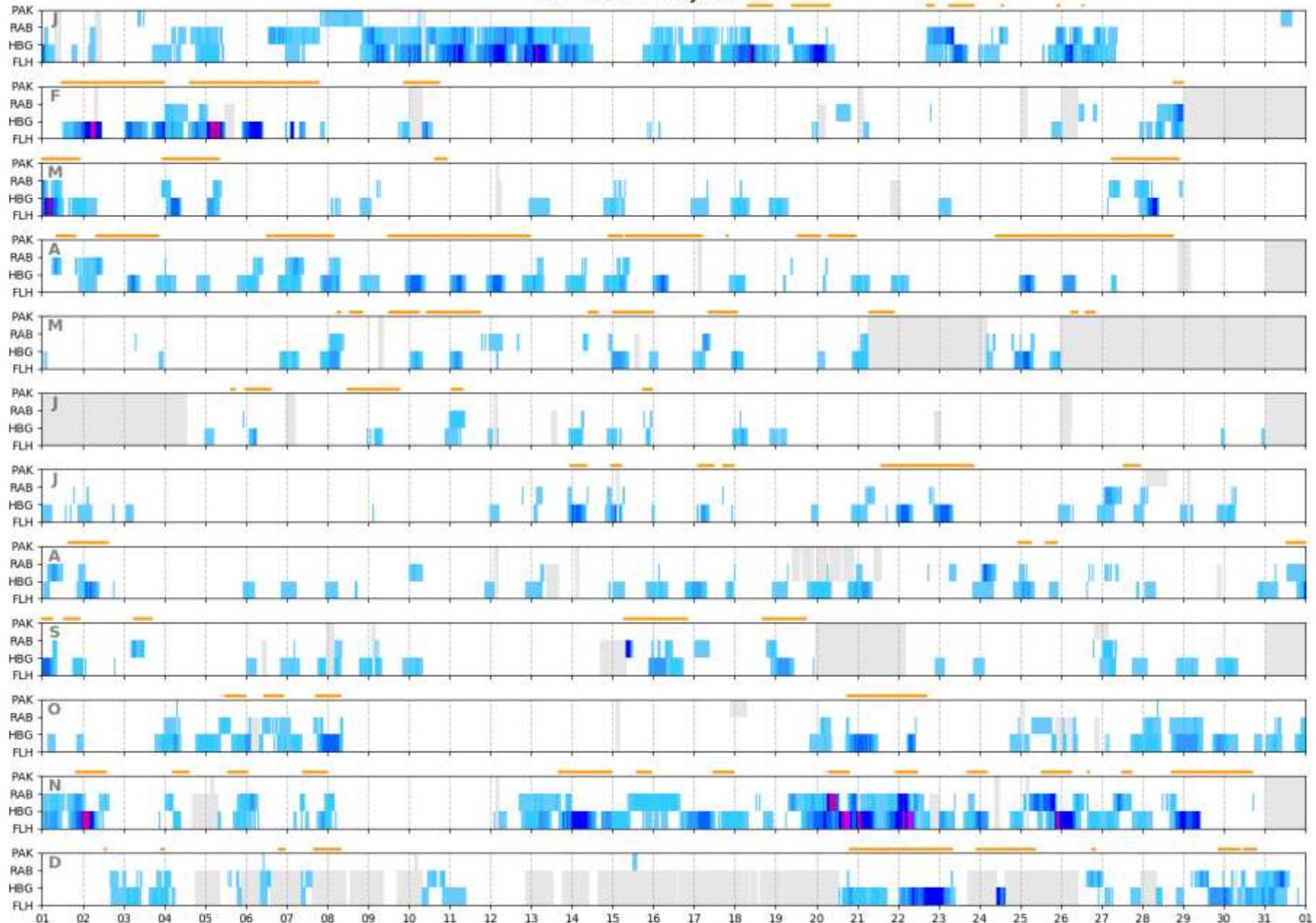
Inversionen im Jahr 2007



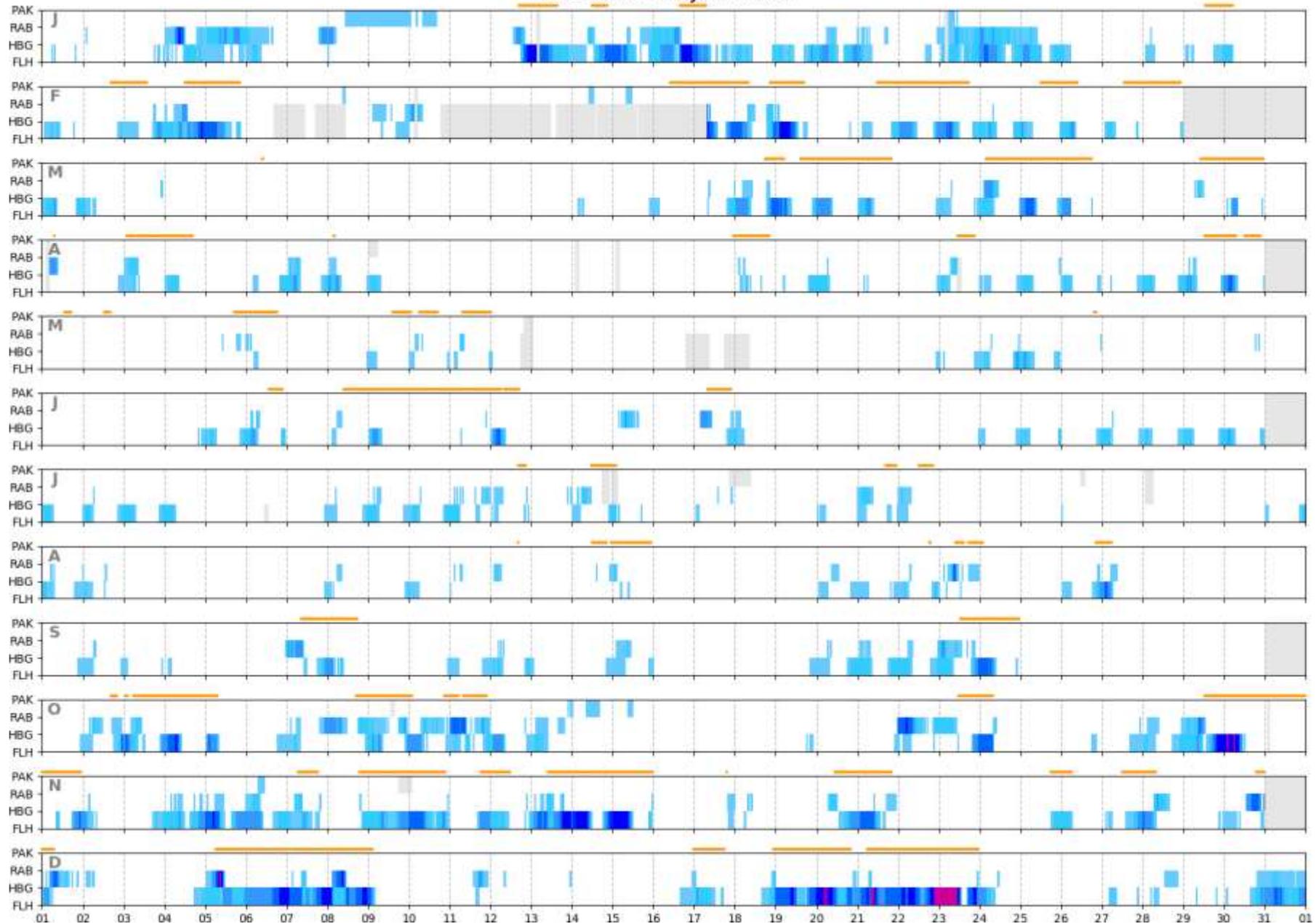
Inversionen im Jahr 2008



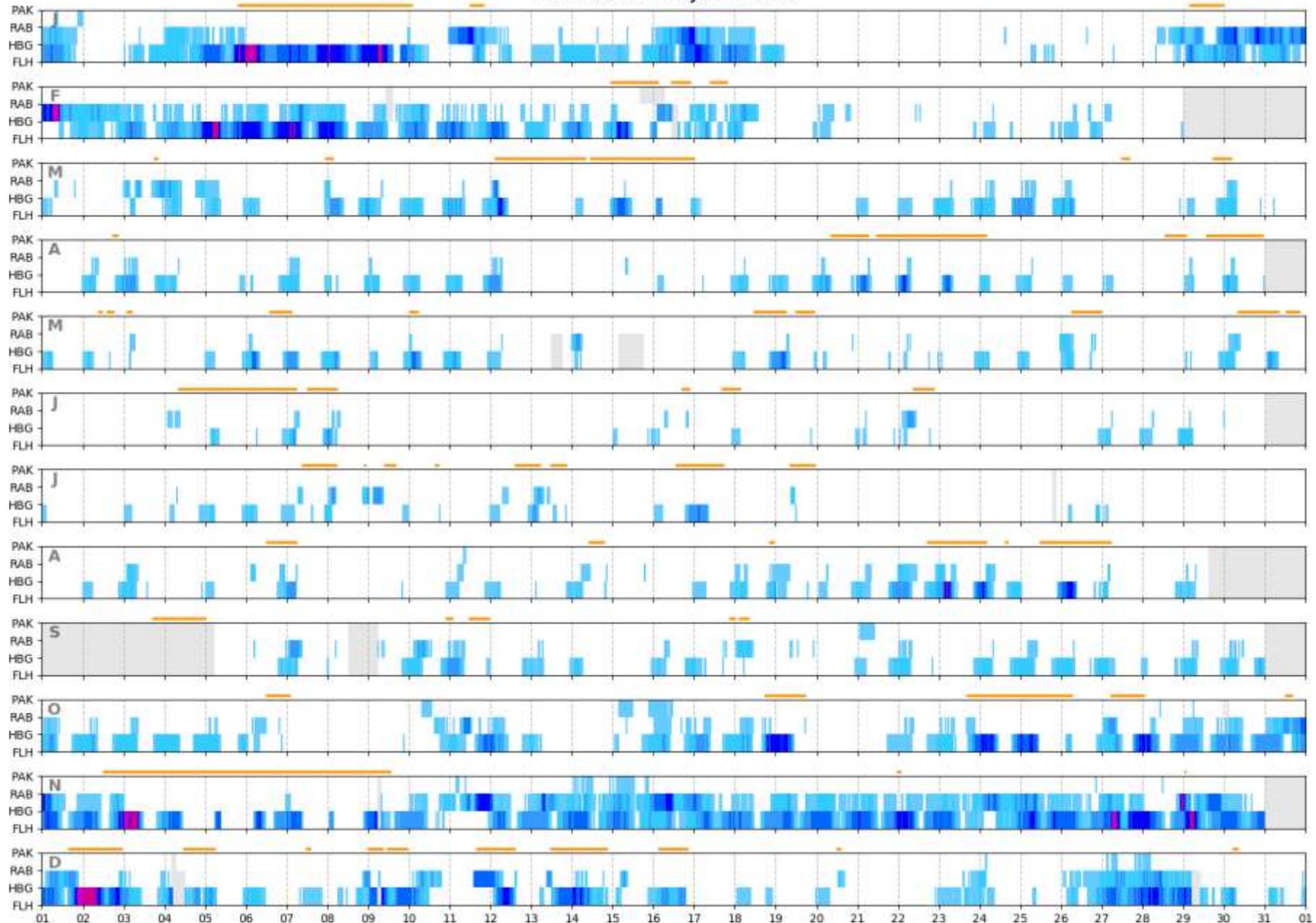
Inversionen im Jahr 2009



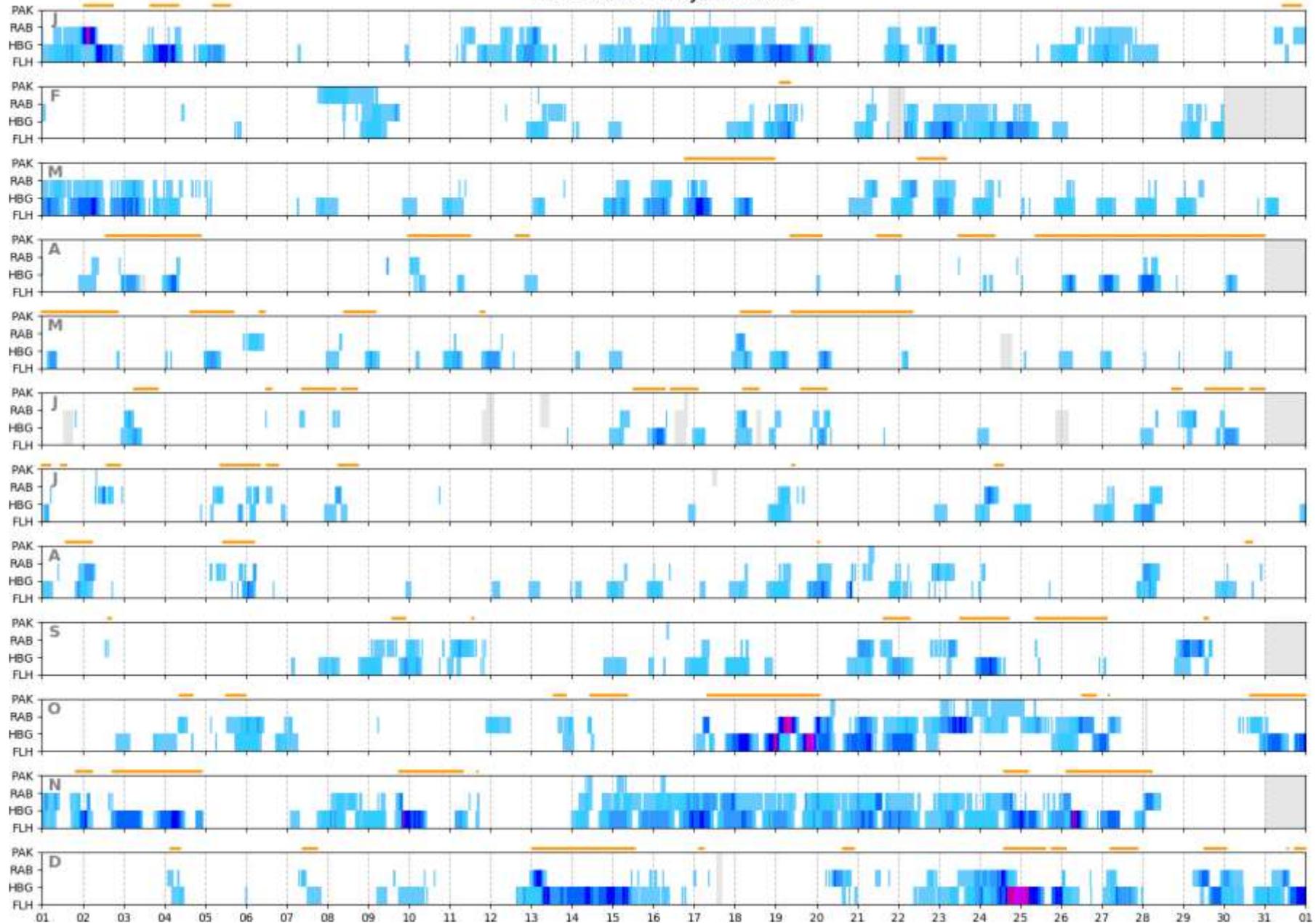
Inversionen im Jahr 2010



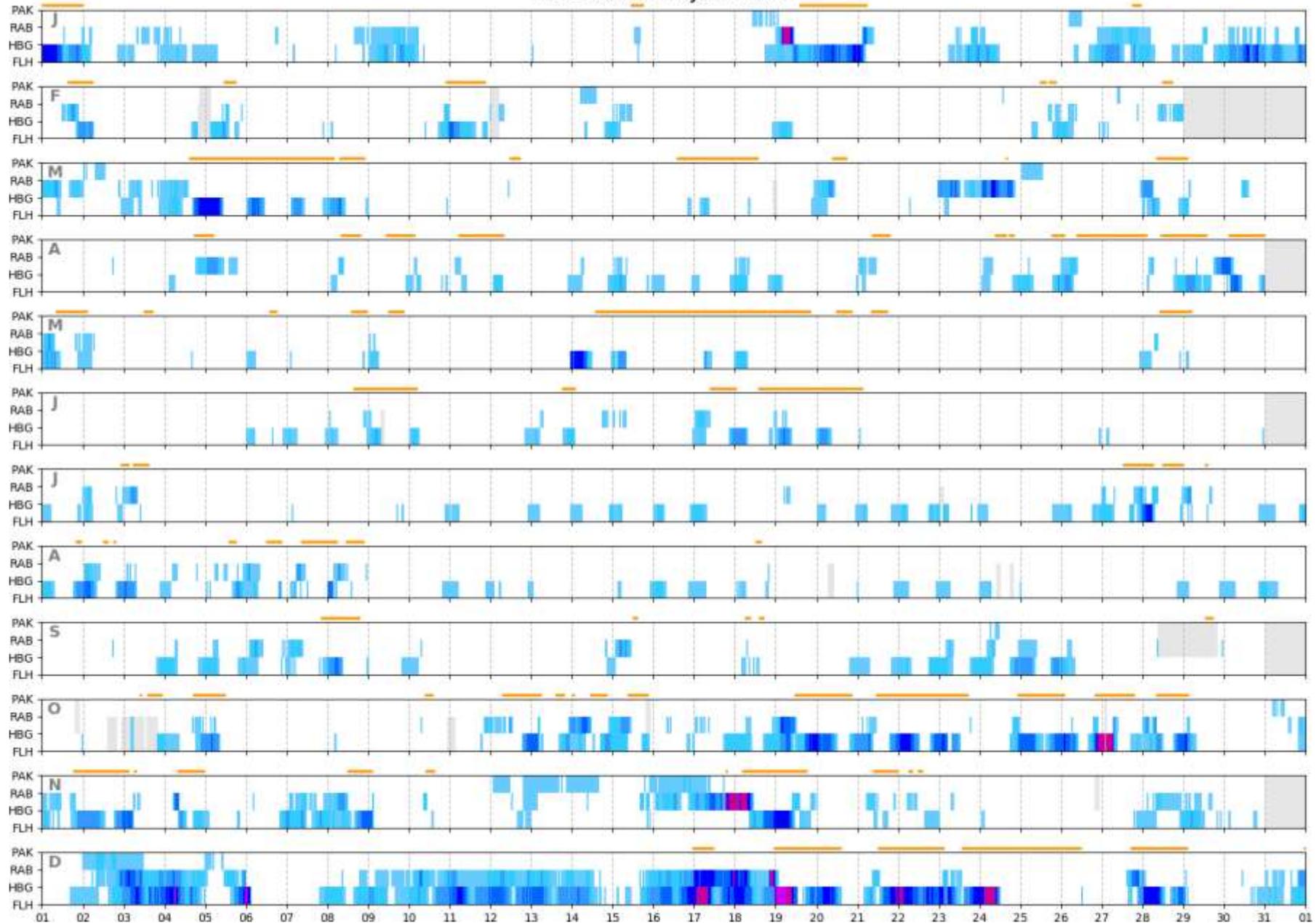
Inversionen im Jahr 2011



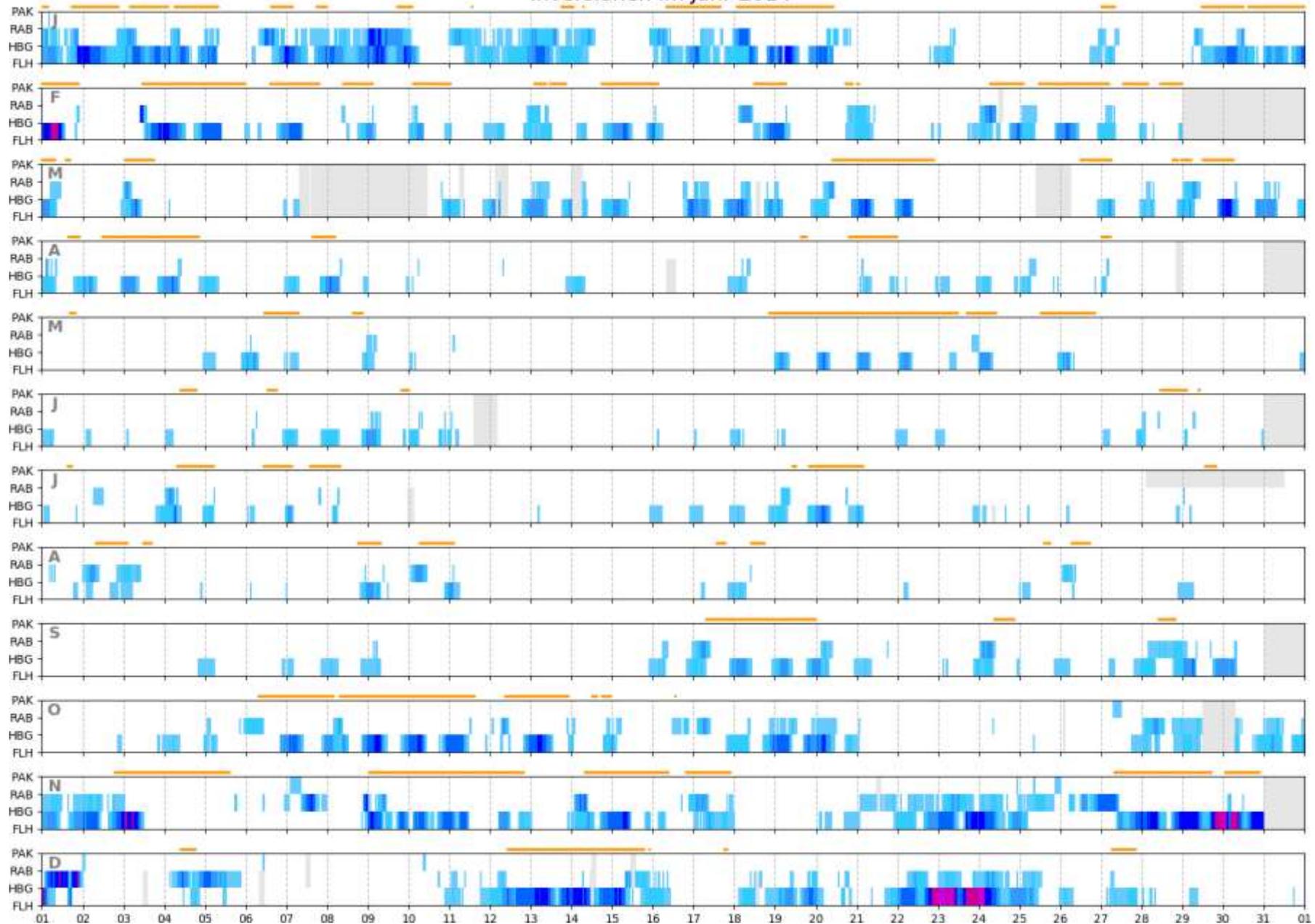
Inversionen im Jahr 2012



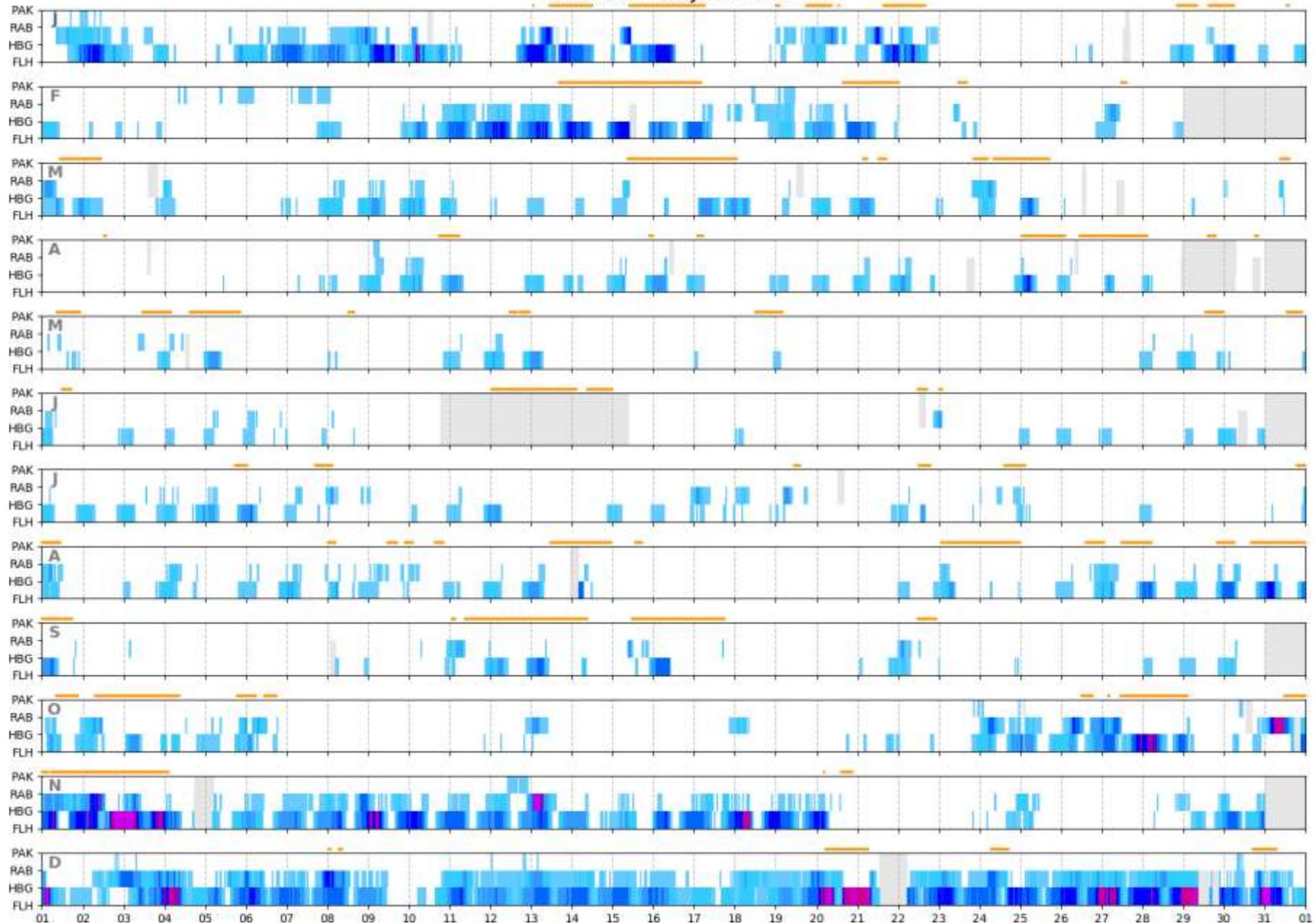
Inversionen im Jahr 2013



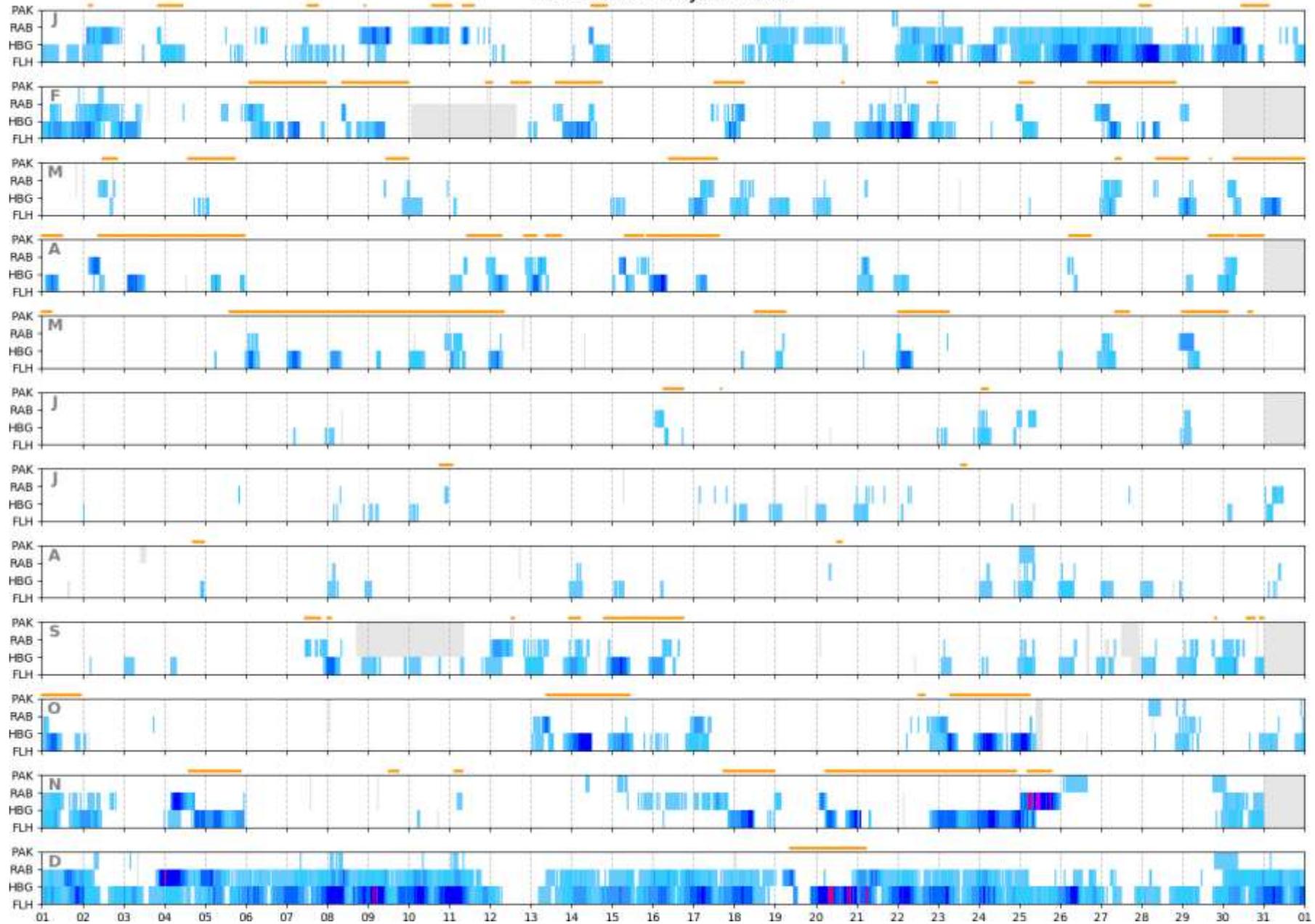
Inversionen im Jahr 2014



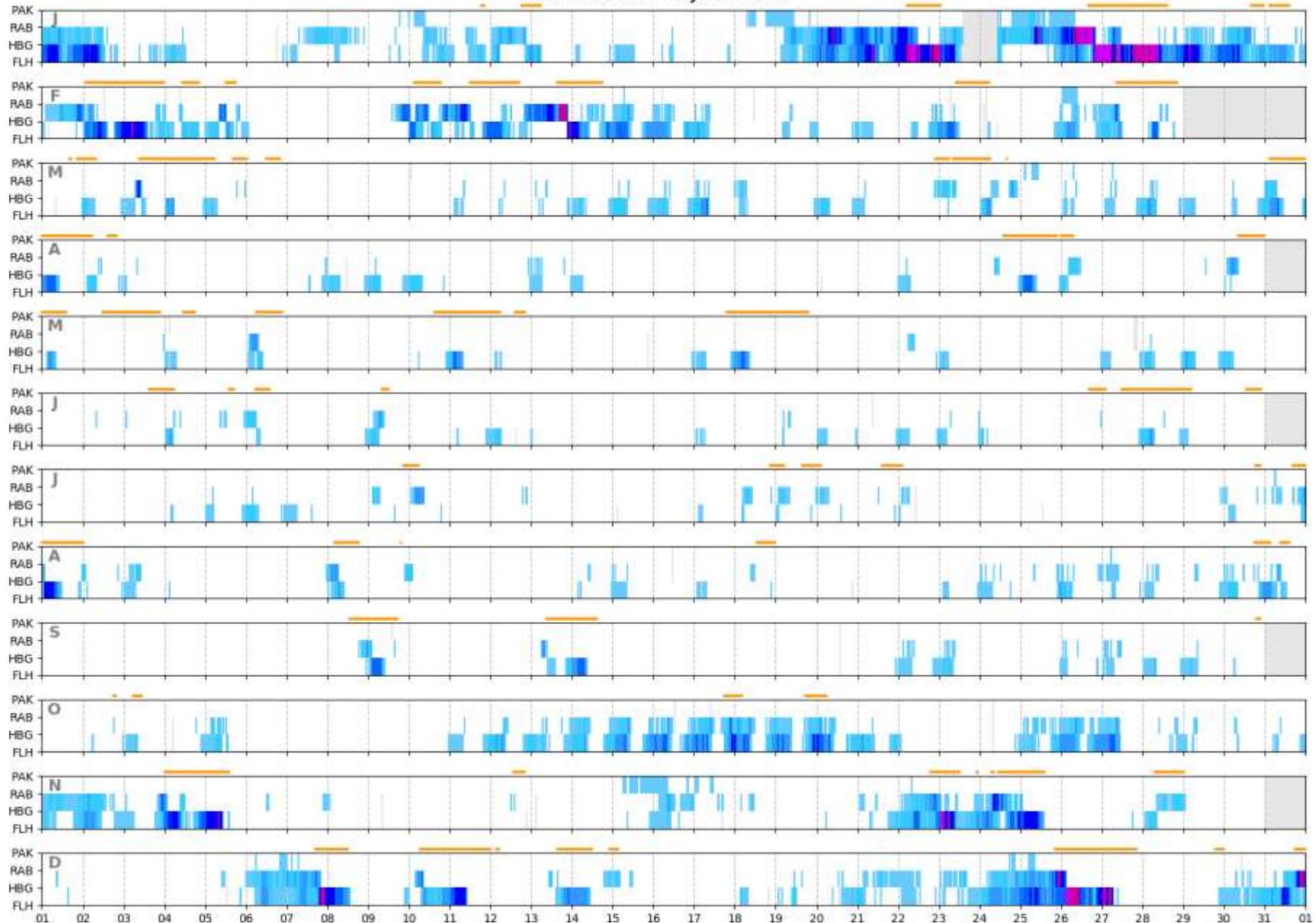
Inversionen im Jahr 2015



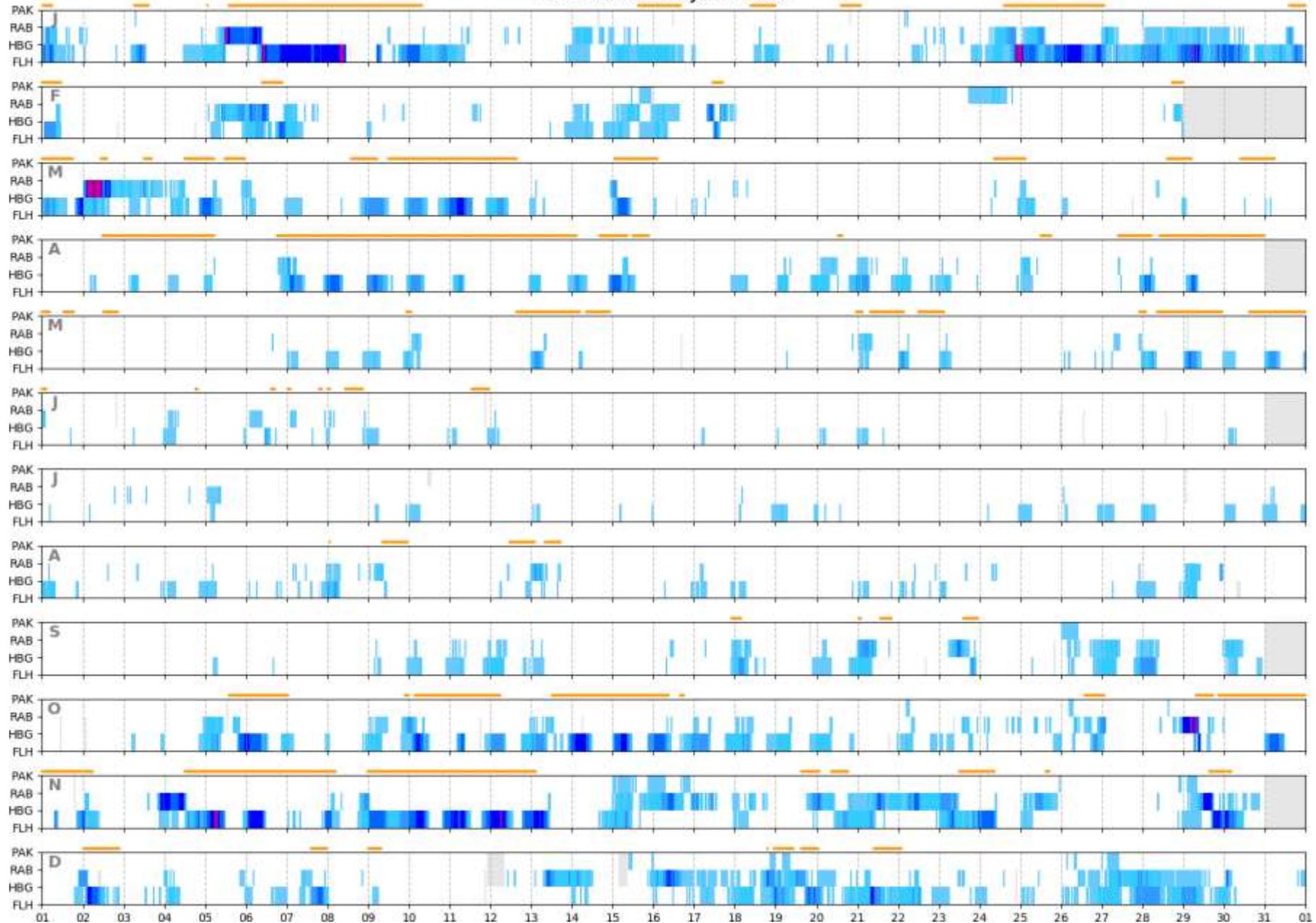
Inversionen im Jahr 2016



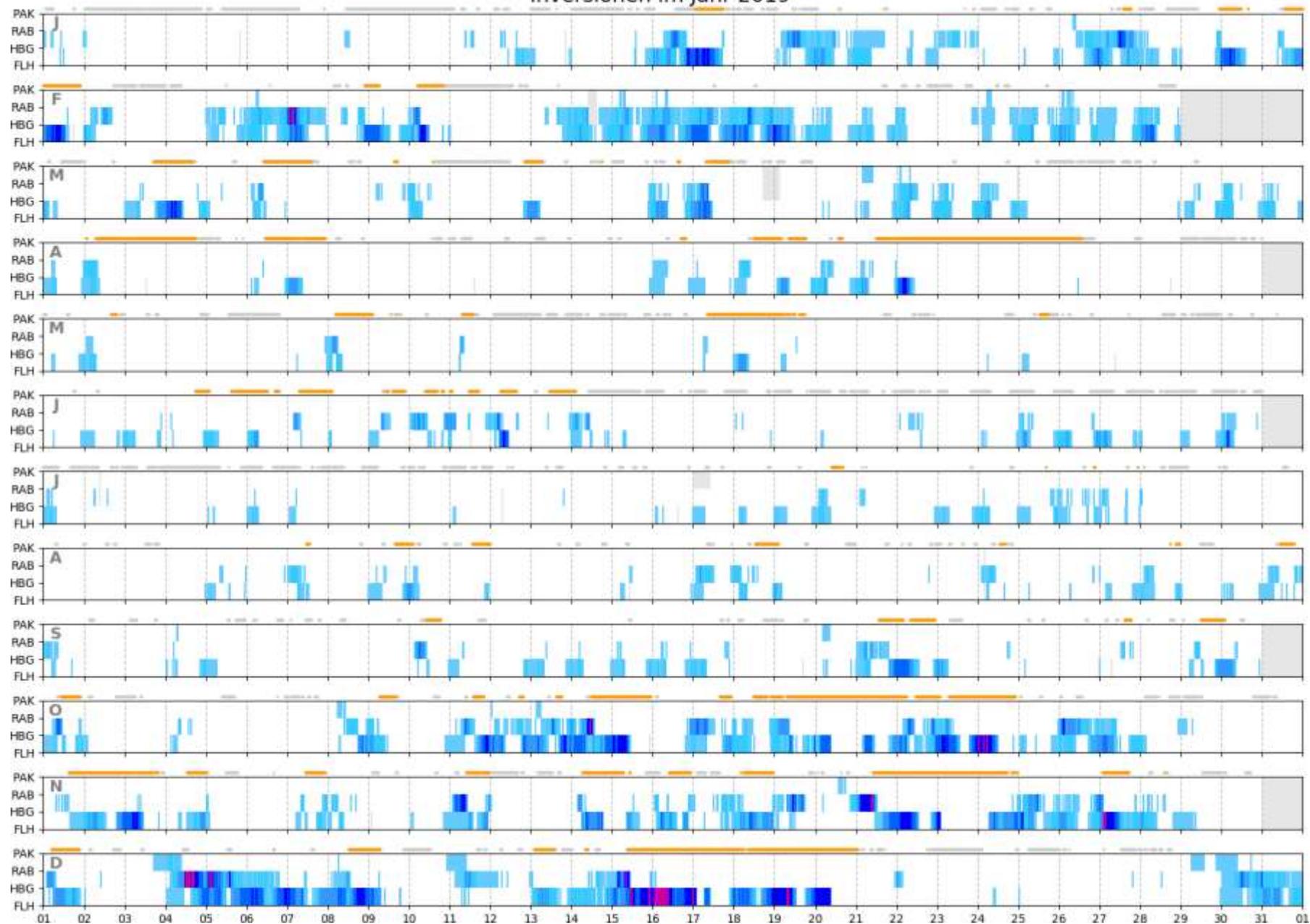
Inversionen im Jahr 2017



Inversionen im Jahr 2018



Inversionen im Jahr 2019



Inversionen im Jahr 2020

