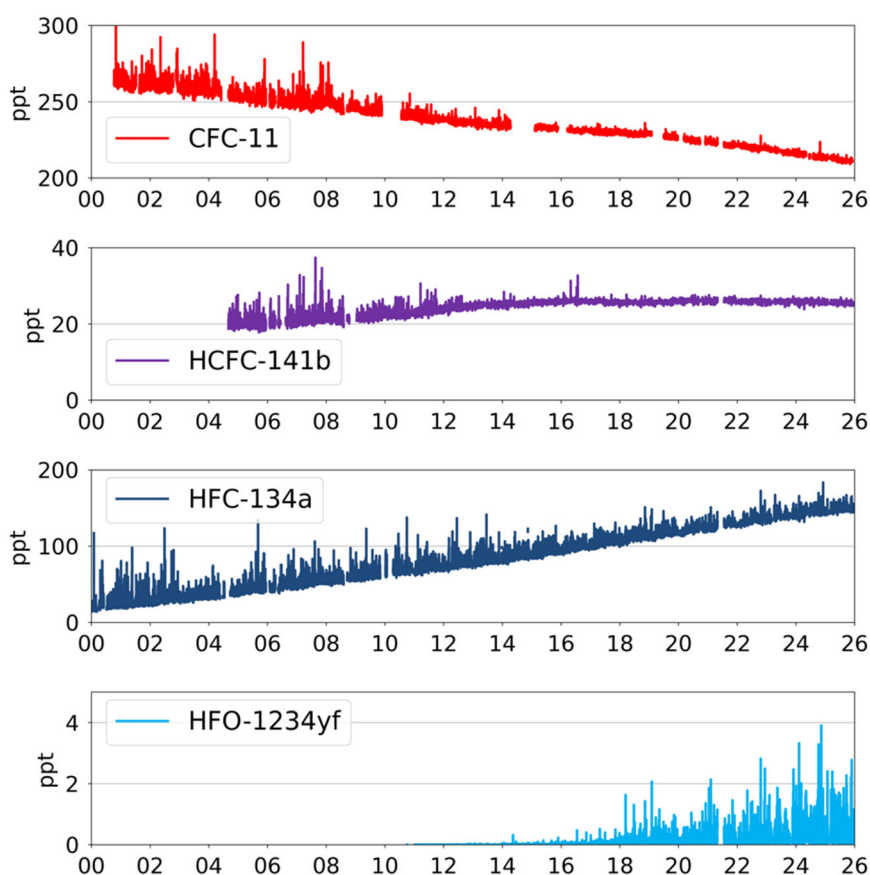


CLIMGAS-CH 2022-2026

Kontinuierliche Messung der Nicht-CO₂-Treibhausgase auf dem Jungfraujoch und in Beromünster

Schlussbericht

Juli 2026



Vier Generationen von halogenierten Substanzen zur Schaumstoffherstellung und für den Einsatz in Kühlanlagen: FCKW-11 (1. Generation, stark ozonschichtabbauend); HFCKW-141b (2. Generation, ozonschichtabbauend), HFKW-134a (3. Generation, treibhauswirksam). Diese Stoffe sind international wie auch national reguliert und werden daher ersetzt, unter anderem durch das HFO-1234yf (4. Generation).

Abteilung Luftfremdstoffe/Umwelttechnik, Empa, 8600 Dübendorf

Stefan Reimann, Martin K. Vollmer, Stephan Henne, Dominik Brunner, Martin Steinbacher, Livia Schneider und Lukas Emmenegger

Projekt mit finanzieller Unterstützung des Bundesamtes für Umwelt (BAFU)

Impressum

Projektpartner:

BAFU (Bundesamt für Umwelt), CH-3003 Bern

Abteilung Luftreinhaltung und Chemikalien

Abteilung Klima

Das BAFU ist ein Amt des Eidgenössischen Departements für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK).

Empa, Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt, Abteilung Luftfremdstoffe / Umwelttechnik, CH-8600 Dübendorf

Autoren des Berichts (Empa):

Stefan Reimann, Martin K. Vollmer, Stephan Henne, Dominik Brunner, Martin Steinbacher, Livia Schneider und Lukas Emmenegger

Begleitgruppe des Berichts (BAFU):

Vertreter der Abteilung Luftreinhaltung und Chemikalien und der Abteilung Klima

Hinweis:

Dieser Bericht wurde von der Empa in Zusammenarbeit mit der Begleitgruppe des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) verfasst. Für den Inhalt sind allein die Autoren des Berichts (Empa) verantwortlich. Diese Studie/dieser Bericht wurde vom BAFU finanziell unterstützt.

1. Zusammenfassungen (d/f/e)	5
1.1 Zusammenfassung	5
1.2 Résumé	8
1.3 Summary	11
2. Einleitung	14
2.1 Kontext der Messungen	14
2.2 Stationen zur Messung von Nicht-CO ₂ -Treibhausgasen in der Schweiz	14
2.2.1 Jungfrauoch	15
2.2.2 Beromünster	15
2.3 Internationale Einbettung der Schweizer Messungen von Nicht-CO ₂ -Treibhausgasen	16
2.4 Ansätze für die Modellierung der Emissionen	17
3. Kontinuierliche Treibhausgas-Messungen in der Schweiz	19
3.1 Halogenierte Gase	19
3.1.1 Konzentrationen und Trends auf dem Jungfrauoch	19
3.1.2 Hydrofluorkohlenwasserstoffe (HFKW) in Europa	23
3.1.3 Kurzlebige ungesättigte HFKW und HFCKW auf dem Jungfrauoch	28
3.1.4 Inhalationsanästhetika (Flurane) auf dem Jungfrauoch	29
3.1.5 Schwefelhexafluorid (SF ₆) und perfluorierte Verbindungen (PFKW) in Europa	30
3.1.6 Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW) und Halone in Europa	32
3.1.7 Hydrofluorchlorkohlenwasserstoffe (HFCKW) in Europa	34
3.1.8 Chlorige Lösemittel in Europa	37
3.1.9 CH ₃ Br (Methylbromid) und SO ₂ F ₂ (Sulfurylfluorid) in Europa	39
3.1.10 VOCs in Europa	40
3.2 Kohlendioxid (CO ₂), Methan (CH ₄), Lachgas (N ₂ O) und Kohlenmonoxid (CO)	41
4. Modellierung der Schweizer Emissionen	44
4.1 Abschätzung der Schweizer Emissionen von halogenierten Substanzen	44
4.1.1 In den Klimakonventionen aufgeführte halogenierte Treibhausgase	46
4.1.2 Anästhetika	50
4.1.3 Kurzlebige ungesättigte HFKW (HFO) und HFCKW (HCFO)	50
4.1.4 Ozonschichtabbauende, im Montrealer Protokoll reglementierte Verbindungen	51
4.1.5 Chlorige Lösungsmittel	54
4.1.6 Zusammenfassende Klimawirksamkeit der Schweizer Emissionen	55
4.2 Abschätzung der Schweizer Emissionen von Methan und Lachgas	56
4.2.1 Methan	60
4.2.2 Lachgas	64
4.2.3 Ausblick	67
5. Abschätzung der europäischen Quellgebiete	68
5.1 Methode	68
5.2 Abschätzung europäischer Quellgebiete	69
6. Abschätzung globaler HFKW Emissionen (Kigali-Index)	78
7. Publikationen CLIMGAS-CH (2021-2026)	80
8. Appendix	84
8.1 Analytische Details der Messungen	84
8.2 Kalibration, Messpräzision	85
8.3 Methode zur Abschätzung der Schweizer Emissionen (mit CO als Tracer)	86
8.4 Glossar	89

1. Zusammenfassungen (d/f/e)

1.1 Zusammenfassung

Der durch den Menschen verursachte Anstieg der atmosphärischen Treibhausgase hat bereits zu einer messbaren Erwärmung der bodennahen Atmosphäre und der Erdoberfläche beigetragen. Diese Erwärmung soll in der Zukunft gemäss den Zielen des Übereinkommens von Paris (Dezember 2015) auf +1.5°C bis höchstens +2.0°C beschränkt werden. Dafür schlagen die Länder Emissionsminderungen, sogenannte „Nationally Determined Contributions“ (NDCs) vor, damit die vereinbarte Temperaturobergrenze nicht überschritten wird. Das Ziel der Schweiz ist es, die nationalen Treibhausgasemissionen bis 2030 um 50 % gegenüber 1990 zu reduzieren, wobei ein Teil der Reduktionen im Ausland erzielt werden soll, zum Beispiel durch sogenannte Internationally Transferred Mitigation Outcomes (ITMOs).

Neben Kohlenstoffdioxid (CO₂), dem wichtigsten vom Menschen direkt beeinflussten Treibhausgas, tragen auch anthropogene Nicht-CO₂-Treibhausgase zur globalen Erwärmung bei. Gemessen in CO₂-Äquivalenten (Zeithorizont 100 Jahre), betrug im Jahr 2024 der Anteil von Methan (CH₄) am gesamten schweizerischen Ausstoss von Treibhausgasen rund 12 %, derjenige von Lachgas (N₂O) rund 7 %. Die Emissionen der halogenierten Treibhausgase trugen 2024 etwa 3% bei. Diese Emissionen werden unter den Klimarahmenkonventionen der Vereinten Nationen rapportiert. Nebst der Erderwärmung tragen etliche der halogenierten organischen Substanzen, wie z.B. die chlorhaltigen FCKW und die bromhaltigen Halone, zum Abbau der Ozonschicht in der Stratosphäre bei („Ozonloch“). Die Herstellung und der Verbrauch dieser ozonschichtabbauenden Substanzen wurden durch das Montrealer Protokoll verboten, was zu einer signifikanten, wenn auch langsamen Verbesserung geführt hat. Das Montrealer Protokoll wurde im Jahr 2016 durch das sogenannte Kigali Amendment erweitert, und so unterliegen seit 1. Januar 2019 auch die nicht-ozonschichtabbauenden HFKW dem Montrealer Protokoll. Dieses sieht für die HFKW eine schrittweise Verminderung der Herstellung und des Verbrauchs in den nächsten zwei Jahrzehnten vor.

Dieser Bericht behandelt die langjährigen Messungen von Nicht-CO₂-Treibhausgasen (halogenierten organischen Substanzen, Methan und Lachgas) auf dem Jungfraujoch und in Beromünster sowie die Verwendung dieser Messungen zur Abschätzung von Emissionen aus der Schweiz und umliegenden Ländern („top-down“ Methode). Dies ergänzt die entsprechenden Treibhausgasinventare, welche auf Aktivitätsdaten und Emissionsfaktoren basieren („bottom-up“ Methode). Die Messstation auf dem Jungfraujoch (3580 m.ü.M.) ist für die top-down Abschätzung der schweizerischen und europäischen Emissionen geeignet, da sie abseits von lokalen Emissionsquellen liegt, und regelmässig von Luftmassen beeinflusst wird, welche mit Emissionen aus den umliegenden Gebieten belastet sind. Die Messungen in Beromünster sind dazu eine gute Ergänzung, weil die Station, zusammen mit anderen tiefer gelegenen Standorten, sehr gut geeignet ist, die Schweizer Emissionen von Methan und Lachgas auch räumlich aufgelöst abzuschätzen.

Die langjährigen Messungen der halogenierten Substanzen zeigen den Einfluss des Montrealer Protokolls auf die Konzentrationsverläufe dieser ozonschichtabbauenden und klimawirksamen Gase (Abbildung S1). Nach dem Ersatz der FCKWs mit HFCKWs gingen zuerst die Konzentrationen von FCKW-11 zurück, anschliessend diejenigen von HFCKW-141b. Das als Ersatzsubstanz gebrauchte, nicht-ozonschichtabbauende HFKW-134a nimmt infolge dieser Entwicklung weiterhin deutlich zu. Da diese HFKWs jedoch einen erheblichen Einfluss auf das Klima haben, werden sie in den nächsten Jahren zunehmend durch die neuen kurzlebigen HFOs (Hydrofluorolefine) ersetzt. Dies führt bereits seit 2012 zu messbaren Konzentrationen von HFO-1234yf auf dem Jungfraujoch.

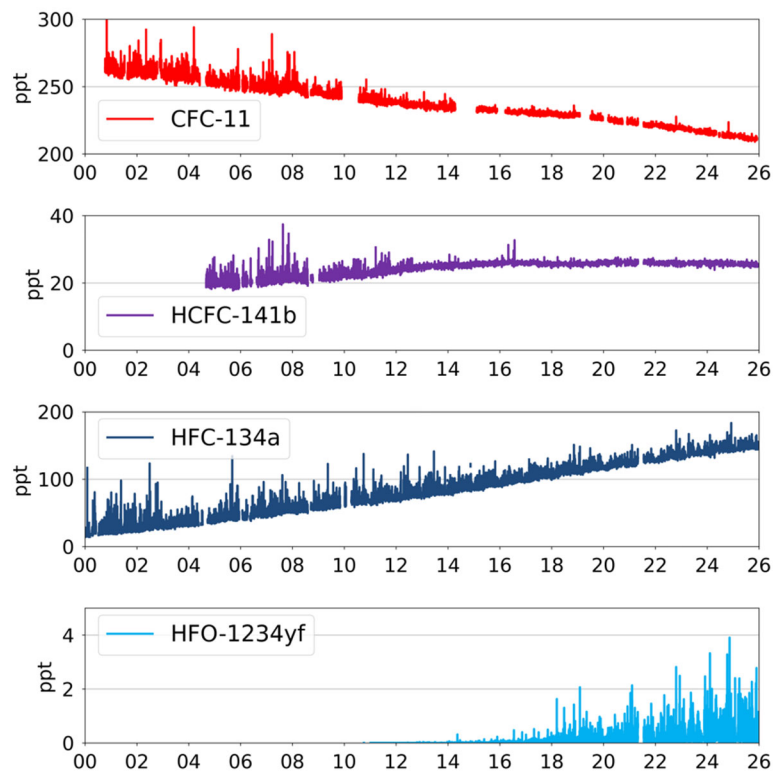


Abbildung S1: Langjährige Messungen der halogenierten organischen Substanzen an der Messstation Jungfraujoch zeigen den Einfluss des Montrealer Protokolls auf die atmosphärischen Konzentrationen der geregelten Substanzen sowie ihrer Ersatzstoffe.

Die Summe der vom Jungfraujoch abgeschätzten Schweizer Emissionen aller in den Klimakonventionen aufgeführten HFKW, SF₆ und perfluorierten Kohlenwasserstoffe (PFKW) betrug 2024 0.8 (0.5-1.1) Mio. t CO₂-Äquivalente (Basis GWP100, IPCC AR5) im Vergleich zu 1.2 (0.9-1.5) Mio. t CO₂-Äquivalente/Jahr für diese Gase, wie sie im Schweizer Treibhausgasinventar ausgewiesen werden.

Die Emissionen der im Montrealer Protokoll verbotenen ozonschichtabbauenden Substanzen, welche gemäss den UNFCCC Richtlinien im Treibhausgasinventar nicht berücksichtigt werden, betrugen 2024 noch gut 0.3 Mio. t CO₂-Äquivalente. Somit betrug 2024 die Summe aller über die Messungen abgeschätzten Emissionen der halogenierten Treibhausgase (inkl. ozonschichtabbauender Substanzen) ca. 1.1 Mio. t CO₂-Äquivalente.

Die Schweizer Emissionen von CH₄ und N₂O wurden mit Hilfe von zusätzlichen Konzentrationsmessungen im Schweizer Mittelland (Beromünster, Lägern Hochwacht) und von umliegenden Stationen des Europäischen ICOS Netzwerks und inverser Modellierung ermittelt. Für die Modellierung wurde das Wettervorhersagemodell COSMO verwendet, wobei die Auflösung nach 2017 von 7 km² auf 1 km² (FP-C7, bzw. FP-C1) verbessert wurde, analog der Anpassungen bei Meteoschweiz. Für N₂O stimmen die Ergebnisse gut mit dem Emissionsinventar überein, und die Unterschiede zwischen FP-C7 und FP-C1 sind innerhalb der Unsicherheit. Für Methan gibt es systematische und erhebliche Unterschiede zwischen FP-C7 und FP-C1, und die messbasierte Abschätzung ist 2024 fast 40% höher als das Inventar (Abbildung S2). Für beide Substanzen wurden ausgeprägte jahreszeitliche Schwankungen in den Emissionen festgestellt, die jeweils gut mit dem momentanen Verständnis der Hauptemissionsprozesse übereinstimmen. 2026 ist deshalb eine weitere, detaillierte Analyse der Inversionsergebnisse mit den verschiedenen Konfigurationen und Modellen geplant, um diese Diskrepanz möglichst zu klären.

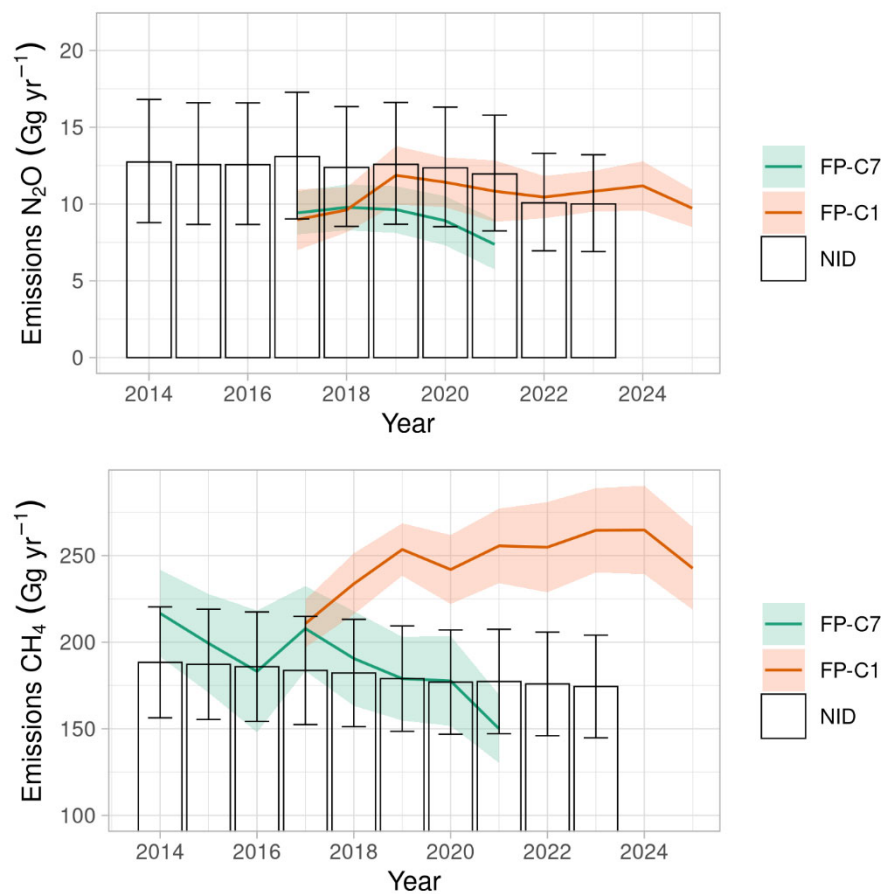


Abbildung S2: Zeitlicher Verlauf der Schweizer N_2O (oben) und CH_4 (unten) Emissionen: Balken, NID (National Inventory Document) Treibhausgasinventar; grün und orange, Ergebnis (a posteriori) der inversen Modellierung mit FP-C7 und FP-C1 Modellkonfiguration.

1.2 Résumé

L'augmentation de la concentration atmosphérique en gaz à effet de serre provoquée par les activités humaines a déjà entraîné un réchauffement mesurable de la basse atmosphère et de la surface terrestre. Selon l'accord de Paris sur le climat (décembre 2015), ce réchauffement doit être limité à +1,5°C, au pire à +2,0°C. A cette fin, les pays signataires annoncent les réductions d'émissions qu'ils entendent réaliser: ce sont les „contributions déterminées au niveau national” (NDCs). L'objectif de la Suisse est de réduire jusqu'à 2030 ses émissions de gaz à effet de serre à 50% de leur niveau de 1990, en partie par le truchement de réductions effectuées à l'étranger, par exemple par des „résultats d'atténuation transférés au niveau international” (ITMOs).

Outre le dioxyde de carbone (CO₂) – principal gaz à effet de serre produit par les activités humaines – d'autres gaz à effet de serre anthropogènes contribuent au réchauffement global. En 2024, exprimée en tonnes d'équivalent de CO₂, la part du méthane (CH₄) s'élevait à quelque 12% et celle du protoxyde d'azote (N₂O) à environ 7% des rejets de gaz à effet de serre en Suisse. Les composés organiques halogénés représentaient 3% des gaz à effet de serre en 2024.

En plus de réchauffer la planète, plusieurs composés organiques halogénés comprenant du chlore, tels que par exemple les CFC et les halons bromés, s'attaquent à la couche d'ozone stratosphérique (le “trou de la couche d'ozone”). C'est pourquoi leur production et consommation ont été interdites par le Protocole de Montréal, ce qui a permis d'améliorer progressivement la situation. Le domaine d'application du Protocole de Montréal a été élargi en 2016 par l'Amendement de Kigali si bien que les HFC non nuisibles à la couche d'ozone y sont également soumis depuis le 1er janvier 2019. L'amendement prévoit la réduction progressive de la production et consommation des HFC au cours des deux prochaines décennies.

Le présent rapport porte sur les mesures de gaz à effet de serre autres que le CO₂ (substances organiques halogénées, méthane et protoxyde d'azote) effectuées depuis de nombreuses années sur le Jungfraujoch et à Beromünster, ainsi que sur l'utilisation de ces données dans l'évaluation des émissions provenant de Suisse et des pays voisins (méthode “top-down”). Elles viennent compléter les inventaires nationaux de gaz à effet de serre, basés sur les statistiques d'activités et les facteurs d'émission (méthode “bottom-up”). La station de mesure du Jungfraujoch (3580 m) convient bien à l'évaluation top-down des émissions suisses et européennes car elle est éloignée des sources d'émission et sous l'influence régulière de masses d'air chargées des émissions des régions avoisinantes. Les mesures effectuées à Beromünster constituent un bon complément à cet égard, car cette station, associée à d'autres sites situés à plus basse altitude, est particulièrement bien adaptée pour estimer les émissions suisses de méthane et de protoxyde d'azote avec une haute résolution spatiale.

Les mesures de substances halogénées effectuées au fil des années mettent clairement l'influence du Protocole de Montréal sur l'évolution des concentrations de ces gaz à effet de serre également nuisibles à la couche d'ozone (fig. S1). A la suite du remplacement des CFC par des HCFC, les concentrations en CFC-11 ont commencé par baisser, suivies bientôt par celles du HCFC-141b. La concentration en HFC-134a, substitut inoffensif pour la couche d'ozone, est toujours en augmentation. Toutefois, cet hydrofluorocarbure a un lourd impact sur le climat et doit être progressivement remplacé dans les années à venir par les nouveaux HFO (hydrofluoroléfinés) de durée de vie réduite. Cela s'est traduit dès 2012 par des concentrations mesurables de HFO-1234yf sur le Jungfraujoch.

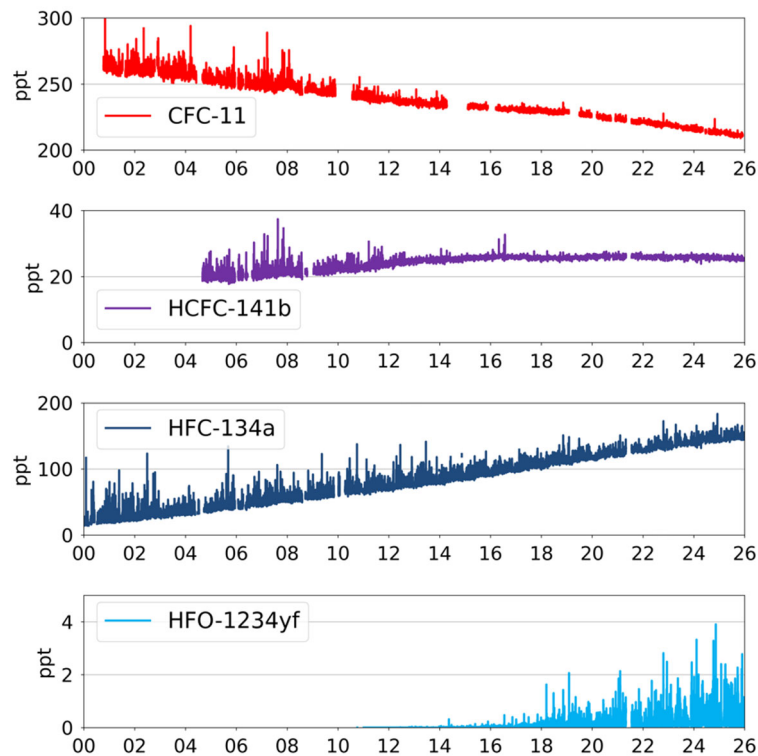


Figure S1: Les mesures pluriannuelles de substances organiques halogénées à la station du Jungfraujoch mettent en évidence l'influence du Protocole de Montréal sur leur concentration atmosphérique et celle de leurs substituts.

La somme des émissions suisses évaluées au Jungfraujoch des principaux HFC soumis à la convention cadre sur le climat équivalait en 2024 à 0.8 (0.5-1.1) mio de tonnes de CO₂ (base GWP 100, IPCC AR5). En comparaison de 1.2 (0.9-1.5) mio de tonnes d'équivalent CO₂ reportés dans l'inventaire suisse des gaz à effet de serre. Les émissions de substances nuisibles à la couche d'ozone interdites par le Protocole de Montréal et qui, conformément aux directives internationales, ne sont pas prises en compte dans l'inventaire suisse des gaz à effet de serre, se sont élevées en 2021 à un peu moins de 0.3 mio de tonnes d'équivalent CO₂. La somme des émissions de gaz à effet de serre halogénés évaluée sur la base des mesures a atteint en 2024 l'équivalent de 1.1 mio de tonnes de CO₂ (y compris les substances nuisibles à la couche d'ozone).

Les émissions suisses de CH₄ et de N₂O ont été déterminées à l'aide de mesures de concentration supplémentaires effectuées dans le Plateau suisse (Beromünster, Lägern, Hochwacht) et dans les stations environnantes du réseau européen ICOS, ainsi que par modélisation inverse. Pour la modélisation, on a utilisé le modèle de prévisions météorologiques COSMO, dont la résolution a été améliorée après 2017, passant de 7 km² à 1 km² (FP-C7 et FP-C1 respectivement), à l'instar des ajustements effectués pour Meteoschweiz. Pour le N₂O, les résultats concordent bien avec l'inventaire des émissions, et les écarts entre FP-C7 et FP-C1 se situent dans les limites de l'incertitude. Pour le méthane, il existe des différences systématiques et significatives entre FP-C7 et FP-C1, et l'estimation basée sur les mesures est, en 2024, supérieure de près de 40 % à celle de l'inventaire (figure S2). Pour ces deux substances, des fluctuations saisonnières marquées des émissions ont été constatées, qui correspondent bien à la compréhension actuelle des principaux processus d'émission. Une analyse plus approfondie des résultats d'inversion avec les différentes configurations et modèles est donc prévue en 2026 afin de clarifier autant que possible cet écart.

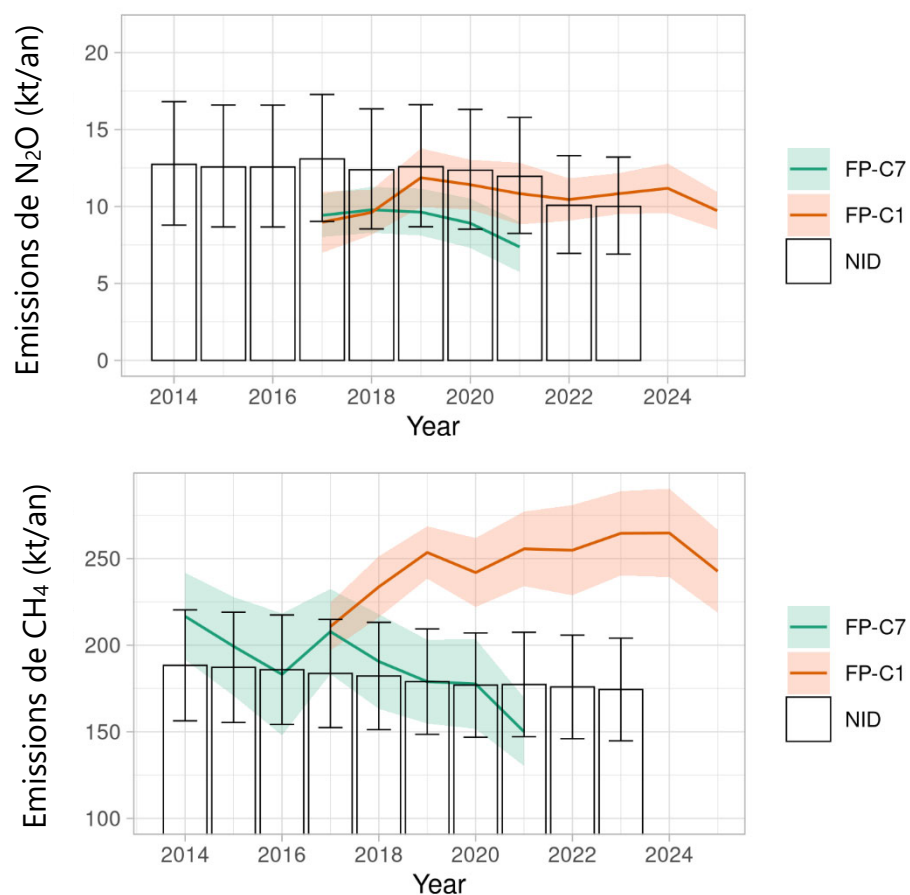


Figure S2: Évolution temporelle des émissions suisses de N₂O (en haut) et de CH₄ (en bas): barres, inventaire des gaz à effet de serre du NID (National Inventory Document) ; vert et orange, résultat (a posteriori) de la modélisation inverse avec les configurations de modèle FP-C7 et FP-C1.

1.3 Summary

The increase in atmospheric greenhouse gases caused by humans has already contributed to a measurable warming of the ground-level atmosphere and the Earth's surface. According to the Paris Agreement (December 2015) the future global warming should be smaller than +1.5°C and a maximum of +2.0°C. Countries which are party to the convention propose emission reductions or so-called nationally determined contributions (NDCs) to ensure that the agreed upper temperature limit is not exceeded. Switzerland aims to reduce its national greenhouse gas emissions up to 2030 by 50% when compared to 1990, with part of this reduction being achieved abroad through, for example, so-called internationally transferred mitigation outcomes (ITMOs).

In addition to carbon dioxide (CO₂), the most important greenhouse gas directly influenced by humans, anthropogenic non-CO₂ greenhouse gases also contribute to global warming. Measured in CO₂ equivalents, methane (CH₄) accounted for approximately 12 % of Switzerland's overall greenhouse gas emissions in 2024, and nitrous oxide (N₂O) representing around 7 %. In addition, the emissions halogenated greenhouse gases were accounting for about 3% of Switzerland's greenhouse gas emissions in 2024.

In addition to contributing to global warming, many halogenated organic substances such as the chlorinated CFCs and the brominated halons are also responsible for the depletion of the ozone layer in the stratosphere (the ozone hole). The production and consumption of these ozone-depleting substances were prohibited by the Montreal Protocol, resulting in a significant and gradual improvement. The Montreal Protocol was extended in 2016 through the so-called Kigali Amendment. As a result, HFCs that are not classified as ozone-depleting substances are also regulated by the Montreal Protocol as of 1 January 2019. The Amendment provides for an incremental reduction in production and consumption of the HFCs over the next two decades.

This report addresses measurements of non-CO₂ greenhouse gases (halogenated organic substances, methane and nitrous oxide) recorded over many years on the Jungfraujoch and in Beromünster, and the use of these measurements to estimate emissions emanating from Switzerland and surrounding countries (the top-down method). This supplements the greenhouse gas inventories, which are based on activity data and emission factors (the bottom-up method). The monitoring station on the Jungfraujoch (3580 meters above sea level) is well suited for the top-down estimation of Swiss and European emissions as though it is located at a distance from local emission sources it is also regularly influenced by air masses polluted by emissions from adjacent regions. The measurements performed in Beromünster are a useful addition to this, as the station, together with other lower-lying sites, is ideally suited to estimating Swiss emissions of methane and nitrous oxide at a high spatial resolution.

Measurements of halogenated substances conducted over many years provide an example of the impact of the Montreal Protocol on concentrations of these ozone-depleting and climate-impacting gases (Fig. S1). The replacement of CFCs through HCFCs initially resulted in a drop in CFC-11 concentrations and, subsequently, those of HCFC-141b. HFC-134a, which is not classified as ozone depleting and is used as a substitute substance, is still rising sharply because of this development. However, as the impact of these HFCs on the climate is considerable, they will be increasingly replaced in the coming years through new short-lived HFOs (hydrofluoroolefins). This has resulted in measurable concentrations of HFO-1234yf on the Jungfraujoch since 2012.

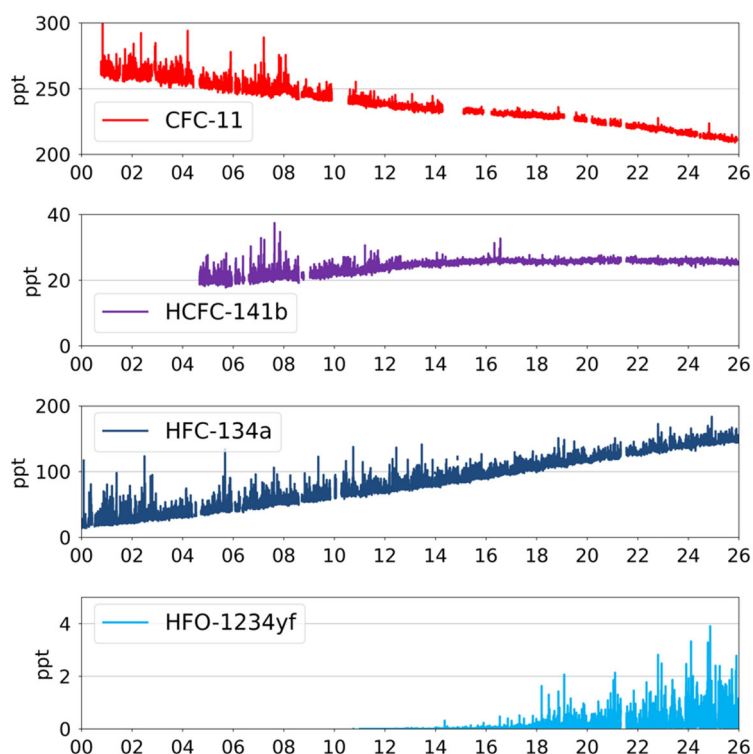


Figure S1: Measurements of halogenated substances conducted over many years at the Jungfraujoch monitoring station demonstrate the impact of the Montreal Protocol on atmospheric concentrations of regulated substances and their replacements.

Estimates of the sum of Swiss emissions of the HFCs listed in the Framework Convention on Climate Change from Jungfraujoch amounted to around 0.8 (0.5-1.1) million tons of CO₂ equivalents in 2024 (basis GWP100, IPCC AR5), in comparison to 1.2 (0.9-1.5) million tons of CO₂ equivalents per year, indicated in the Swiss Greenhouse Gas Inventory. Emissions of ozone-depleting substances prohibited under the Montreal Protocol that, in accordance with international guidelines, are not considered in the Swiss Greenhouse Gas Inventory amounted to nearly 0.3 million tons of CO₂ equivalents in 2024. The total for emissions of all halogenated greenhouse gases estimated through measurements was 1.1 million tons of CO₂ equivalents in 2024, including ozone-depleting gases.

Swiss emissions of CH₄ and N₂O were determined using additional measurements taken in the Swiss Plateau (Beromünster, Lägern Hochwacht) and at surrounding stations in the European ICOS network, combined with inverse modelling. The COSMO weather forecast model was used for the modelling, with the resolution improved from 7 km² to 1 km² (FP-C7 and FP-C1 respectively) after 2017, in line with the adjustments made by MeteoSwiss. For N₂O, the results agree well with the emissions inventory, and the differences between FP-C7 and FP-C1 fall within the uncertainty range. For methane, there are systematic and significant differences between FP-C7 and FP-C1, and the measurement-based estimate is almost 40% higher than the inventory in 2024 (Figure S2). For both substances, pronounced seasonal fluctuations in emissions were observed, each of which is consistent with the current understanding of the main emission processes. A further, detailed analysis of the inversion results using the various configurations and models is therefore planned for 2026 in order to clarify this discrepancy as far as possible.

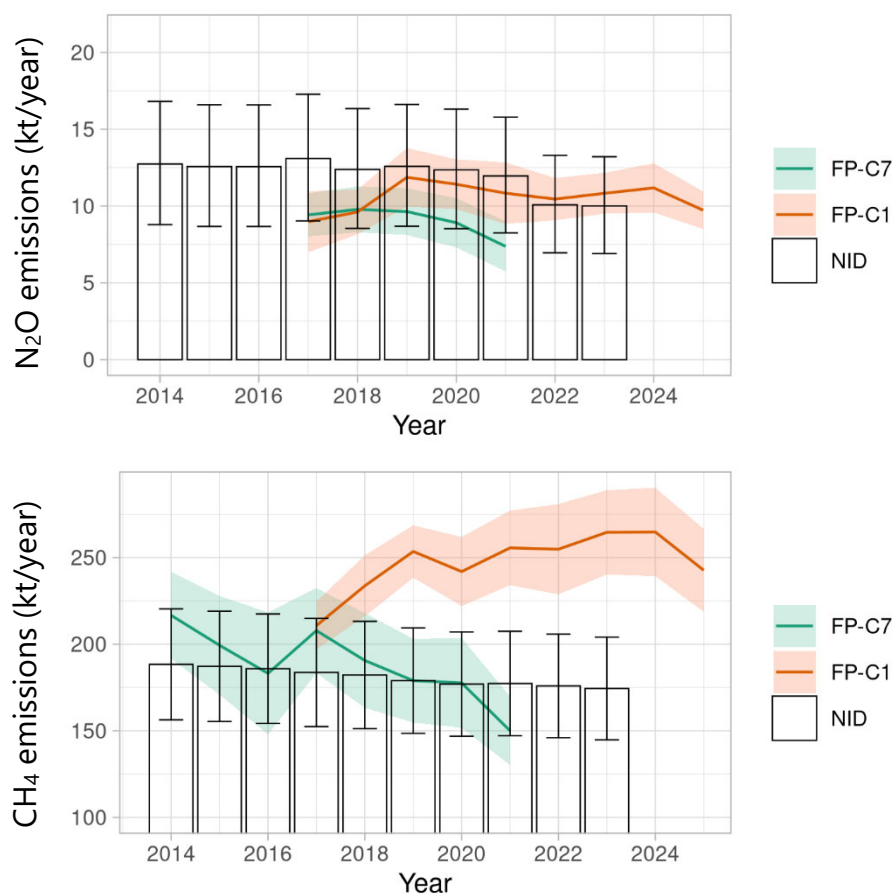


Figure S2: Temporal trend of Swiss N_2O (top) and CH_4 (bottom) emissions: bars, NID (National Inventory Document) greenhouse gas inventory; green and orange, (a posteriori) results of inverse modelling using FP-C7 and FP-C1 model configurations.

2. Einleitung

Die Messungen und Analysen des ab dem Jahr 2000 laufenden HALCLIM Projektes wurden ab 2018 im CLIMGAS-CH Projekt fortgeführt, was die langfristige Identifikation von Trends und Trendänderungen gewährleistet. In CLIMGAS-CH werden die kontinuierlichen Messungen von Nicht-CO₂-Treibhausgasen auf dem Jungfraujoch (halogenierte Substanzen, Methan, Lachgas) ergänzt durch die Analyse der Messungen von Methan und Lachgas an der Station Beromünster im Schweizer Mittelland. Dies ermöglicht eine verbesserte langfristige top-down Abschätzung der Schweizer Emissionen dieser beiden wichtigen Treibhausgase.

2.1 Kontext der Messungen

Die Schweiz hat sich mit der Ratifizierung der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen (UNFCCC) und dem Montrealer Protokoll dazu verpflichtet, die Emissionen bzw. die Herstellung und den Verbrauch von Treibhausgasen und ozonschichtabbauenden Stoffen zu reduzieren. Zur Überprüfung der Wirkung und Umsetzung der Vorgaben werden die Emissionen sowie die Herstellung und der Verbrauch abgeschätzt und rapportiert. Für die Treibhausgase werden die nationalen Emissionen mit Hilfe der international festgelegten Richtlinien der UNFCCC und IPCC bestimmt. Die Abschätzungen stützen sich auf Importstatistiken und Annahmen der Emissionen bei den jeweiligen Anwendungen. Für die ozonschichtabbauenden Substanzen sowie bestimmte synthetische Treibhausgase regelt das Montrealer Protokoll die Einschränkungen in der Herstellung und im Verbrauch. Die Informationen hierzu basieren ebenfalls auf einer Import-Export Statistik. Die Messungen in der Atmosphäre dienen einerseits dazu, diese nationalen Schätzungen zu plausibilisieren und andererseits die globale Entwicklung zu beobachten sowie allfällige Abweichungen von den Zielpfaden zu identifizieren. Zudem können neu in der Industrie verwendete Substanzen identifiziert und deren Zuwachsraten gemessen werden, um allfällig Anpassungen der internationalen Erlasse frühzeitig auszulösen.

2.2 Stationen zur Messung von Nicht-CO₂-Treibhausgasen in der Schweiz

An der hochalpinen Forschungsstation Jungfraujoch werden halogenierte Treibhausgase teilweise bereits seit dem Jahr 2000 und Lachgas sowie Methan seit 2004 kontinuierlich gemessen. Diese Messungen bilden die Grundlage für die Abschätzung der schweizerischen Emissionen dieser Gase mit Hilfe von Umweltdaten (siehe Kapitel 4). Mit den neu in Beromünster installierten Messungen für Methan und Lachgas konnten die Abschätzungen dieser vor allem aus der Landwirtschaft und im Mittelland emittierten Treibhausgase erheblich verbessert werden. Abbildung 1 zeigt die Lage der Standorte Jungfraujoch und Beromünster in der Schweiz und ihre Position zum Mittelland.

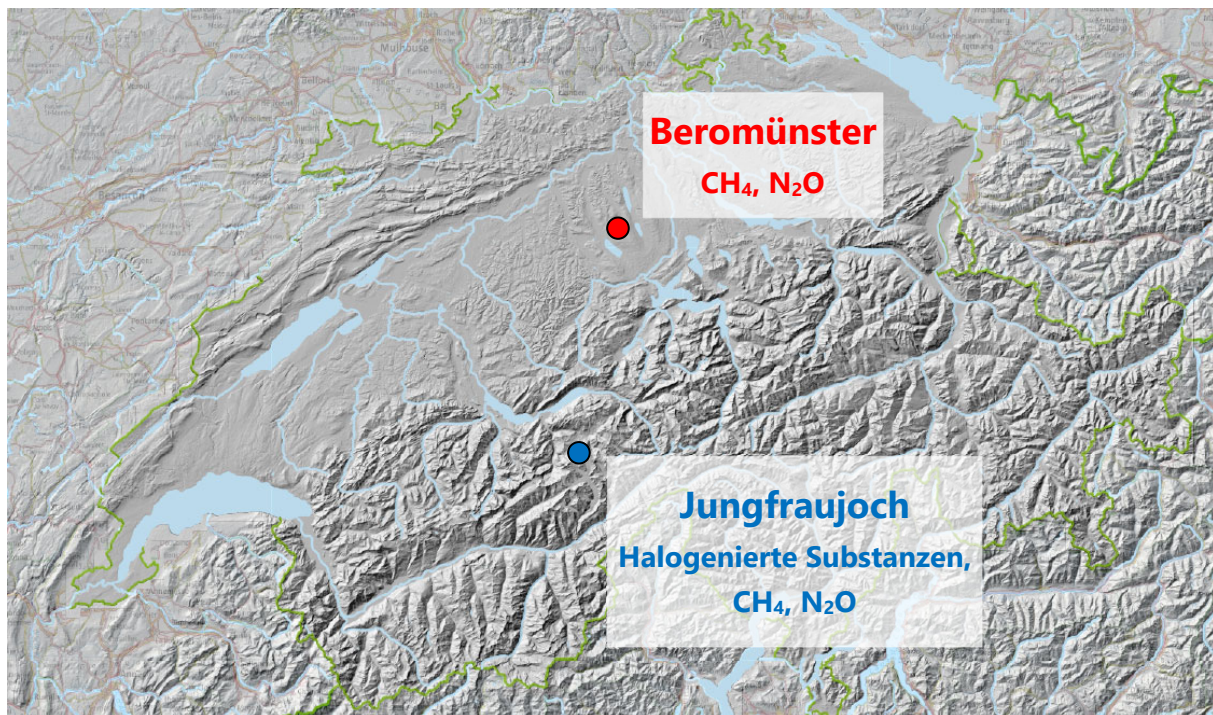


Abbildung 1: Kontinuierliche Messung von Nicht-CO₂-Treibhausgasen in der Schweiz: Halogenierte Treibhausgase, Methan (CH₄) und Lachgas (N₂O) an der hochalpinen Station Jungfraujoch (3580 m.ü.M) sowie Methan und Lachgas in Beromünster (797 m.ü.M) im Schweizer Mittelland.

2.2.1 Jungfraujoch

Die Forschungsstation Jungfraujoch (3580 m.ü.M.) befindet sich am nördlichen Alpenrand zwischen dem Mönch (4107 m.ü.M.) und der Jungfrau (4158 m.ü.M.). Auf Grund der erhöhten Lage ist die Station die meiste Zeit in der freien Troposphäre und damit nicht durch regionale Quellen beeinflusst. Kurzfristig gelangen jedoch durch den Transport von Luft aus tieferen Lagen anthropogene Spurengase aus schweizerischen und europäischen Quellen bis zur Höhe des Jungfraujochs.

Die Forschungsstation Jungfraujoch beherbergt die Messeinrichtung des Nationalen Beobachtungsnetzes für Luftfremdstoffe (NABEL), welches vom BAFU und der Empa betrieben wird. Diese Messstation erfasst mehr als 90 reaktive Gase und Treibhausgase und trägt damit zu internationalen Messprogrammen wie dem "European Monitoring and Evaluation Programme" (EMEP) der UNECE und dem "Global Atmosphere Watch" (GAW) der WMO bei. Seit 2000 werden auf dem Jungfraujoch halogenierte Spurengase und flüchtige organische Kohlenwasserstoffe (C₂- bis C₇-VOCs) innerhalb des globalen AGAGE Netzwerkes kontinuierlich gemessen. Nebst den halogenierten Verbindungen werden auf dem Jungfraujoch auch Kohlendioxid (CO₂), Methan (CH₄) und Lachgas (N₂O) gemessen (Abbildung 25).

Im Sommer 2020 wurde auf dem Grat Richtung Mönch, ca. 30 m östlich der Besucherterrasse, ein neuer stationärer Einlass und eine geheizte Einlassleitung installiert. Dieser Einlass ersetzt eine provisorische Installation, welche seit 2012 erfolgreich verwendet wurde, um nicht durch die aus der Forschungsstation entweichende verschmutzte Innenluft der Jungfraujochstation beeinflusst zu werden.

2.2.2 Beromünster

An der Messstation Beromünster wurden am ehemaligen Funkturm des Schweizer Landessenders Beromünster im Jahr 2012 von der Universität Bern im Rahmen des SNF Sinergia Projekts CarboCount CH Messungen von CO₂, CH₄, H₂O und CO begonnen. Der Turm verfügt über eine Gesamthöhe von 217

Metern mit Gaseinlässen und meteorologischen Instrumenten auf 5 verschiedenen Höhen über Grund (12, 45, 72, 132, 212 m). 2016 wurde der Standort Beromünster in das Messnetz des Nationalen Beobachtungsnetz für Luftfremdstoffe (NABEL) aufgenommen und um diverse Messungen der Luftqualität ergänzt.

2.3 Internationale Einbettung der Schweizer Messungen von Nicht-CO₂-Treibhausgasen

Die seit dem Jahr 2000 betriebenen kontinuierlichen Messungen der halogenierten Treibhausgase auf dem Jungfraujoch sind seit dem Jahr 2010 in das weltweite AGAGE-Messnetz integriert. AGAGE (Advanced Global Atmospheric Gases Experiment) ist das führende Messnetz für die kontinuierliche Messung dieser klimawirksamen- und ozonschichtabbauenden Substanzen und besteht aus 12 Stationen

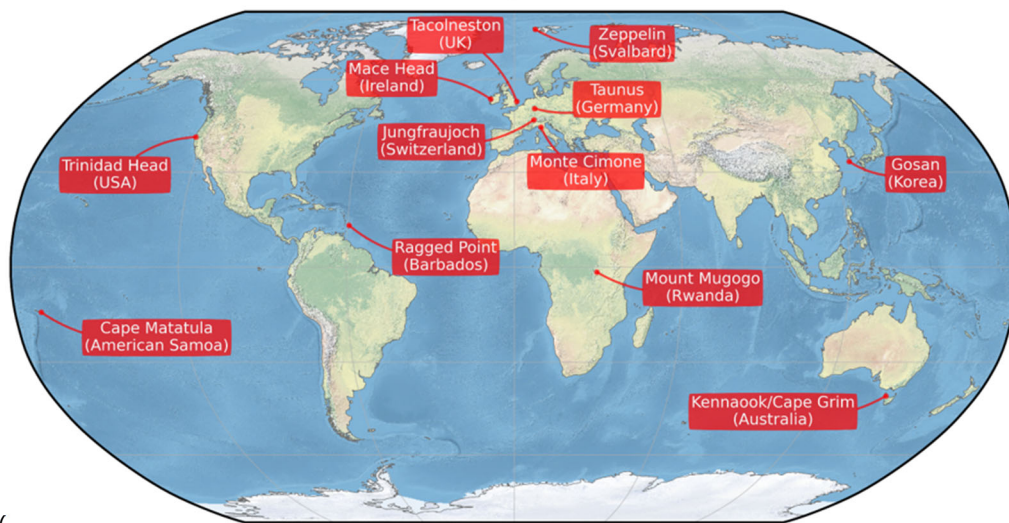


Abbildung 2). Neben dem Jungfraujoch werden die halogenierten Treibhausgase in Europa an fünf weiteren Stationen des AGAGE-Netzwerkes kontinuierlich gemessen. Die Station in Mace Head (Irland) ist eine globale Hintergrundstation im Nordwesten Europas, welche aber periodisch von Emissionen aus England und Frankreich beeinflusst wird. Zudem besteht seit einigen Jahren im Osten Englands eine neue Station (Tacolneston). Die Station auf dem Monte Cimone (Italien) ist wie das Jungfraujoch eine Hochgebirgsstation (2160 m.ü.M.). Sie ist von grosser Bedeutung für die Lokalisierung und Quantifizierung von Emissionen aus Norditalien. An der neuen Station Taunus in der Nähe von Frankfurt wird, ähnlich wie auf dem Jungfraujoch, versucht die deutschen Quellen abzuschätzen. Zusätzlich werden die halogenierten Treibhausgase in Ny-Ålesund (Spitzbergen) gemessen.

Neben dem weltweiten AGAGE Messnetz betreibt die NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration, USA) ebenfalls ein weltweites Netz zur Messung der Nicht-CO₂-Treibhausgase. Dabei werden in wöchentlichem Abstand Luftproben in Gaskanistern gesammelt und anschliessend in einem zentralen Labor analysiert.

Beide Messnetze betreiben einen intensiven Austausch mit dem Vergleich der Messungen und mit gemeinsamen wissenschaftlichen Publikationen. Weitere Informationen über die Messnetze finden sich auf den jeweiligen Webseiten von AGAGE (<https://www-air.larc.nasa.gov/missions/agage>) und NOAA (<https://www.esrl.noaa.gov/gmd>).

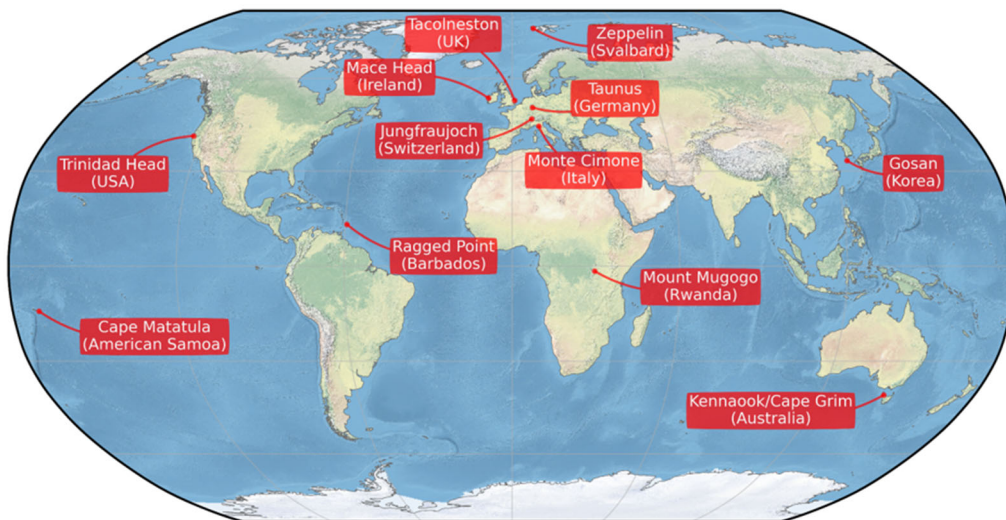


Abbildung 2: Weltweite kontinuierliche Messungen zur Analyse der Nicht-CO₂-Treibhausgase innerhalb von AGAGE (Advanced Global Atmospheric Gases Experiment) und der assoziierten Messstationen.

Neben den halogenierten Substanzen werden im Projekt ICOS-CH kontinuierliche Messungen der Treibhausgase Kohlendioxid (CO₂), Methan (CH₄) und Lachgas (N₂O) auf dem Jungfrauoch durchgeführt. Diese Aktivitäten sind Bestandteil des europäischen Forschungsinfrastruktur-Projektes ICOS (Integrated Carbon Observation System), welches mit Hilfe von Messungen die Quantifizierung und das Verständnis der Treibhausgas-Bilanz in Europa unterstützt.

Die auf Messungen basierenden Emissionsabschätzungen innerhalb von CLIMGAS-CH erlauben die Erfolgskontrolle der Massnahmen zur Einhaltung von internationalen Vereinbarungen im Bereich der Klimagase und ozonschichtabbauender Substanzen, wie sie unter anderem auch in dem neuen IG³IS Projekt der WMO vorgesehen sind.

Die Mitarbeit und das Einbringen des Expertenwissens in internationale Berichte (wie z.B. bei den 4-jährlichen Ozone Assessments der WMO/UNEP) wird weitergeführt. Zusätzlich werden die bestehenden Kontakte zur internationalen Forschungsgemeinschaft dazu genutzt, die Messungen auf dem Jungfrauoch in wissenschaftlich begutachteten Publikationen einzubringen.

Die hervorragende Zusammenarbeit der Empa mit internationalen Forschungsprojekten (AGAGE, ICOS) und der Industrie ist von grösster Bedeutung. Die weltweiten Messungen der halogenierten Treibhausgase tragen ausserdem zu globalen Emissionsabschätzungen bei, welche in Publikationen und internationalen Berichten verwendet werden.

2.4 Ansätze für die Modellierung der Emissionen

Die Messungen der Konzentrationen in der Luft können in Kombination mit atmosphärischen Transportmodellen dazu verwendet werden, Emissionen der gemessenen Substanzen abzuschätzen. Dabei wird der Ursprung von Verschmutzungsereignissen mit Hilfe der Modelle nachverfolgt und anschliessend die Emission quantitativ abgeschätzt.

Für die Abschätzung der Schweizer Emissionen der halogenierten Treibhausgase wird die Tracer-Ratio Technik benutzt (siehe Abschnitt 8.3). Dabei werden die Emissionen an Tagen mit dominanter Beeinflussung von Schweizer Quellen auf dem Jungfrauoch mit Hilfe von gleichzeitig gemessenen Konzentrationen von CO und den Emissionen aus dem Schweizer CO Inventar abgeschätzt.

Für die qualitative Abschätzung europäischer Emissionen der halogenierten Treibhausgase werden die Messungen am Jungfraujoch mit denjenigen in Mace Head (Irland) und Monte Cimone (Italien) kombiniert. Zur Berechnung der Sensitivität dieser Messstationen gegenüber europäischen Quellen wird weiterhin das Lagrangesche Transportmodell FLEXPART-ECMWF eingesetzt.

Bei der Abschätzung der Schweizer Emissionen von Methan und Lachgas werden in CLIMGAS-CH die Messungen im Schweizer Mittelland mit dem Hauptgewicht in Beromünster durchgeführt. Dabei kommen Methoden zur inversen Modellierung zum Tragen, die in Vorläuferprojekten entwickelt wurden.

Für die Interpretation der Messdaten und für die Bestimmung der Quellen durch inverse Methoden wurden zwei unabhängige Modellsysteme entwickelt, die beide auf dem numerischen Wettervorhersagemodell COSMO der MeteoSchweiz aufbauen, den atmosphärischen Transport jedoch entweder in einem Eulerschen oder in einem Lagrangeschen Rahmen behandeln. Die Empa setzt für die inverse Modellierung vorwiegend das von ihr entwickelte Modell FLEXPART-COSMO ein. Dieses wird standardmässig mit den stündlichen Analysefeldern der operationellen COSMO/ICON Simulationen der MeteoSchweiz auf eine Auflösung von ca. 7 km x 7 km (COSMO7) bzw. ca. 1 km x 1 km (COSMO1/ICON1 ab 2017) durchgeführt. Für die Jahre nach 2017 sind in den Schweizer Nachbarländern neue Treibhausgas-messstandorte im Rahmen des Europäischen ICOS Programms in Betrieb genommen worden. Diese messen neben CO₂, CH₄ und CO, teilweise auch N₂O. Um die Bestimmung der Schweizer CH₄ und N₂O Emissionen weiter zu verbessern, wurden diese zusätzlichen Messungen und die höhere Transportmodell-Auflösung für die Jahre nach 2017 verwendet.

Ab 2020 wurden anfänglich mit Hilfe von Messungen in der Schweiz und anschliessend auch unter Einbezug von anderen globalen AGAGE Stationen, jährlich die globalen Emissionen aller im Kigali Amendment enthaltenen HFKWs abgeschätzt. Dieser "Kigali-Index" wurde in einem zusätzlichen Projekt von der Empa mit Unterstützung des BAFU entwickelt. Die zeitliche Entwicklung der Emissionen der im Kigali Amendment enthaltenen HFKWs kann dazu verwendet werden, das globale "phase-down" der Verwendung und der Produktion dieser Stoffe langfristig zu überprüfen.

3. Kontinuierliche Treibhausgas-Messungen in der Schweiz

3.1 Halogenierte Gase

In diesem Abschnitt werden zuerst die Messungen der halogenierten Gase auf dem Jungfraujoch bezüglich Konzentrationen und Trends analysiert. Anschliessend werden die Messungen auf dem Jungfraujoch mit denjenigen der übrigen drei europäischen Stationen diskutiert, welche ebenfalls Teil des AGAGE Netzwerks sind.

3.1.1 Konzentrationen und Trends auf dem Jungfraujoch

In Tabelle 1 sind die auf dem Jungfraujoch gemessenen halogenierten Treibhausgase, deren Hintergrundkonzentrationen und ihre Veränderungen in den letzten 4 Jahren (2022-2025) aufgeführt. Zusätzliche Informationen wie die atmosphärische Lebensdauer, das Treibhausgaspotential über 100 Jahre (GWP100 IPCC AR5, im Folgenden GWP) und deren Verwendung sind zur Einschätzung der Bedeutung der Substanzen angegeben.

Die grössten absoluten atmosphärischen Anstiegsraten sind weiterhin bei den als Kühlmittel verwendeten HFKW zu verzeichnen, ihre relativen Anstiegsraten liegen nun aber hinter den HFOs an zweiter Stelle. Die Kältemittel HFKW-32 und HFKW-125 steigen mit durchschnittlich 11 %/Jahr, beziehungsweise mit 8 %/Jahr an, aber auch die Anstiegsraten von HFKW-134a (4 %/Jahr) und HFKW-143a (6 %/Jahr) sind markant. HFKW-134a ist das HFKW mit der höchsten Konzentration von 149 ppt (pmol mol^{-1}). Das Schäumungsmittel HFKW-245fa steigt noch mit 2.3% an während HFKW-365mfc als erstes HFC in der Atmosphäre abnimmt (-5 %/Jahr). Das sehr langlebige HFKW-23 mit einem GWP (100 Jahre) von 12'400 wächst weiterhin mit einer konstanten Rate von 2 %/Jahr und hat 40 ppt erreicht. Diese Substanz entsteht vor allem als unerwünschtes Nebenprodukt bei der Herstellung von HFKW-22. Globale Bemühungen zur Reduktion dieses Nebenprodukts – seit 2019 verstärkt auch über die Verpflichtungen unter dem Montrealer Protokoll und dessen Kigali Amendment – sollten zu einem geringeren Wachstum führen. Die faktische Einstellung der CDM (Clean Development Mechanism) Instrumente im Kyoto-Protokoll hat jedoch zu einem Wiederanstieg der globalen Emissionen geführt.

Für die sehr langlebigen perfluorierten Verbindungen SF_6 , PFKW-116, PFKW-218 und PFKW-318 ist bei den Hintergrundkonzentrationen ein relativer Anstieg von mehreren Prozent pro Jahr festzustellen. Den absolut gesehen grössten Anstieg weist jedoch mit 0.9 ppt/Jahr CF_4 auf und hat mittlerweile eine Konzentration von 92 ppt erreicht. Die Konzentrationen der langlebigen C_4F_{10} und C_6F_{14} , beides Produkte der Elektronikindustrie, sind relativ niedrig (0.003 ppt). Die jährlichen Anstiegsraten dieser langlebigen Substanzen (atmosphärische Lebensdauern von 2600 und 3200 Jahren) sind jedoch ebenfalls im Prozentbereich. Für das vor allem in elektrischen Umschaltanlagen eingesetzte SF_6 zeigte sich in den letzten Jahren global ein konstantes Wachstum und hat 12.8 ppt erreicht. Aufgrund der Langlebigkeit und des sehr hohen GWPs (23'500) sind Bestrebungen im Gange, SF_6 durch weniger klimawirksame Substanzen zu ersetzen.

Bei den FCKW sind die Auswirkungen des Verbots durch das Montrealer Protokoll weiterhin sichtbar. Die drei Substanzen mit den höchsten atmosphärischen Konzentrationen (FCKW-11, -12, -113) zeigen, eine kontinuierliche Konzentrationsabnahme, FCKW-12 479 ppt, FCKW-11 211 ppt und FCKW-113 67 ppt. Die sehr langlebigen FCKW-114 und FCKW-115 (Lebensdauer 189, resp. 540 Jahre) steigen in der Atmosphäre an, FCKW-114 0.05 ppt/Jahr und FCKW-115 0.06 ppt/Jahr. Der Grund dafür ist unklar, es wird vermutet, dass sie als Zwischenprodukte bei der HFKW Produktion aus den Produktionsanlagen lecken. Auch beim FCKW-13 (Lebensdauer 640 Jahre) ist erstaunlicherweise immer noch ein jährlicher Anstieg von 0.7 % vorhanden.

Bezüglich der Reduktion des totalen Chlorgehalts in der Atmosphäre (als Indikator für den stratosphärischen Ozonschichtabbau) nehmen seit einigen Jahren FCKW-11 und FCKW-12 die wichtigsten Rollen ein. Für diese beiden Substanzen werden globale Emissionen von immer noch 50 – 100 kt/Jahr abgeschätzt und es existieren messbare Unterschiede zwischen der Nord- und der Südhemisphäre, was auf immer noch bedeutende Quellen in der Nordhemisphäre hinweist. Diese Quellen stiegen zwischen 2013 und 2018 für FCKW-11 wieder an mit dem Schwerpunkt der neuen Emissionen aus Ostasien. Diese neuen Emissionen, welche auf neuer illegaler Produktion beruhten, konnten danach wieder reduziert werden, unter anderem aufgrund von Messungen im AGAGE Messnetz, welche ein Massnahmenpaket auslöste, welches die Vertragsparteien des Montrealer Protokolls gemeinsam verabschiedet haben. Für die anderen FCKW sind innerhalb der Messunsicherheit keine interhemisphärischen Gradienten mehr feststellbar.

Das ebenfalls im Montrealer Protokoll enthaltene 1,1,1-Trichlorethan zeigt weiterhin sinkende Konzentrationen in der Atmosphäre. Die globalen Emissionen haben in den letzten Jahren stark abgenommen – vor allem auch wegen vorgezogenen Verbrauchsverbots in einigen wichtigen Entwicklungsländern (gemäss Artikel 5 des Montrealer Protokolls). Allerdings sind auf dem Jungfraujoch (und anderen europäischen Stationen) wieder vermehrt Verschmutzungsereignisse gemessen worden, welche auf eine neue Quelle in Westeuropa hinweisen. Für Tetrachlorkohlenstoff (CCl_4) sind weltweit immer noch beträchtliche Emissionen von über 20 kt/Jahr vorhanden, welche zu einem grossen Teil in China lokalisiert sind. Die Konzentrationen des in der Schädlingsbekämpfung eingesetzten Methylbromids (CH_3Br) sind weiterhin leicht abnehmend. Das in gewissen Anwendungsbereichen von CH_3Br als Ersatz verwendete Sulfurylfluorid (SO_2F_2) steigt dagegen mit ca. 3 %/Jahr an.

Die hauptsächlich als Feuerlöschmittel eingesetzten Halone H-1301, H-1211 und H-2402 sind ebenfalls im Montrealer Protokoll reglementiert. H-1211 und H-2402 haben während mehr als 10 Jahre schon stetig abgenommen, bei H-1301 (ca. 65 Jahre Lebensdauer) ist nun in den letzten ca. 8 Jahren auch eine Stabilisierung bei 3.4 ppt eingetreten.

HFCKW-22 ist das HFCKW mit der deutlich höchsten Konzentration in der Atmosphäre und hatte im Jahr 2022 seine maximale Konzentration (260 ppt) erreicht. Mittlerweile ist eine Verringerung zu verzeichnen (249 ppt). HFCKW-141b und HFCKW-142b nehmen auch ab. Für HFCKW-142b wird allerdings vermutet, dass die Konzentrationen sich wieder stabilisieren oder gar ansteigen könnten aufgrund der Verwendung als Feedstock. Das in der Atmosphäre in geringeren Mengen auftretende HFCKW-124 ist global weiterhin abnehmend. HFCKW-132b, dessen Verwendung unklar ist (vermutlich ein Zwischenprodukt in der HFCKW-Herstellung) verzeichnet ansteigende Konzentrationen (9 %/Jahr).

	Chemische Formel	Hintergrund ^{e)} Ende 2025 [ppt]	Änderung Hintergrundkonz. 1/2022– 12/2025 ^{b)}		Atmosphärische Lebensdauer ^{a)} [Jahre]	Treibhausgas-po- tential GWP (100 Jahre) ^{f)}	Verwendung	Klima Protokolle (KP) Montrealer (MP)
			[ppt/Jahr]	[%/Jahr]				
PFKW SF₆ und NF₃								
Tetrafluormethan	CF ₄	92.0	0.88	1.0	50000	6630	z.T. geogen, Aluminiumindustrie	KP
Perfluorethan, PFKW-116	CF ₃ CF ₃	5.51	0.09	1.7	10000	11100	Leiterplattenindustrie	KP
Octafluorpropan, PFKW-218	CF ₃ CF ₂ CF ₃	0.83	0.02	2.9	2600	8900	Leiterplattenindustrie	KP
Octafluorcyc.butan,PFKW-318	CF ₂ CF ₂ CF ₂ CF ₂	2.4	0.10	4.5	3200	9540	Leiterplattenindustrie	KP
Decafluorbutan, C ₄ F ₁₀	CF ₃ CF ₂ CF ₂ CF ₃	0.24	0.003	1.3	2600	7000	Leiterplattenindustrie	KP
Perfl.hexan, C ₆ F ₁₄ , PFKW-51-14	CF ₃ CF ₂ CF ₂ CF ₂ CF ₂ CF ₃	0.34	0.003	0.75	3100	7910	Leiterplattenindustrie	KP
Schwefelhexafluorid	SF ₆	12.8	0.43	3.6	3200	23500	Elektr. Isolator, Mg-Industrie	KP
Stickstofftrifluorid	NF ₃	4.32	0.36	9.8	569	16100	Elektronikindustrie	KP
HFKW								
HFKW-23	CHF ₃	39.6	0.91	2.4	228	12400	Nebenprodukt HFCKW 22 Prod.	KP/MP
HFKW-32	CH ₂ F ₂	57.2	5.3	11.4	5.4	677	Kältemittel	KP/MP
HFKW-125	CHF ₂ CF ₃	58.5	4.2	8.4	30	3170	Kältemittel	KP/MP
HFKW-134a	CH ₂ FCF ₃	149	5.0	3.6	14	1300	Kältemittel, Schäumung	KP/MP
HFKW-143a	CF ₃ CH ₃	37.0	1.9	5.6	51	4800	Kältemittel	KP/MP
HFKW-152a	CH ₃ CHF ₂	12.2 ^{q)}	0.4	3.5	1.6	138	Schäumung	KP/MP
HFKW-365mfc	CH ₃ CF ₂ CH ₂ CF ₃	1.09	-0.06	-5.0	8.9	804	Schäumung, Lösemittel	KP/MP
HFKW-227ea	CF ₃ CHFCF ₃	3.01	0.21	8.1	36	3350	Feuerlöscher, Spray, Schäumung	KP/MP
HFKW-245fa	CHF ₂ CH ₂ CF ₃	4.22	0.09	2.3	7.9	858	Schäumung	KP/MP
HFKW-236fa	CF ₃ CH ₂ CF ₃	0.30	0.016	6.1	213	8060	Feuerlöscher, Kältemittel	KP/MP
HFKW-43-10mee	CF ₃ CHFCF ₂ CF ₃	0.31	-0.003	-0.96	17	1650	Reinigungsmittel in Elektroindustrie	KP/MP
FCKW								
FCKW-11	CCl ₃ F	211	-2.5	-1.2	52	4460	Schaumstoffe, Sprays	MP
FCKW-12	CCl ₂ F ₂	479	-4.3	-0.9	102	10200	Kältemittel	MP
FCKW-13	CClF ₃	3.44	0.03	0.74	640	13900	Kältemittel	MP
FCKW-113	CCl ₂ FCClF ₂	67.1	-0.39	-0.6	93	5820	Lösemittel, Elektroind.	MP
FCKW-114	CClF ₂ CClF ₂	16.5	0.05	0.30	189	8590	Kältemittel	MP
FCKW-115	CF ₃ CClF ₂	9.00	0.06	0.62	540	7670	Kältemittel	MP
Halone								MP
H-1301	CBrF ₃	3.40	0.00	0.00	72	6290	Feuerlöschmittel	MP
H-1211	CBrClF ₂	2.73	-0.11	-3.6	16	1750	Feuerlöschmittel	MP
H-2402	C ₂ Br ₂ F ₄	0.375	-0.11	-3.6	28	1470	Feuerlöschmittel	MP
HFCKW								
HFCKW-22	CHClF ₂	249	-2.5	-1.0	11.6	1760	Kältemittel, Schäumung	MP
HFCKW-124	CF ₃ CHClF	0.82	-0.03	-3.4	5.9	527	Kältemittel	MP
HFCKW-141b	CH ₃ CFCl ₂	25.5	-0.18	-0.7	9.4	782	Schäumung, Lösemittel	MP
HFCKW-142b	CH ₃ CF ₂ Cl	21.3	-0.31	-1.4	18	1980	Schäumung	MP
HFCKW-132b	CH ₂ ClCClF ₂	0.265	0.02	9.0	3.5	320	Zwischenprodukt HFKW Herstellung	MP
HFCKW-133a	CF ₃ CH ₂ Cl	0.51	-0.002	-0.44	4.6	380	Zwischenprodukt HFKW Herstellung	MP

	Chemische Formel	Hintergrund ^{e)} Ende 2025 [ppt]	Änderung Hintergrundkonz. 1/2022– 12/2025 ^{b)}		Atmosphärische Lebensdauer ^{a)} [Jahre]	Treibhausgas-po- tential GWP (100 Jahre) ^{f)}	Verwendung	Klima Protokolle (KP) Montrealer (MP)
			[ppt/Jahr]	[%/Jahr]				
Halogenierte Substanzen								
1,1,1-Trichlorethan	CH ₃ CCl ₃	0.765	-0.12	-12	5.0	160	Lösemittel	MP
Tetrachlorkohlenstoff	CCl ₄	72.8	-0.58	-0.78	32	1730	Lösemittel	MP
Methylbromid	CH ₃ Br	6.5 ^{c)}	-0.08	-1.1	0.8	2	z.T. biogen, Begasungsmittel	MP
Methylchlorid	CH ₃ Cl	540 ^{c)}	0.0	0.0	0.9	12	z.T. biogen	—
Methyliodid	CH ₃ I	0.35	0.0	0.0	~0.02		Biogen	—
Chloroform	CHCl ₃	12.0 ^{c)}	0.0	0.0	0.5	16	Lösemittel, z.T. biogen	—
Methylenchlorid	CH ₂ Cl ₂	81.0 ^{c)}	1.9	2.4	0.4	9	Lösemittel	—
Trichlorethen, TCE	CCl ₂ CHCl	0.20 ^{c)}	-0.03	-10	~0.05		Lösemittel	—
Tetrachlorethen, PER	CCl ₂ CCl ₂	1.2 ^{c)}	-0.1	-4.5	0.4		Lösemittel	—
Dibrommethan	CH ₂ Br ₂	1.2 ^{c)}	0.025	2.2	0.3	1	Biogen	—
Bromoform	CHBr ₃	1.2 ⁱ⁾	-0.03	-2.0	8–23 Tage		Biogen	—
Narkosegase ^{g)}								
Halothan (H-2311)	CF ₃ CHClBr	0.00X	–0.00X	–X	1.0	50	Narkosegas	—
Desfluran	CF ₃ CHFOCHF ₂	0.34	-0.003	-1.0	14.1	2540	Narkosegas	—
Sevofluran	(CF ₃) ₂ CHOCH ₂ F	0.30	0.013	4.6	1.9	130	Narkosegas	—
Isoflurane	CF ₃ CHClOCHF ₂	0.17	0.005	3.1	3.5	510	Narkosegas	—
Kurzlebige HFO/HCFO ^{h)}								
HFO-1234yf	CF ₃ CF=CH ₂	0.150 ⁱ⁾	0.018 ⁱ⁾	15 ⁱ⁾	9–16 Tage	<4.5	Kältemittel	—
HFO-1234ze(E)	t-CF ₃ CH=CHF	0.17 ⁱ⁾	0.013 ⁱ⁾	8.6 ⁱ⁾	13–24 Tage	<7.5	Schäumung, Kältemittel	—
HCFO-1233zd(E)	t-CF ₃ CH=CHCl	0.40 ⁱ⁾	0.045 ⁱ⁾	15 ⁱ⁾	34–64 Tage	<14	Lösemittel, Schäumung, Kältemittel	—
Sonstige								
Sulfurylfluorid	SO ₂ F ₂	3.37	0.11	3.3	36	4090	Begasungsmittel, CH ₃ Br Ersatz	—

Tabelle 1: Charakteristika der halogenierten Treibhausgase, die auf dem Jungfraujoch gemessen werden.

- a) Die Lebensdauer ist definiert als Gesamtreservoir einer Substanz im quasistationären Gleichgewicht in der Atmosphäre (Tonnen) über der mittleren globalen Senke (Tonnen/Jahr) (Myhre and Shindell, 2013). Werte aus WMO/UNEP Ozone Assessment (2022).
- b) Für die prozentuale Veränderung wird als 100% der Durchschnitt von Anfang- und Endkonzentration der 4-Jahresperiode verwendet.
- c) Substanzen mit starken saisonalen Zyklen.
- d) Anstiegsraten basieren auf kürzerem Datensatz (für den Bericht 2023 auf keine Substanz anwendbar).
- e) Nordhemisphäre (AGAGE).
- f) Die Werte der hier angegebenen GWPs entsprechen denjenigen, welche im IPCC 5th AR publiziert wurden, welche ab 2021 für die Berechnung der CO₂-Äquivalente der Schweizer Emissionen verwendet werden.
- g) Narkosegase: Lebenszeiten und GWPs aus Referenzen in Vollmer et al. (2015). Halothan Konzentrationen unter Detektionsgrenzen.
- h) Hydrofluorolefine (HFO, kurzlebige HFWK): Lebenszeiten und GWPs aus Referenzen in Vollmer et al. (2015).
- i) Basierend auf dem jährlichen Median der Messungen auf dem Jungfraujoch.

3.1.2 Hydrofluorkohlenwasserstoffe (HFKW) in Europa

In Abbildung 3 und Abbildung 4 sind die Konzentrationsverläufe der beiden Kältemittel HFKW-134a und HFKW-125 an vier europäischen AGAGE Stationen dargestellt. Während HFKW-125 praktisch nur in Mischungen in stationären Klimaanlage eingesetzt wird (z.B. als Teil von R-404A), stammten die Emissionen von HFKW-134a zusätzlich auch aus dessen Verwendung als Kältemittel in Auto-Klimaanlagen. Letztere Anwendung wird allerdings seit ca. 10 Jahren durch HFO-1234yf ersetzt. Beide HFKWs weisen zwar immer noch deutliche jährliche Anstiege auf (8 %/Jahr für HFKW-125 und 4 %/Jahr für HFKW-134a), für HFKW-134a verringert sich nun aber diese Anstiegsrate aufgrund europäischer und internationaler (Kigali Anhang zum Montrealer Protokoll) Regulierungen. Emissionen aus Europa werden an allen drei kontinentalen Hintergrundstationen (Jungfraujoch, Mace Head, Monte Cimone) erfasst. In Ny-Alesund auf Spitzbergen sind hingegen praktisch keine regionalen Quellen sichtbar und der Verlauf entspricht der Hintergrundkonzentration in der Nordhemisphäre.

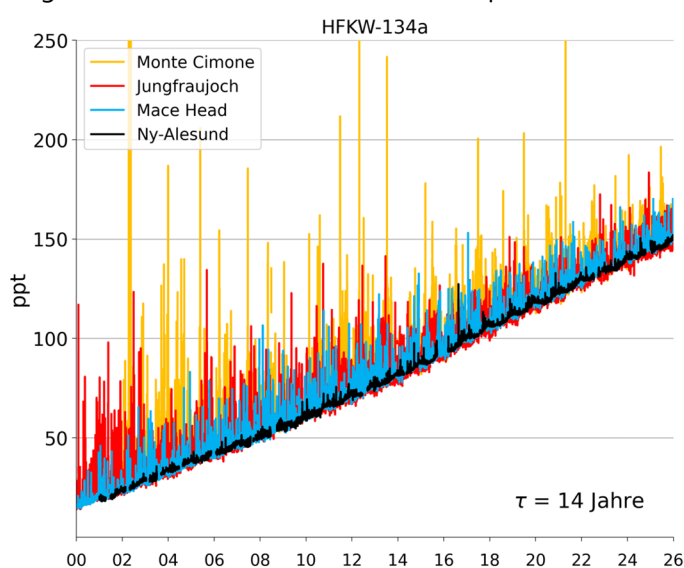


Abbildung 3: Zeitreihen der atmosphärischen HFKW-134a Konzentrationen an vier europäischen Hintergrundstationen.

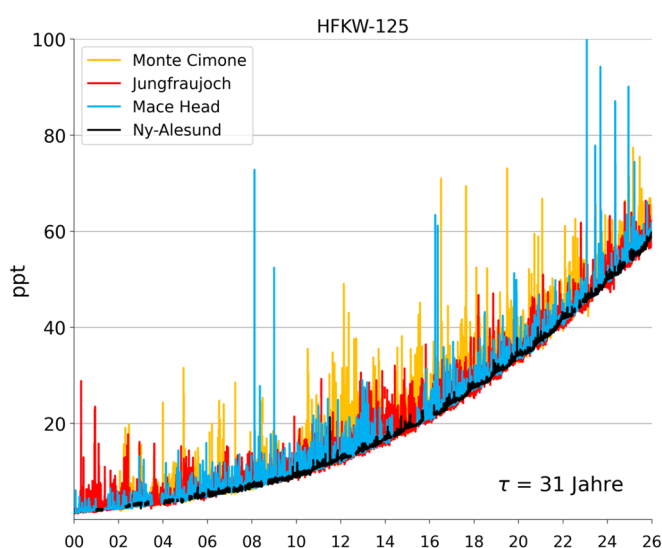


Abbildung 4: Zeitreihen der atmosphärischen HFKW-125 Konzentrationen an vier europäischen Hintergrundstationen.

HFKW-143a und HFKW-32 wurden mehrheitlich (zusammen mit HFKW-125 und HFKW-134a) in Kältemittel-Mischungen eingesetzt (z.B. in R-407C, R-410A). HFKW-143a zeigt einen stabilen Anstieg und die Spitzenkonzentrationen in Mace Head, auf dem Jungfraujoch und in Monte Cimone sind ähnlich ausgeprägt, was auf eine relativ ausgeglichene Verteilung der europäischen Quellen hinweist (Abbildung 5). Für das HFKW-32, findet sich eine Zunahme der jährlichen Anstiegsrate. Diese Substanz wird wegen ihrem relativ kleinen GWP von 680 vermehrt in Kältemittel-Mischungen und auch öfters als Reinsubstanz eingesetzt (Abbildung 6).

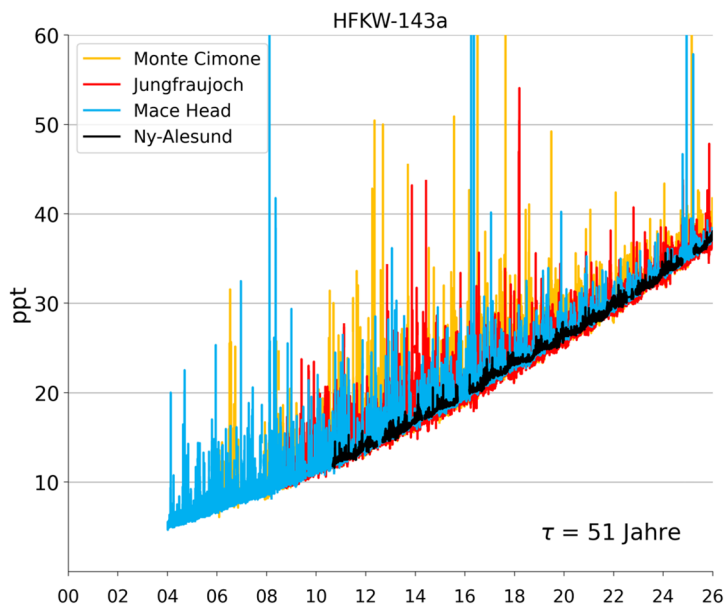


Abbildung 5: Zeitreihen der atmosphärischen HFKW-143a Konzentrationen an vier europäischen Hintergrundstationen.

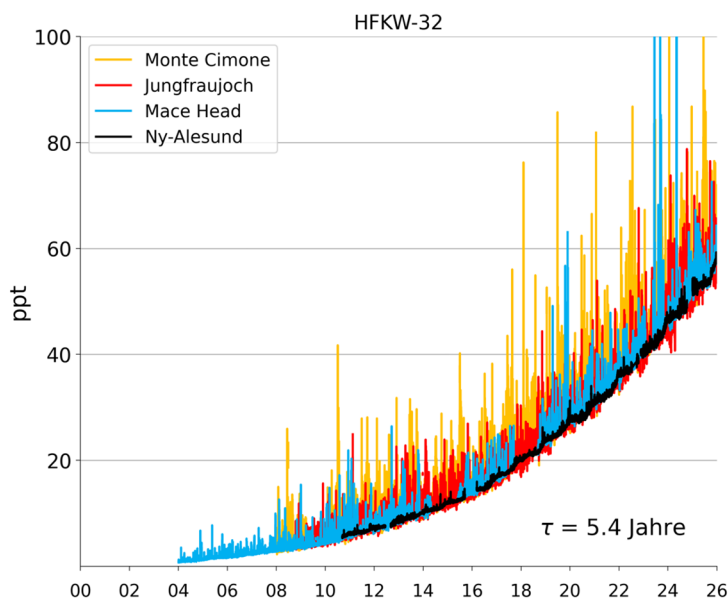
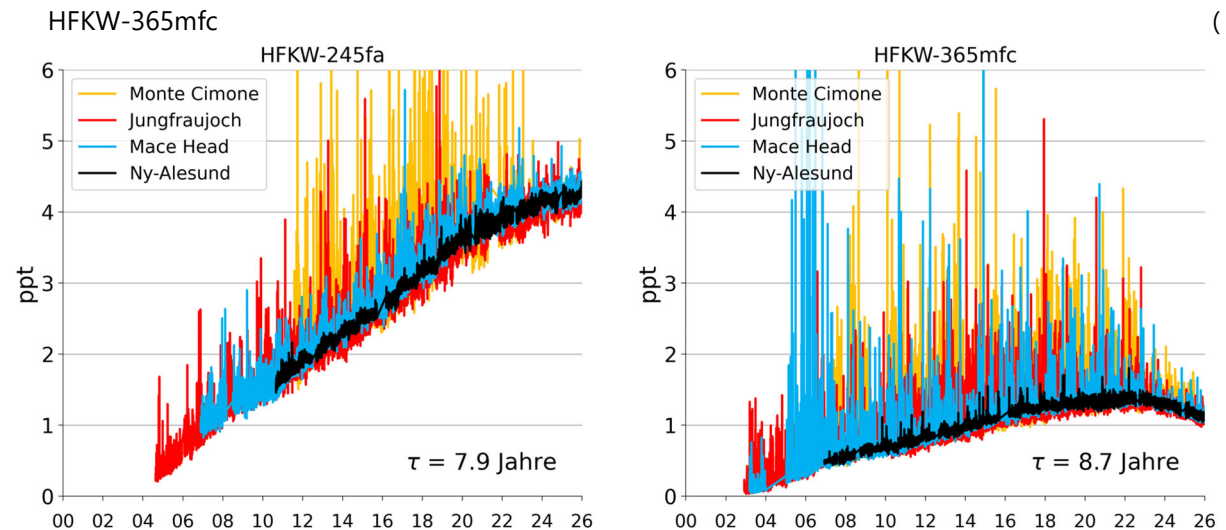
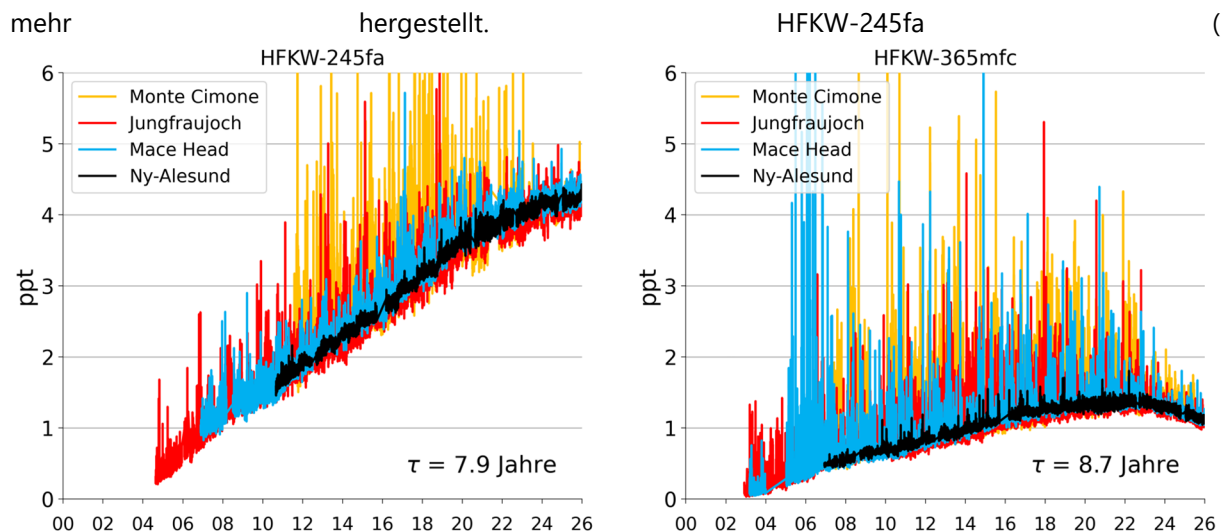


Abbildung 6: Zeitreihen der atmosphärischen HFKW-32 Konzentrationen an vier europäischen Hintergrundstationen.

HFKW-152a (Abbildung 7) wurde vor allem zur Herstellung von Isolationsschäumen eingesetzt. Seit 2011 findet bei abnehmenden Spitzenereignissen in Europa nur eine kleine globale Zunahme der Konzentrationen statt. Gut sichtbar ist die saisonale Schwankung mit tieferen Werten im Sommer, welche in der erhöhten Konzentration des OH-Radikals im Sommer begründet ist. Die relativ schnelle Reaktion von HFKW-152a mit dem OH-Radikal resultiert in einer relativ kurzen atmosphärischen Lebensdauer von nur 1.5 Jahren. Europäische Emissionen von HFKW-152a stammten in den letzten Jahren mehrheitlich aus Italien; diese sind aber in den letzten Jahren stark abnehmend (siehe Abbildung 52). Die kurze Lebensdauer und eine weltweit langsam abnehmende Verwendung haben 2012 – 2020 zu einer Stabilisierung der Konzentrationen geführt. In den letzten Jahren ist allerdings wieder ein leichter globaler Anstieg zu verzeichnen, welcher auf Emissionen aus dem Gebrauch als Feedstock begründet sein dürfte.



hergestellt.



Der globale Anstieg für das HFKW-227ea (Heptafluorpropan, Abbildung 9), welches vor allem in Feuerlöschern und als Treibmittel in Sprays eingesetzt wird (beides ist in der Schweiz nicht erlaubt), ist weiterhin relativ gross (8 %/Jahr). Das sehr langlebige HFKW-236fa (Abbildung 9), welches nur in Nischenprodukten in Kälteanlagen und Feuerlöschern verwendet wird, ist in 10-mal geringeren Konzentrationen als die anderen HFKW in der Atmosphäre vorhanden. Ab dem Jahr 2011 ist jedoch ein konstanter Anstieg der Hintergrundkonzentration zu beobachten. Obwohl die Konzentration und der absolute Anstieg vergleichsweise klein sind, sind sie trotzdem nicht unerheblich, da diese Substanz eine atmosphärische Lebensdauer von über 220 Jahren aufweist und damit ein starkes Akkumulationspotential besitzt. Sporadische Spitzenkonzentrationen in Mace Head und auf dem Jungfraujoch weisen auf nicht kontinuierliche Quellen hin. Diese sind jedoch in den letzten Jahren nicht mehr aufgetreten.

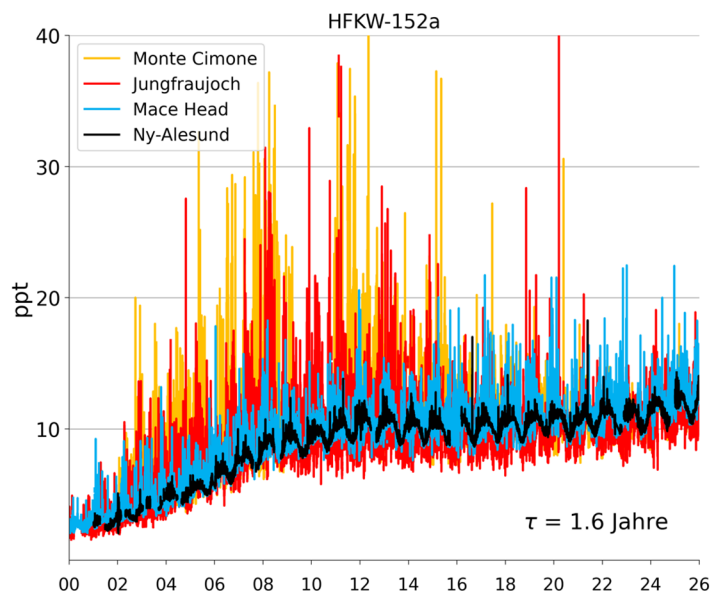


Abbildung 7: Zeitreihen der atmosphärischen HFKW-152a Konzentrationen an vier europäischen Hintergrundstationen.

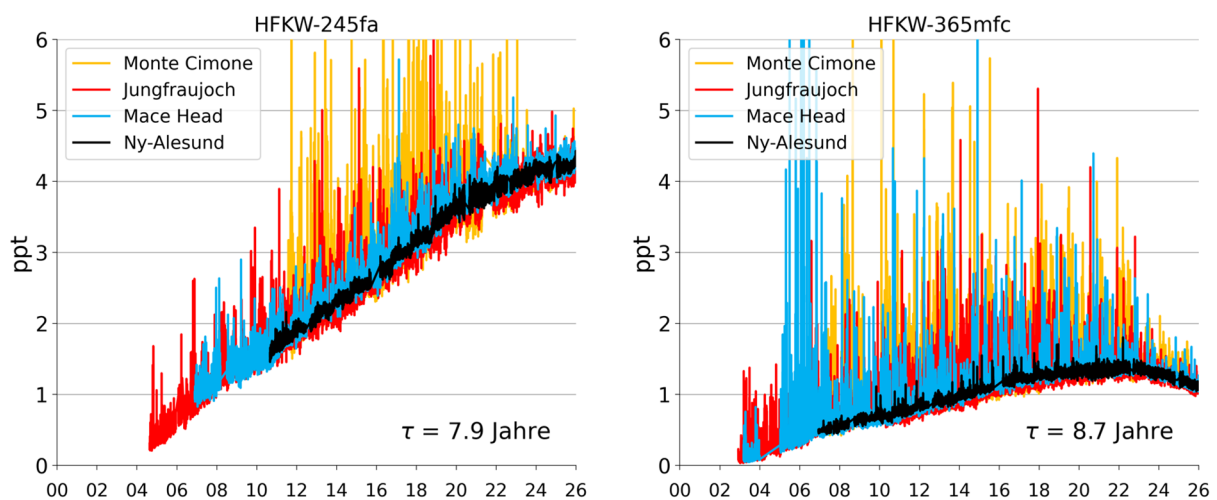


Abbildung 8: Zeitreihen der atmosphärischen HFKW-245fa und HFKW-365mfc Konzentrationen an vier europäischen Hintergrundstationen.

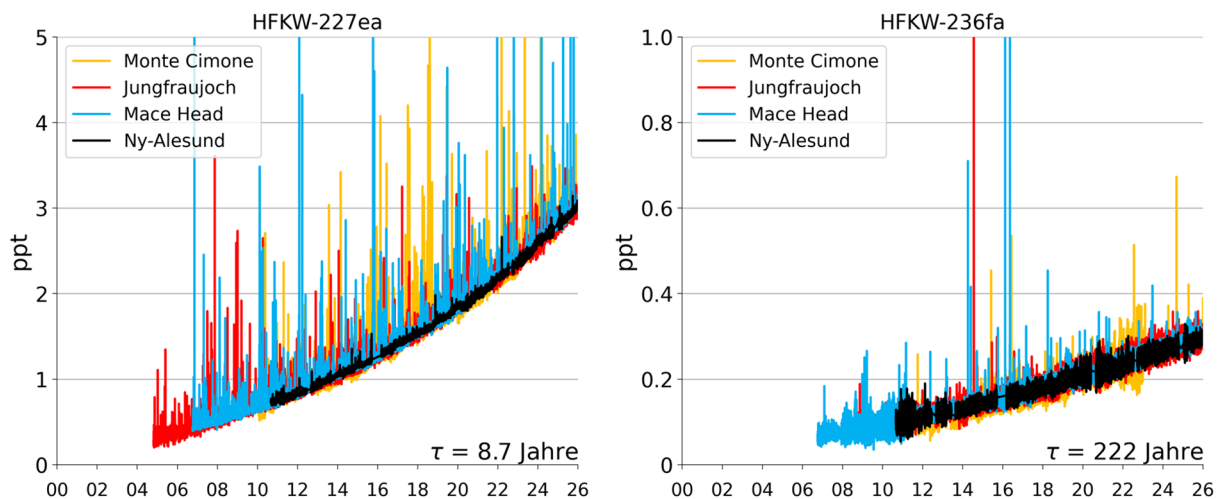


Abbildung 9: Zeitreihen der atmosphärischen HFKW-227ea und HFKW-236fa Konzentrationen an vier europäischen Hintergrundstationen.

Das Lösungsmittel HFKW-4310mee wird an vier europäischen Stationen gemessen. Die Substanz zeigt in den letzten Jahren einen Abwärtstrend (Abbildung 10). Auf dem Jungfraujoch werden nur sehr selten Verschmutzungsereignisse gemessen, während die Mace Head in der frühen Messperiode einige ausgeprägte Ereignisse verzeichnete. Diese Messdaten deuten darauf hin, dass HFKW-4310mee in Europa keine grosse Verwendung hat und auch global in den letzten Jahren an Bedeutung verloren hat. In der Schweiz sind Lösungsmittel mit diesem Stoff nicht zulässig.

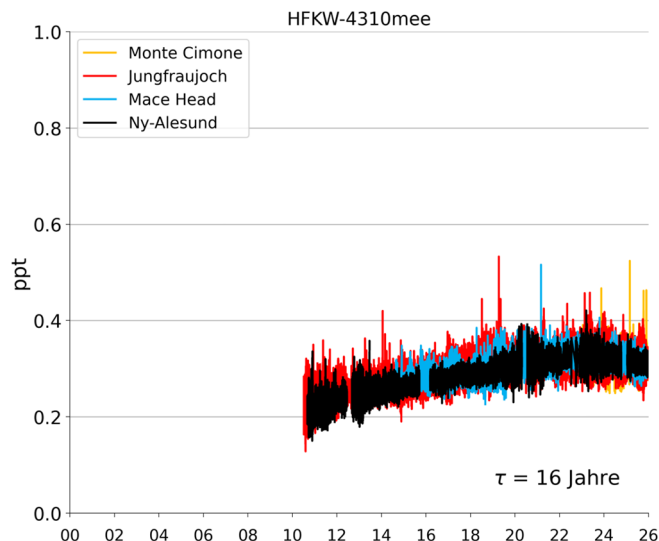


Abbildung 10: Zeitreihen der atmosphärischen HFKW-4310mee Konzentrationen an vier europäischen Hintergrundstationen.

HFKW-23 weist auf dem Jungfraujoch und allen anderen weltweiten Stationen einen kontinuierlichen Anstieg der Hintergrundkonzentration auf (Abbildung 11). Dieser hat sich in den letzten Jahren leicht abgeschwächt. HFKW-23 stammt zum grossen Teil aus der Produktion von HFCKW-22, wo es durch eine sogenannte Überfluorierung als Nebenprodukt der folgenden Reaktion entsteht:



Die auf dem Jungfraujoch auftretenden Spitzenereignisse stammen fast ausschliesslich aus einer einzigen HFCKW-22 Produktionsanlage in Norditalien.

Die europäischen Produktionsanlagen sind eigentlich alle mit einer thermischen Nachverbrennung ausgerüstet, welche den Grossteil des gebildeten HFKW-23 zerstören. Trotzdem gelangt der Stoff teilweise in die Atmosphäre, wo er wegen seinem hohen Treibhausgaspotential ($GWP=12'400$) eine Wirkung auf das Klima hat. Zudem ist die globale Konzentration dieser Substanz immer noch stetig ansteigend, was vor allem durch grosse Emissionen in China bewirkt wird.

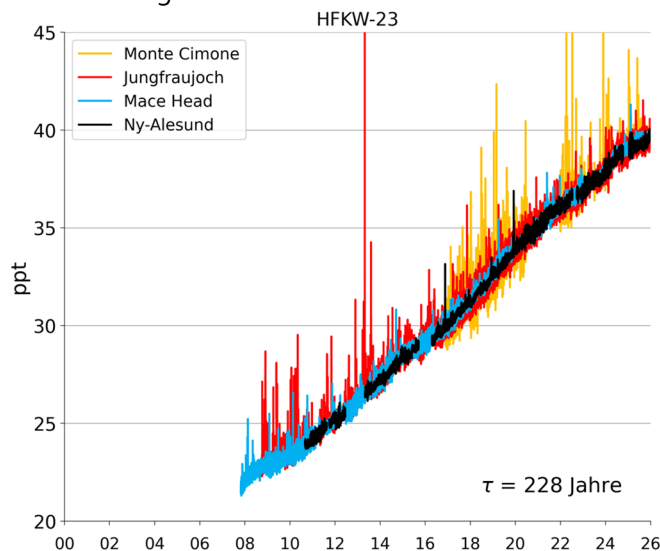


Abbildung 11: Zeitreihen der atmosphärischen HFKW-23 Konzentrationen an vier europäischen Hintergrundstationen.

3.1.3 Kurzlebige ungesättigte HFKW und HFCKW auf dem Jungfraujoch

Da langlebige HFKW ein hohes Treibhausgaspotential aufweisen (z.B. GWP (100 Jahre) von HFKW-134a: 1300; Myhre and Shindell, 2013), hat sich der umweltpolitische Druck in den letzten Jahren erhöht, diese Substanzen zu ersetzen. Deshalb wurde 2016 im Kigali Amendment zum Montrealer Protokoll beschlossen, dass die Industrieländer die Herstellung und den Verbrauch der langlebigen HFKW bis zum Jahr 2036 schrittweise auf 15 % des Niveaus von 2011-2013 reduzieren müssen. Die Entwicklungs- und Schwellenländer müssen dieses Ziel bis 2047 erreichen, wobei der Referenzzeitraum für diese Länder auf 2020-2022 festgelegt wurde. Die Schweiz hat das Kigali Amendment 2018 ratifiziert.

Als Ersatzprodukte für die langlebigen HFKW werden seit einiger Zeit ungesättigte HFKW (Hydrofluorolefine, HFO) eingesetzt - als Einzelsubstanzen oder in Mischungen mit langlebigen HFKW. In Abbildung 12 sind die halogenierten Propene gezeigt, welche auf dem Jungfraujoch als weltweit erste Station routinemässig seit 2011 gemessen werden (Vollmer et al., 2015). Seit einigen Jahren haben auch andere AGAGE Stationen begonnen diese kurzlebigen Substanzen zu messen. Das erlaubt erste Emissionsabschätzungen, insbesondere in Europa, wo das Messnetz relativ dicht ist (Vollmer et al., 2026).

Das HFO-1234yf ($CF_3CF=CH_2$) wird vor allem in Autoklimaanlagen eingesetzt, da in Europa ab 2017 in allen neuen Autotypen gemäss der Europäischen Richtlinie 2006/40/EG nur noch Kältemittel eingesetzt werden sollen, welche ein GWP -100 (Basis 100 Jahre) von weniger als 150 haben. Diese Substanz hat in mittleren Breitengraden eine Lebensdauer von nur 15 Tagen und ein GWP von <1 . Bei ihrem Abbau entsteht jedoch die sehr persistente Trifluoressigsäure (TFA), welche schwach phytotoxisch ist. HFO-1234yf war auf dem Jungfraujoch 2011/2012 nur während einzelner Verschmutzungsereignisse messbar. Aber seit 2013 haben die Ereignisse mit detektierbarem HFO-1234yf in Häufigkeit und Grösse

deutlich zugenommen. Die Messreihe ist daher ein gutes Beispiel der Früherkennung durch kontinuierliche Beobachtungen.

Das HFO-1234ze(E) ($\text{trans-CF}_3\text{CH=CHF}$) findet seit einigen Jahren Verwendung als Schäumungsmittel, in Aerosolen/Druckgaspackungen und in Kältemittel-Mischungen. Diese Substanz hat in mittleren Breitengraden eine Lebensdauer von 15-19 Tagen und ein GWP von <1 . Bei ihrem Abbau entstehen nur sehr geringe Mengen an TFA. HFO-1234ze(E) zeigt auf dem Jungfraujoch ab 2018 einen erheblichen Anstieg der Konzentrationen, was auf den vermehrten Gebrauch dieser Substanz in Europa zurückzuführen ist. Zudem traten schon in den Jahren vorher kurzzeitig während einiger Tage sehr grosse Verschmutzungsereignisse auf, insbesondere 7 Ereignisse jeweils in den Spätwintern 2012 – 2019, welche Höchstkonzentrationen bis zu 14 ppt zeigten (Abbildung 12).

HCFO-1233zd(E) ($\text{trans-CHCl=CH-CF}_3$) wird als Kälte-, Schäumungs- und Lösungsmittel eingesetzt (in der Schweiz aktuell nur als Kältemittel sowie als Schäumungsmittel eingeschränkt zulässig). Diese Substanz enthält neben Fluor auch Chlor und weist eine etwas längere Lebensdauer als die beiden kurzlebigen HFO auf (37 Tage in mittleren Breitengraden). HCFO-1233zd(E) weist auf Grund des stärkeren photochemischen Abbaus im Sommer einen deutlichen saisonalen Zyklus auf. In den Jahren 2013 und 2014 war HCFO-1233zd(E) auf dem Jungfraujoch in vielen Luftproben noch nicht nachweisbar, aber seit 2015 sind alle Messungen über der Detektionsgrenze, was auf ansteigende Emissionen hinweist (Abbildung 12).

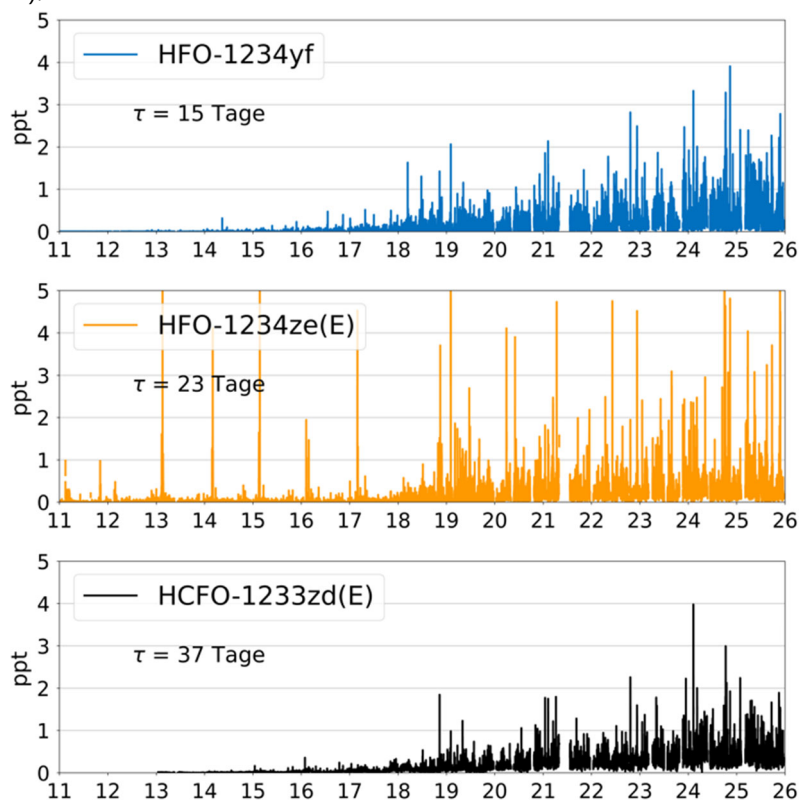


Abbildung 12: Zeitreihen der atmosphärischen Konzentrationen der kurzlebigen ungesättigten HFO-1234yf, -1234ze(E) und HCFO-1233zd(E) auf dem Jungfraujoch.

3.1.4 Inhalationsanästhetika (Flurane) auf dem Jungfraujoch

Seit 2013 werden langlebige fluorierte Inhalationsanästhetika auf dem Jungfraujoch gemessen (Abbildung 13). Die drei Substanzen aus der Gruppe der Flurane (fluorierte Ether) sind sehr stabil, sowohl

während der Applikation im Operationssaal (praktisch keine Metabolisierung) als auch in der Atmosphäre. In Europa werden Sevofluran (Lebensdauer 1.1 Jahre, GWP 130), Desfluran (Lebensdauer 14 Jahre, GWP 2540) und Isofluran (Lebensdauer 3.2 Jahre, GWP 510) verwendet. In der Schweiz werden Sevofluran und Desfluran hauptsächlich in der Humanmedizin angewandt, während Isofluran in der Tiermedizin genutzt wird. Die Messungen auf dem Jungfraujoch zeigen häufige kleinere Verschmutzungsereignisse und leicht ansteigende Konzentrationen. In den letzten beiden Jahren ist hingegen die Konzentration von Desfluran leicht sinkend. Der Grund dafür ist vermutlich das Verbot (ab 2026, F-gas Regulierung), diese Substanz zu verwenden. Einige Länder (Schottland, UK) hatten schon vorgängig stringente Regulierungen veranlasst.

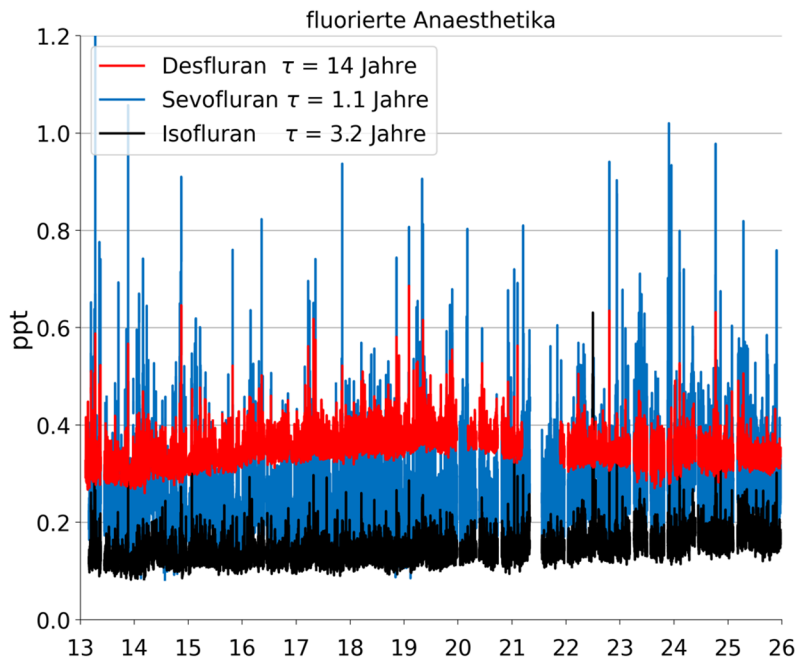


Abbildung 13: Zeitreihen der atmosphärischen Konzentrationen von Sevofluran, Desfluran und Isofluran auf dem Jungfraujoch.

3.1.5 Schwefelhexafluorid (SF₆) und perfluorierte Verbindungen (PFKW) in Europa

SF₆ wird vor allem als Schutzgas in elektrischen Hochspannungsschaltern eingesetzt. Obwohl seine Emissionen klein sind, ist es bedingt durch seine Lebensdauer von 3'200 Jahren ein wichtiges Treibhausgas. Seit Jahren steigen die SF₆ Konzentrationen linear an (Abbildung 14). Eine unverminderte Emission auf dem heutigen Niveau könnte dazu führen, dass SF₆ in der Zukunft zu einem der dominanten Nicht-CO₂-Treibhausgase werden könnte.

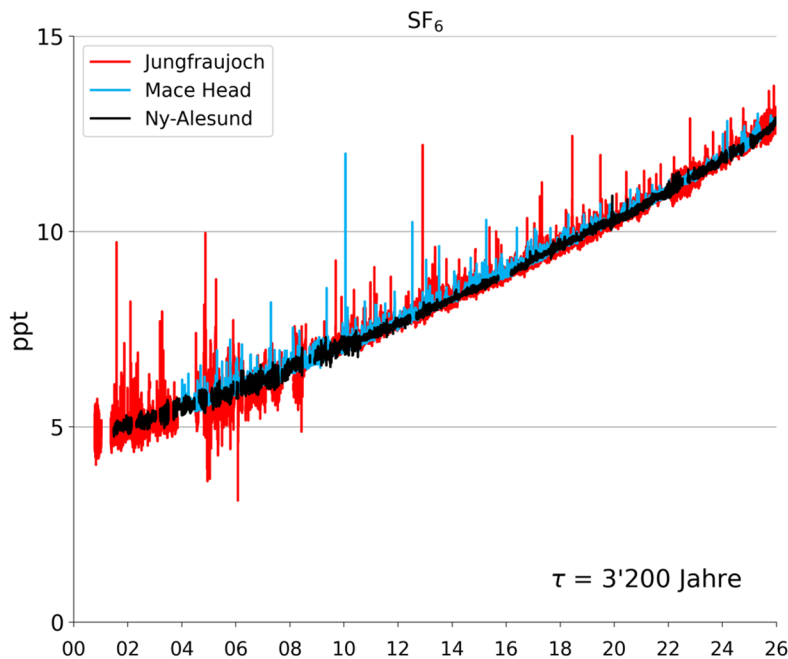


Abbildung 14: Zeitreihen der atmosphärischen HFKW-23 Konzentrationen an vier europäischen Hintergrundstationen.

Durch die Einführung des Medusa Systems Ende 2008 hat sich die Anzahl und die Qualität der Messungen von perfluorierten Verbindungen auf dem Jungfraujoch stark verbessert. In der Abbildung 15 sind die gemessenen Konzentrationen der sehr langlebigen perfluorierten Kohlenwasserstoffe aufgezeigt. Dabei zeigt sich für alle der gemessenen Substanzen ein kontinuierlicher Anstieg, da die Emissionen deutlich höher sind als die vor allem durch hartes UV-Licht erfolgende Zerstörung in sehr grosser Höhe.

Emissionen von PFKW-116 (C₂F₆) und PFKW-218 (C₃F₈) finden bei der Produktion von Aluminium und bei der Herstellung von elektronischen Leiterplatten statt. Auf dem Jungfraujoch werden jedoch praktisch keine Verschmutzungsereignisse gemessen. PFKW-318 (c-C₄F₈) weist nach CF₄ und PFKW-116 die dritthöchsten Konzentrationen innerhalb der PFKW in der globalen Atmosphäre auf. Die globale Anstiegsrate dieser langlebigen Substanz (atmosphärische Lebensdauer 3200 Jahre) beträgt zurzeit etwa 0.1 ppt/Jahr (ca. 4 %/Jahr). Während im Einzugsgebiet des Jungfraujochs selten Emissionen festgestellt werden, zeigen die asiatischen AGAGE Stationen starke und häufige Emissionsereignisse.

CF₄ weist mit ca. 92 ppt die höchste Hintergrundkonzentration auf (Abbildung 15, rechte y-Achse). Ungefähr 35 ppt waren vorindustriell schon vorhanden und sind auf natürliche Quellen aus der Verwitterung von fluorhaltigen Gesteinen zurückzuführen. Die dominante anthropogene Quelle für CF₄ ist die Herstellung von Aluminium, wo es bei der Elektrolyse der Schmelze aus Aluminiumoxid und synthetischem, fluorhaltigem Kryolith im Kontakt mit den kohlenstoffhaltigen Elektroden entsteht.

C₆F₁₄ (PFKW-51-14) wird auf dem Jungfraujoch seit 2011 gemessen (Abbildung 15). Die Konzentration liegt momentan bei ca. 0.34 ppt. Die Zeitreihe zeigt einen leichten Aufwärtstrend, dessen Quantifizierung zurzeit jedoch noch unsicher ist. C₆F₁₄ wurde ursprünglich als Ersatzstoff für verschiedene im Montrealer Protokoll reglementierte Substanzen in den Bereichen Kühlung, Reinigung und sogar Feuerenschutz eingesetzt. C₆F₁₄ wird in den meisten Einsatzbereichen von Substanzen mit geringerem GWP verdrängt, aber es wird weiterhin in der Halbleiterindustrie verwendet.

Stickstofftrifluorid (NF₃) wurde 2008 von der Arbeitsgruppe am SIO mit einem umgebauten Medusa-GCMS System erstmals in der Atmosphäre bestimmt. Mit dem Umbau der letzten drei Stationen im 2016

wurde diese Substanz in das reguläre Messprogramm von AGAGE aufgenommen. Seit Beginn der Messungen wurden auf dem Jungfraujoch keine Verschmutzungsereignisse beobachtet. Global steigt NF_3 aber mit etwa 10 %/Jahr an, wobei Emissionen vor allem bei Stationen in Asien sichtbar sind.

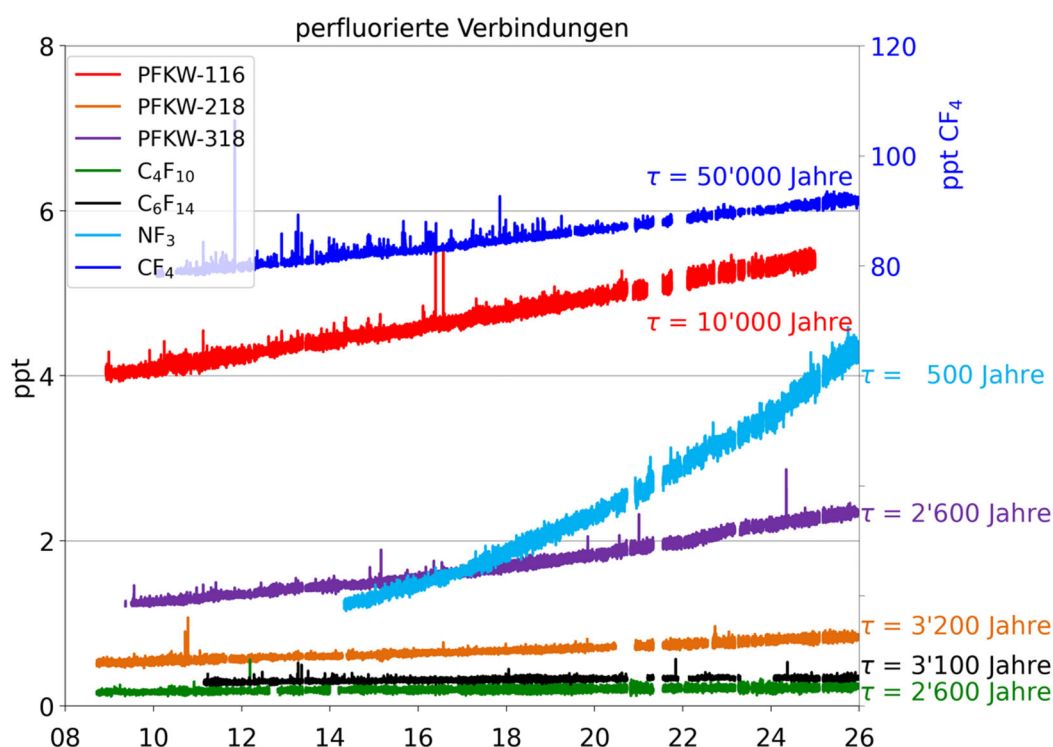


Abbildung 15: Zeitreihen der atmosphärischen Konzentrationen der perfluorierten Verbindungen auf dem Jungfraujoch. Rechte Achse: CF_4 ; Linke Achse: PFKW-116 (C_2F_6), PFKW-218 (C_3F_8), PFKW-318 (cyclo- C_4F_8), C_4F_{10} , C_6F_{14} , und NF_3 .

3.1.6 Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW) und Halone in Europa

Die im Montrealer Protokoll reglementierten FCKW-11, -12 und -113 zeigen auf dem Jungfraujoch (wie auch an allen anderen globalen Stationen) eine kontinuierliche Abnahme (Abbildung 16). Beim FCKW-12 ist die deutliche Verbesserung der Messgenauigkeit ab 2008 mit der Medusa-Technologie gut sichtbar. Obwohl diese Substanzen seit 2010 mit einem weltweiten Verbot für die Herstellung und den Verbrauch belegt sind, werden auf dem Jungfraujoch immer noch sporadisch kleine Emissionen aus den umliegenden europäischen Ländern gemessen (möglicherweise aus alten Anlagen oder Schäumen), jedoch mit deutlich rückläufigem Trend (siehe auch Abbildung 55).

Die auf dem Jungfraujoch und im ganzen AGAGE verwendete Medusa-GCMS Messmethodik erlaubt keine Unterscheidung zwischen den beiden Isomeren FCKW-113 und FCKW-113a. Das war bis anhin unproblematisch, weil FCKW-113a in sehr geringen und relativ stabilen Konzentrationen vorgekommen ist. Es wird allerdings als Ausgangsprodukt zur Herstellung anderer fluorierter Verbindungen verwendet und steigt aufgrund erhöhter Leckagen in der Atmosphäre stark an, wie unabhängige Studien zeigen. Das beeinflusst die vermeintlich als nur FCKW-113 bezeichnete Messung dadurch, dass die Abnahme in der Atmosphäre nicht so stark ist, wie angenommen. Leider ist die kombinierte FCKW-113/a Messung

in der AGAGE Messmethode nicht einfach eine Summe der beiden FCKW-113 und FCKW-113a Konzentration, weil die massenspektrometrischen molaren Empfindlichkeiten spezifischer Fragmente für die beiden Substanzen unterschiedlich sind. Es sind zur Zeit Anstrengungen im Gange, die Messungen der beiden Isomere im Labor besser zu charakterisieren und in den Messreihen numerisch-analytisch zu trennen.

In den in viel kleineren Konzentrationen vorliegenden aber sehr langlebigen FCKW-13, -114 und -115 findet hingegen keine Abnahme statt (Tabelle 1). Der Grund dafür könnte in deren Verwendung und Bildung in der Produktion von erlaubten halogenierten Verbindungen sein, wo diese unerwünschten Stoffe in die Atmosphäre gelangen.

Halon-1211 (CBrClF_2) und Halon-1301 (CBrF_3) werden in Feuerlöschern eingesetzt und weisen Konzentrationen von ca. 3.5 ppt auf (

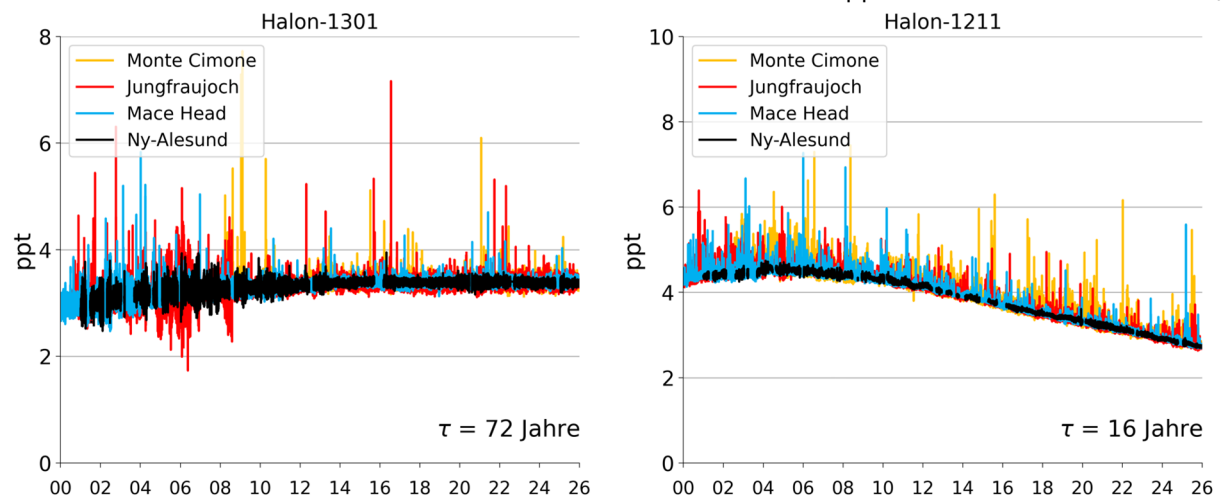


Abbildung 17). Sie wurden ebenfalls 2010 im Montrealer Protokoll verboten, allerdings mit gewissen Ausnahmen (z.B. Einsatz in Flugzeugen und Militäranlagen). Halon-1301 ist bis vor ein paar Jahren in der Atmosphäre immer noch angestiegen, hat sich aber mittlerweile stabilisiert. Auf dem Jungfraujoch führt wiederum die verbesserte Analytik nach 2008 zu einer besseren Messgenauigkeit. Für das reaktivere Halon-1211 finden sich zwar immer noch messbare Ereignisse aus Europa, die Hintergrundkonzentration sinkt jedoch bedingt durch die relativ kurze Lebensdauer. Die Konzentration von Halon-2402 liegt bei ca. 0.4 ppt und stagniert dort seit ca 2 Jahren (keine Grafik). Auf dem Jungfraujoch werden keine Verschmutzungsereignisse von Halon-2402 gemessen.

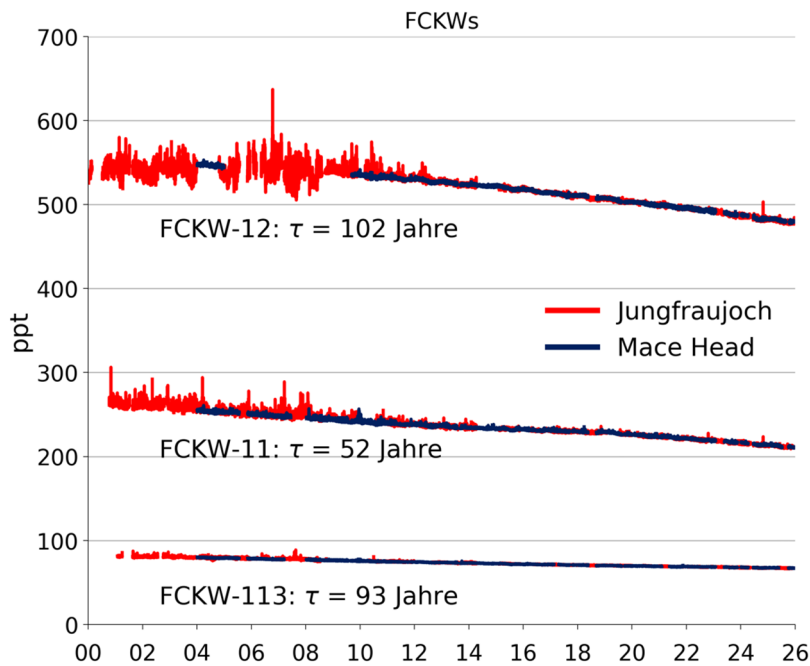


Abbildung 16: Zeitreihen der atmosphärischen Konzentrationen von FCKW-11, FCKW-12 und FCKW-113 an zwei europäischen Hintergrundstationen.

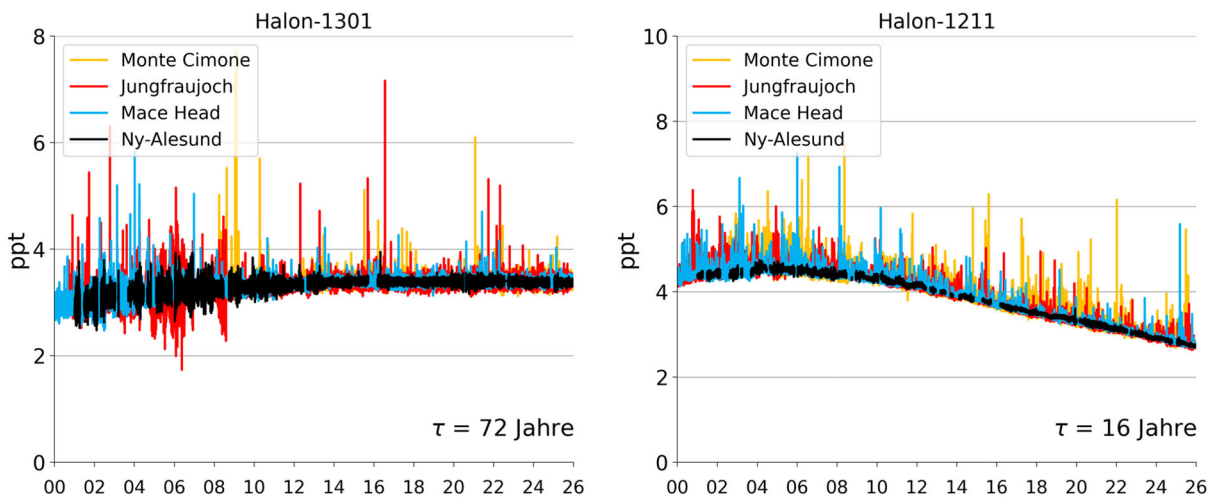


Abbildung 17: Zeitreihen der atmosphärischen Konzentrationen von Halon-1301 (CBrF_3) und Halon-1211 (CBrClF_2) an vier europäischen Hintergrundstationen.

3.1.7 Hydrofluorchlorkohlenwasserstoffe (HFCKW) in Europa

HFCKW-22 und HFCKW-142b konnten auf dem Jungfraujoch bis Mitte 2012 nicht gemessen werden, da sehr grosse lokale Emissionen aus den Isolationsschäumen des Liftschachtes und der Abdeckungen im Einlassbereich die Probenluft signifikant beeinflussten. In mehreren Ansätzen wurde versucht, dieses Problem zu lösen, aber erst durch das Verlegen des Lufteinlasses in Richtung Mönch konnte das Problem definitiv behoben werden. Für HFCKW-142b ist das Problem der Verschmutzung aber teilweise wieder aufgetaucht.

HFCKW-22 wurde in grossen Mengen als Kältemittel in Klimaanlage eingesetzt und eher selten als Treibmittel für Schäume. Sein Einsatz ist heute in Europa sehr stark eingeschränkt. Mit ~260 ppt hat HFCKW-22 ca 2022 die mit Abstand höchste Konzentration aller HFCKW in der Atmosphäre erreicht

(Abbildung 18). Diese relativ langlebige Substanz (Lebensdauer 12 Jahre) nimmt seither trotz ihres weitverbreiteten Gebrauchs in den Entwicklungsländern langsam ab.

Das vor allem in der Schaumstoffherstellung verwendete HFCKW-141b zeigte nach dem Verbot seines Gebrauchs in der EU in der Schaumstoffherstellung ab 2003 (in der Schweiz galt ein Verbot für die Herstellung und die Einfuhr schon ab dem Jahr 2000) zuerst eine Stabilisierung der Konzentrationen (Abbildung 19). Danach fand jedoch wegen dem erhöhten Gebrauch von HFCKW-141b (und der übrigen HFCKW) in Entwicklungsländern wie China und Indien ein Wiederanstieg statt. In den Jahren 2016 – 2018 war wiederum ein Absinken der globalen Konzentrationen zu verzeichnen, dann aber 2018 – 2020 ein Ansteigen mit folgender Stabilisierung und seit 2022 wieder ein Abwärtstrend.

HFCKW-142b fand seine Verwendung ebenfalls in Kälteanlagen und als Schäumungsmittel. Auf dem Jungfraujoch werden noch zeitweise zum Teil grosse Verschmutzungsereignisse aufgrund von europäischen Emissionen gemessen (Abbildung 19). Global ist die HFCKW-142b Konzentration in den letzten zehn Jahren gesunken.

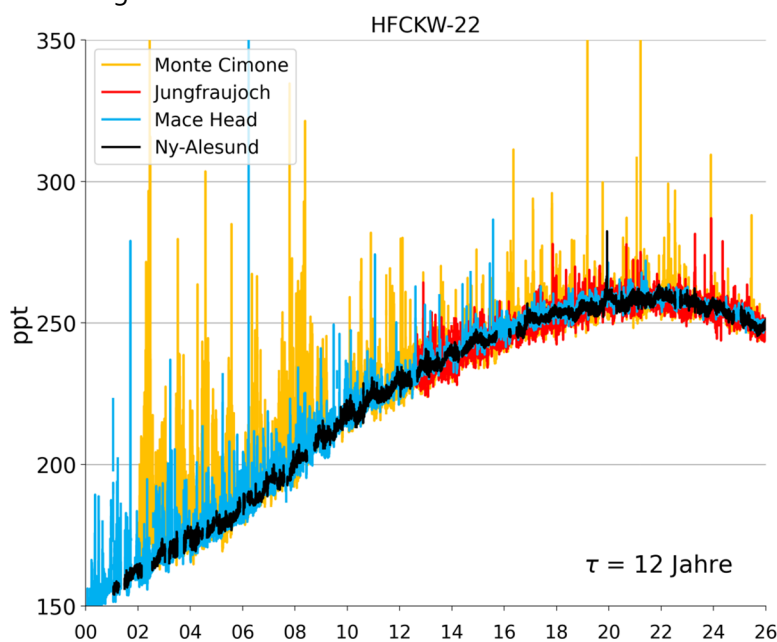


Abbildung 18: Zeitreihen der atmosphärischen Konzentrationen von HFCKW-22 an vier europäischen Hintergrundstationen.

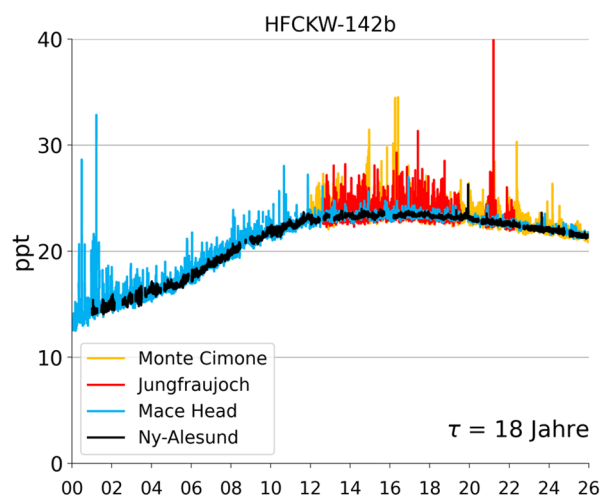
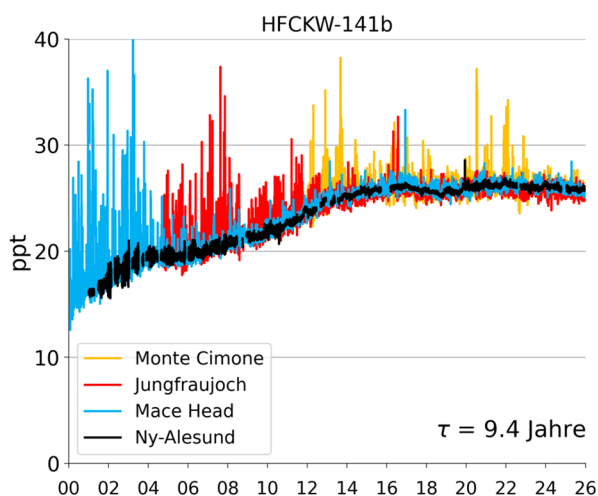


Abbildung 19: Zeitreihen der atmosphärischen Konzentrationen von HFCKW-141b und HFCKW-142b an vier europäischen Hintergrundstationen.

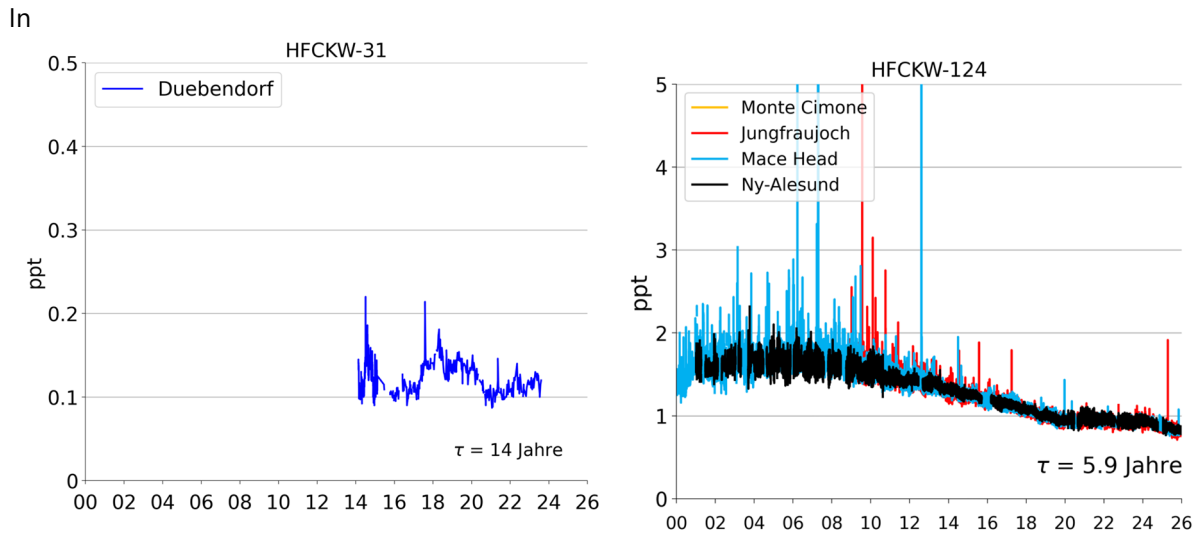


Abbildung 20 sind die Konzentrationen von HFCKW-132b, HFCKW-133a, HFCKW-31 und HFCKW-124 dargestellt. HFCKW-124 wurde in kleineren Mengen in Kühlanlagen in Mischungen eingesetzt und nahm bis vor kurzem als Folge des verschärften Montreal Protokolls weltweit ab. Dieser Trend hat nun gestoppt und könnte auf Emissionen als Nebenprodukt aus Industrieanlagen zurückzuführen sein. Die drei übrigen HFCKWs wurden erst vor einigen Jahren in der Atmosphäre entdeckt. HFCKW-132b ($\text{CH}_2\text{ClCClF}_2$) und HFCKW-133a (CH_2ClCF_3) wurden weltweit erstmals auf dem Jungfraujoch gemessen. Die Herkunft beider Substanzen in der Atmosphäre ist unklar, dürfte jedoch einen Zusammenhang mit der Herstellung von HFKW-134a haben, wo beide Substanzen als Nebenprodukte anfallen und von wo sie durch Leckage in die Atmosphäre gelangen können. Die bis 2017 sporadischen hohen, aus westlicher Richtung angeströmten Verschmutzungsereignisse auf dem Jungfraujoch stammten mit grösster Wahrscheinlichkeit von Fabrikationsanlagen von HFKW-134a und HFKW-125 in Frankreich. Diese traten aber in den letzten Jahren nicht mehr auf, was mit der Schliessung der Anlage zu tun hat. In der globalen Atmosphäre ist HFCKW-132b seit 2017 kontinuierlich angestiegen, HFCKW-133a ist nach einer Phase der Abnahme (2017 – 2020) nun wieder leicht am Ansteigen.

Das HFCKW-31 kann mit der normalerweise in AGAGE verwendeten Methode wegen chromatographischer Überlappung mit anderen Substanzen nicht gemessen werden. In Dübendorf werden deshalb alle zwei Wochen Luftproben in Kanister gefüllt, welche periodisch nach Umstellen der analytischen Methode auf einem Laborgerät gemessen werden (Abb. 20). Die Konzentrationen variieren im Bereich von 0.1-0.2 ppt. Das produzierte und emittierte HFCKW-31 stammt dabei aus der unvollständigen Umwandlung von Methylenchlorid (CH_2Cl_2) in HFKW-32. Die momentanen globalen Quellen schwanken, sind aber kleiner als 1 kt/Jahr.

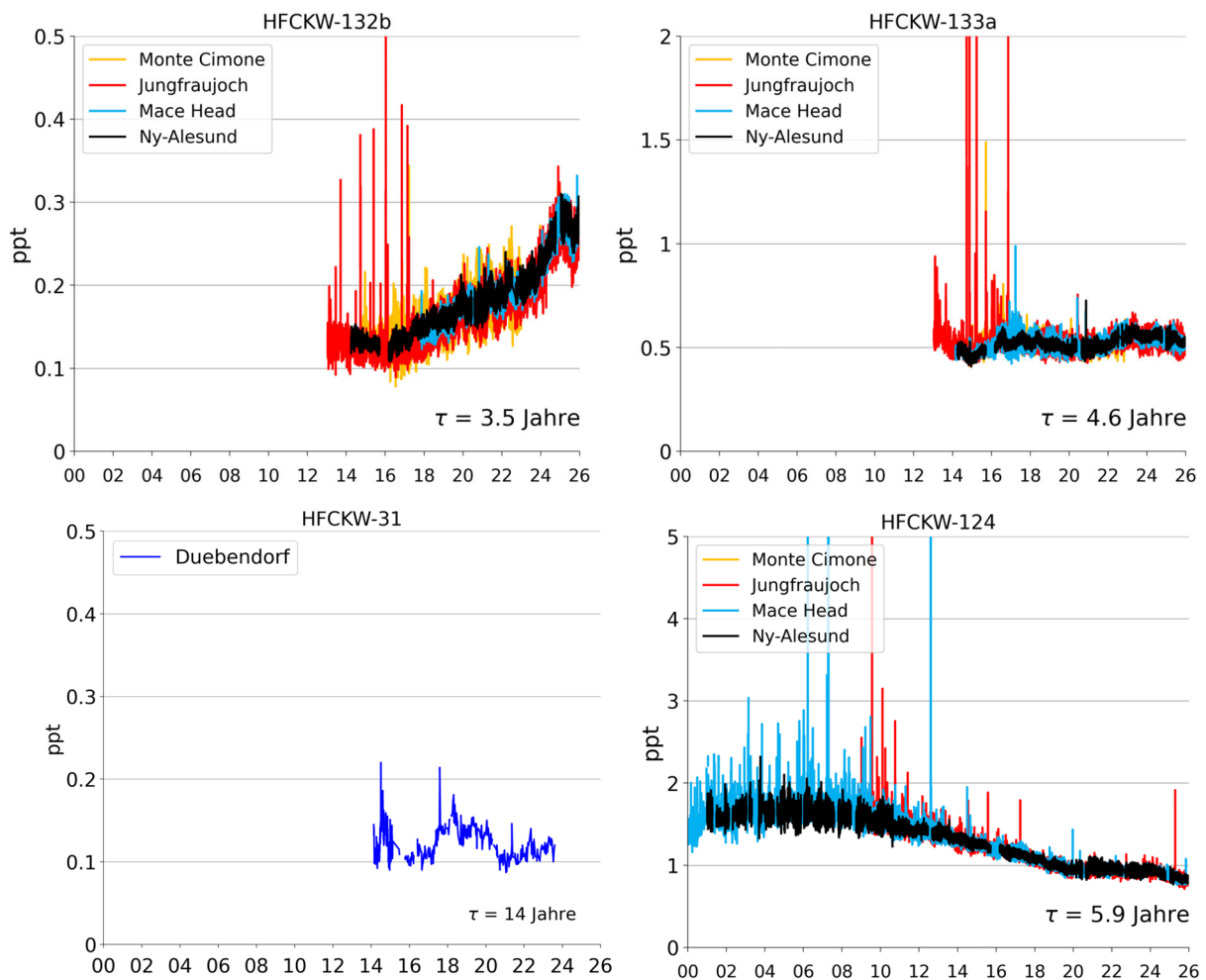


Abbildung 20: Zeitreihen der atmosphärischen Konzentrationen von HFCKW-132b, HFCKW-133a, HFCKW-124 an vier europäischen Hintergrundstationen und HFCKW-31 in Dübendorf.

3.1.8 Chlorierte Lösemittel in Europa

1,1,1-Trichlorethan (CH_3CCl_3) wurde weltweit in grossen Mengen zur Entfettung von Metallteilen und als Lösemittel eingesetzt. Nach dessen Verbot in den Industrieländern kam es zu einer raschen Abnahme der Konzentrationen, begünstigt durch die kurze Lebensdauer von nur 5 Jahren (Abbildung 21). Diese nahezu exponentielle Abnahme von 1,1,1-Trichlorethan weist darauf hin, dass die Substanz weltweit praktisch nicht mehr eingesetzt wird. Erhöhte Konzentrationen auf dem Jungfraujoch stammen aus westlicher Richtung.

Für den früher als Lösemittel verwendeten Tetrachlorkohlenstoff (CCl_4) ist die Abnahme, bedingt durch die längere Lebensdauer von 32 Jahren, bedeutend langsamer (Abbildung 21). Sporadisch treten auf dem Jungfraujoch leicht erhöhte Konzentrationen auf, was auf eine europäische Quelle hinweist. Global sind jedoch bedeutend grössere Quellen vorhanden, da der Einsatz von CCl_4 zur Verwendung in Herstellungsprozessen ("feedstock") weiterhin erlaubt ist. Dies wird dadurch begründet, dass nur geringe Mengen dieses Stoffes den Produktionsprozess verlassen könnten. Momentan sinken die Konzentrationen von CCl_4 weniger schnell, als auf Grund der Annahmen über die rapportierten Quellen und der Lebensdauer erwartet würde. Dies dürfte auf zu hohe Emissionen während der industriellen Produktion von HFCKWs und HFOs zurückzuführen sein.

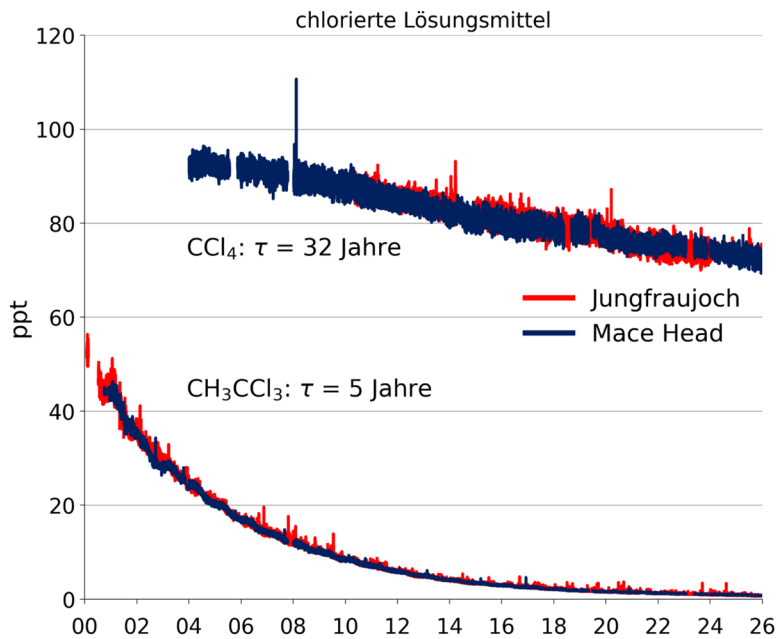


Abbildung 21: Zeitreihen der atmosphärischen Konzentrationen von 1,1,1-Trichlorethan (CH_3CCl_3) und Tetrachlorkohlenstoff (CCl_4) an zwei europäischen Hintergrundstationen.

Kurzlebige chlorierte Kohlenwasserstoffe, welche vor allem als Lösungsmittel eingesetzt werden, wurden im Montrealer Protokoll nicht reglementiert, da angenommen wurde, dass nur ein verschwindend kleiner Teil des Chlors dieser Substanzen bis in die Stratosphäre gelangt. Als Beispiel ist in Abbildung 22 das Lösemittel Methylenchlorid (CH_2Cl_2) gezeigt, mit sehr hohen Spitzenkonzentrationen an allen europäischen Stationen mit Ausnahme von Ny-Alesund (Spitzbergen). Der Grund für den für diese Substanz erkennbaren globalen Anstieg ist nicht bekannt, mögliche Ursache könnte aber die vermehrte Herstellung einzelner fluoriierter Substanzen, wie z.B. HFKW-32, sein. Die gleichbleibenden Spitzenereignisse an den europäischen Stationen deuten wiederum auf eine Quelle ausserhalb Europas hin.

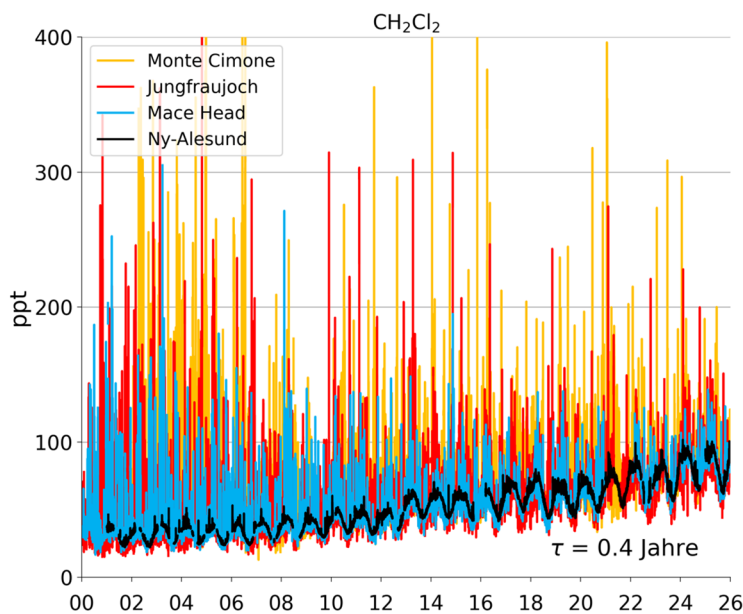


Abbildung 22: Zeitreihen der atmosphärischen Konzentrationen von CH_2Cl_2 (Methylenchlorid) an vier europäischen Hintergrundstationen.

3.1.9 CH₃Br (Methylbromid) und SO₂F₂ (Sulfurylfluorid) in Europa

Methylbromid (CH₃Br) wurde früher als Begasungsmittel in der Landwirtschaft eingesetzt. Von der Natur wird es auch natürlich aus dem Meer und aus der Vegetation freigesetzt. Durch das Montrealer Protokoll ist die Begasung in der Landwirtschaft in Industrieländern seit 2006 verboten. Die Verwendung zur Desinfektion im Warentransport (Quarantine and Pre-Shipment, QPS) ist jedoch nach wie vor erlaubt. In Europa wurden allerdings seit 2009 (CH seit 2007) keine Ausnahmen mehr genehmigt. In den Entwicklungsländern ist die Verwendung von CH₃Br in der Landwirtschaft ab 2015 ebenfalls verboten.

An den europäischen Stationen ist der Trend für CH₃Br einheitlich negativ und es wird erwartet, dass sich die Konzentration langsam einem natürlichen Wert von ca. 5-6 ppt annähern wird. Zudem sind in den letzten Jahren auf dem Jungfraujoch und auf dem Monte Cimone keine Spitzenereignisse mehr sichtbar, was auf den weitgehenden Verzicht auf diese Substanz in Europa zurückzuführen ist (Abbildung 23).

Sulfurylfluorid (SO₂F₂) wird weltweit als Ersatzprodukt für CH₃Br in den QPS-Anwendungen eingesetzt. Die Messungen auf dem Jungfraujoch und in Mace Head zeigen eine ansteigende Hintergrundkonzentration von 3 %/Jahr (Abbildung 23). Die nur vereinzelt auftretenden Spitzenereignisse deuten darauf hin, dass SO₂F₂ in Europa noch nicht in grossem Umfang eingesetzt wird. Ereignisse werden auf dem Jungfraujoch jeweils im Spätfrühling bis Sommer gemessen und stammen vor allem aus Deutschland (siehe auch Kapitel 5.2). In den letzten Jahren wurden nun allerdings auch im Herbst Spitzenereignisse beobachtet und dies bei unterschiedlichen Anströmungsrichtungen (z.B. Ostanströmung). Bei den Ereignissen gibt es eine Tendenz, dass diese kurz nach Feiertagen oder während der Ferienzeit auftreten. Diese könnte mit der Verwendung von SO₂F₂ zur Desinfektion von Lebensmittelverarbeitenden Industrien (z.B. Mühlen) zu tun haben. In der Schweiz wird dieser Stoff nicht eingesetzt und es konnten auch keine Schweizer Emissionen nachgewiesen werden.

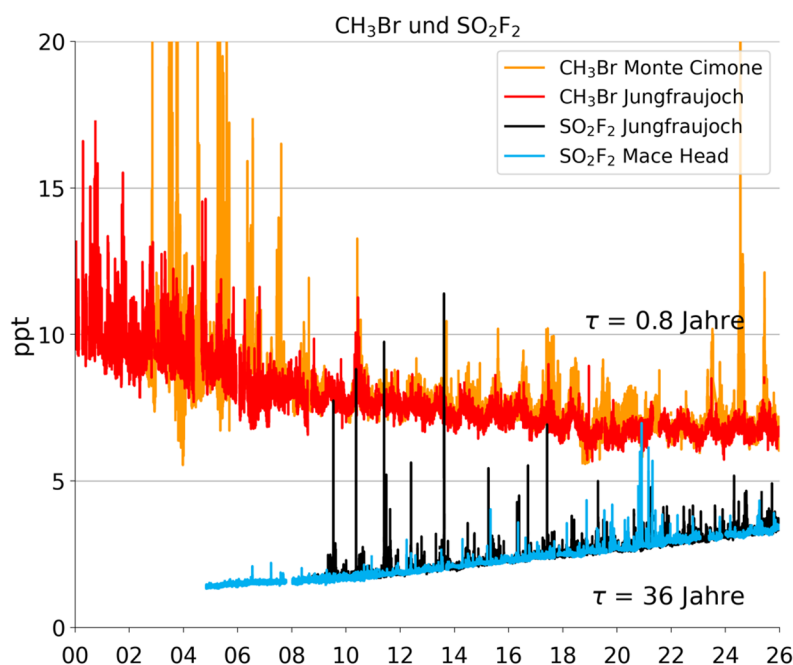


Abbildung 23: Zeitreihen der atmosphärischen Konzentrationen von Methylbromid (CH₃Br) und Sulfurylfluorid (SO₂F₂) an europäischen Hintergrundstationen.

3.1.10 VOCs in Europa

In Abbildung 24 sind mit Ethan und Benzol zwei VOCs aufgeführt, welche eine Lebensdauer von Monaten haben und welche ebenfalls im AGAGE mit Hilfe der Medusa gemessen werden. Gut sichtbar sind die saisonalen Unterschiede, welche einerseits auf erhöhte Emissionen in den Wintermonaten zurückzuführen sind und andererseits auf den verstärkten Abbau der VOCs durch das im Sommer erhöhte OH-Radikal. Diese Schwankungen beim Abbau sind nur bei den relativ kurzlebigen halogenierten Verbindungen zu sehen (siehe Abbildung 7 für HFKW-152a und Abbildung 22 für Methylenchlorid). Während die Konzentration des Ethans nur langsam abnehmen, ist diejenige des Benzols in den letzten Jahren deutlich zurückgegangen, was auf die erhöhte Kontrolle der Emissionen zurückzuführen ist. Die erhöhte Phase auf dem Jungfraujoch im Jahr 2025 ist auf einen kanadischen Waldbrandereignis zurückzuführen.

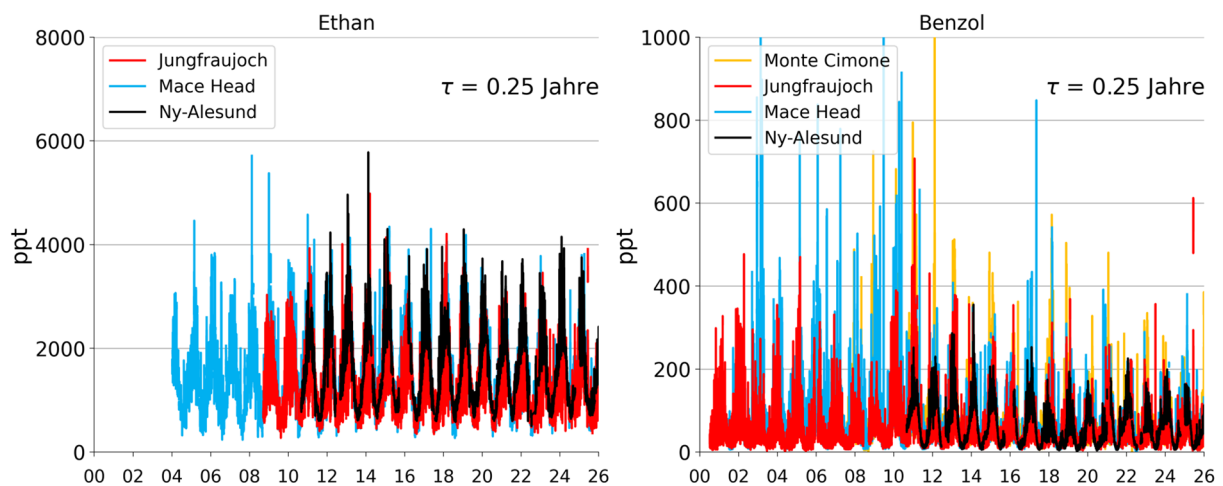


Abbildung 24: Zeitreihen der atmosphärischen Konzentrationen von Ethan und Benzol: Zwei langlebige VOCs, gemessen an europäischen Hintergrundstationen.

3.2 Kohlendioxid (CO₂), Methan (CH₄), Lachgas (N₂O) und Kohlenmonoxid (CO)

Nebst den halogenierten Verbindungen werden auf dem Jungfraujoch auch die wichtigen Treibhausgase Kohlendioxid (CO₂), Methan (CH₄), Lachgas (N₂O) sowie das indirekte Treibhausgas Kohlenmonoxid (CO) gemessen (Abbildung 25). Kontinuierliche CO₂-Messungen auf dem Jungfraujoch wurden im Dezember 2004 von der Abteilung für Klima- und Umweltphysik (KUP) des Physikalischen Instituts der Universität Bern mit einem nichtdispersiven Infrarotsensor (NDIR) begonnen. Die Empa installierte im Dezember 2009 parallel dazu ein Infrarotspektrometer („Cavity Ringdown Spectrometer“, CRDS), das Messungen von CO₂ und CH₄ mit einem einzigen Gerät ermöglicht. Vergleiche der Messreihen zwischen Empa und KUP erfolgen seit Beginn der parallelen Messungen regelmässig und zeigen eine gute Übereinstimmung der Daten. Eine ausführliche Analyse des Zeitreihenvergleichs für die Jahre 2010 bis einschliesslich 2012 wurde im Jahr 2015 publiziert (Schibig et al., 2015). Die gute Übereinstimmung der CO₂-Zeitreihen der Universität Bern und der Empa hat es ermöglicht, die CO₂-Messungen künftig mit dem schnellen und präzisen CRDS-Instrument fortzusetzen, ohne die Homogenität der langjährigen Zeitreihe zu gefährden.

Für CH₄ und N₂O wurden die Messungen ab 2005 quasi-kontinuierlich mit einem Gaschromatographen (GC-FID/ECD) und einer Zeitauflösung von 30 Minuten durchgeführt. Mit der Installation des CRDS-Spektrometers zur kombinierten Messung von CH₄ und CO₂ im Dezember 2009 wurden zusätzlich CH₄-Messungen im Sekundentakt mit sehr hoher Präzision möglich. Aufgrund der besseren Qualität der CH₄-Messungen mittels Infrarotspektrometrie werden seit Januar 2010 diese Daten als primäre CH₄-Datenreihe verwendet. Ende 2014 wurde auch für N₂O ein Laserspektrometer („Off-Axis Integrated Cavity Output Spectrometer“, OA-ICOS) auf dem Jungfraujoch installiert, um die semi-kontinuierlichen Messungen mittels Gaschromatographie abzulösen. Seit 2015 wird die N₂O-Messung mit dem Laserspektrometer als primäre Datenreihe verwendet. Die ursprünglichen CH₄- und N₂O-Messungen wurden bis Sommer 2016 weitergeführt, um die Homogenität der Zeitreihen trotz der Instrumentenwechsel sicherzustellen. Die N₂O-Messreihe musste im Herbst 2019 aufgrund technischer Probleme für rund neun Monate unterbrochen werden. Das defekte Gerät wurde durch ein neues Laserspektrometer ersetzt. Zu diesem Zweck wurde ein CRDS-Spektrometer angeschafft, da sich Geräte mit dieser Technologie und von diesem Hersteller bereits für die CO₂- und CH₄-Messungen sehr bewährt haben.

Im Vergleich zu den oben genannten Spurengasen ist Kohlenmonoxid (CO) ein nur schwaches direktes Treibhausgas. Es spielt jedoch eine wichtige indirekte Rolle, da es mit dem Hydroxylradikal reagiert, das auch für den Abbau vieler Treibhausgase verantwortlich ist. Zudem kann CO zur Bildung von bodennahem Ozon beitragen, das ebenfalls klimawirksam ist. Erhöhte CO-Konzentrationen können negative Auswirkungen auf Menschen und Tiere haben. Daher definiert die Luftreinhalteverordnung einen Immissionsgrenzwert für CO. CO wird auf dem Jungfraujoch seit 1996 gemessen. Zu Beginn wurde dafür die NDIR-Technik eingesetzt. Mit der Inbetriebnahme eines kombinierten CO₂-CH₄-CO-Instruments im Jahr 2012 wurde auch für CO auf CRDS-Infrarotspektrometrie umgestellt. Da die Emissionen von CO relativ gut bekannt sind, wird die CO-Zeitreihe zudem zur Abschätzung der Schweizer Emissionen halogenierter Treibhausgase (siehe Kapitel 8.3) verwendet.

Die in Abbildung 25 dargestellten CO₂-, CH₄- und CO-Daten beziehen sich auf die aktuellen GAW-Kalibrationsskalen (WMO X2019 für CO₂, WMO X2004A für CH₄ und WMO X2014A für CO). Für N₂O wurden ursprünglich die Standards von AGAGE verwendet (SIO-98-Skala); seit April 2012 beziehen sich auch diese Daten auf die Referenz des zentralen GAW-Kalibrierlabors (WMO X2006A). Der Wechsel der Referenzgase hat keine Auswirkungen auf die Homogenität der Zeitreihe, da die beiden Skalen sehr gut

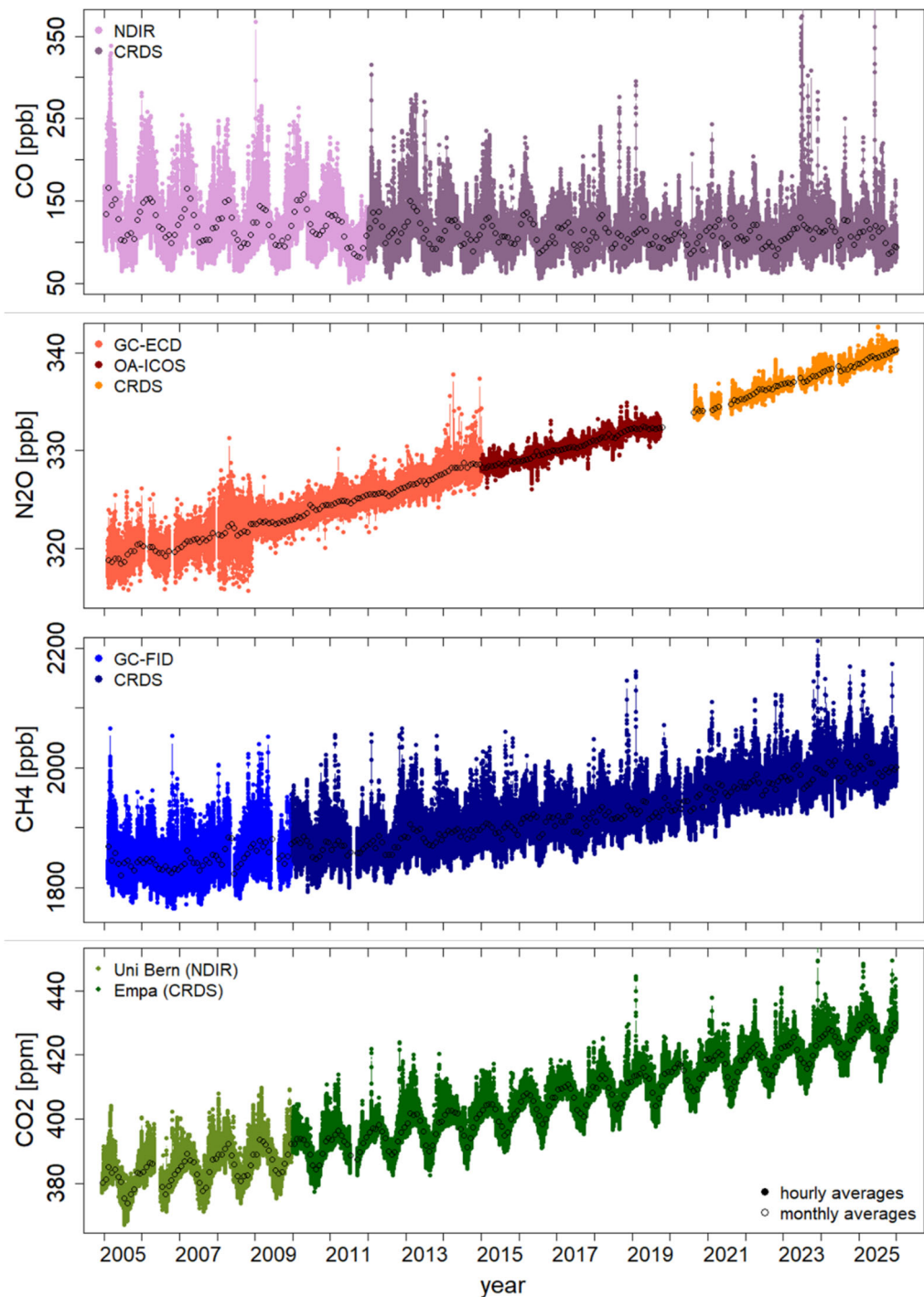


Abbildung 25: Zeitreihen der Stundenmittelwerte von CO_2 , CH_4 , N_2O und CO auf dem Jungfraujoch (2005 bis 2025). Offene Symbole stellen die Monatsmittel dar. Für CO_2 wurden die Messungen der Universität Bern im Januar 2010 durch Messungen der Empa ergänzt. Die CO_2 -Messungen der Universität Bern sind weiterhin operationell.

übereinstimmen. Vor allem in der N_2O -Zeitreihe sind über den gezeigten Zeitraum verschiedene Optimierungen der analytischen Methoden erkennbar, die zu geringerem Rauschen in der Messreihe geführt haben. Umfassende Analysen der Verbesserungen der Messqualität durch den Einsatz modernerer Messtechniken sind in Zellweger et al. (2016) für CO_2 und CH_4 und in Zellweger et al. (2019) für N_2O und CO beschrieben.

Aufgrund der langen Verweilzeiten der Treibhausgase in der Atmosphäre, ihrer daraus resultierenden guten globalen Durchmischung sowie des geringen Einflusses lokaler Prozesse auf die Messungen am Jungfraujoch sind die langjährigen Trends am Jungfraujoch in der Regel den von der WMO publizierten globalen Trends sehr ähnlich (siehe WMO Greenhouse Gas Bulletin 2025; <https://library.wmo.int/idurl/4/69654>). Die gemessenen Konzentrationen in den letzten vier Jahren bestätigen die anhaltenden Anstiege aller drei Treibhausgase. Die entsprechenden globalen Trends gemäss dem aktuellen Treibhausgas-Bulletin liegen bei 2.6 ppm CO₂ pro Jahr, 10.6 ppb CH₄ pro Jahr und ebenfalls 1.1 ppb N₂O pro Jahr. Die Zuwachsraten verbleiben somit für alle drei Treibhausgase auf einem hohen Niveau und zeigen keine Anzeichen einer Abschwächung. Die Kohlenmonoxid-Zeitreihe zeigt derzeit keinen Trend, nachdem bis Anfang der 2020er-Jahre noch eine leichte Abnahme beobachtet werden konnte. Kurzzeitig erhöhte CO-Konzentrationen wurden in den letzten Jahren wiederholt dann gemessen, wenn Emissionen grossflächiger Waldbrände in Kanada über den Atlantik nach Europa transportiert wurden, unter anderem im August und September 2023 sowie im Juni 2025.

Signaturen von Verschmutzungsereignissen in den Zeitreihen am Jungfraujoch sind selten und in der Regel nur von kurzer Dauer, sodass sie meistens keinen signifikanten Einfluss auf die Monatsmittelwerte haben. Folglich weisen die langjährigen Zeitreihen insgesamt eine vergleichsweise geringe Variabilität auf, was zuverlässigere Aussagen über langfristige Veränderungen ermöglicht. Abbildung 26 zeigt zur Veranschaulichung eine zusammengesetzte Darstellung von CO₂-Daten von 38 europäischen Messstationen aus dem ICOS-(Integrated Carbon Observation System)-Messnetz. Das Jungfraujoch ist die höchstgelegene Station innerhalb dieses Netzwerks. Auffällig ist, dass die Zeitreihe vom Jungfraujoch über weite Teile des Jahres mit dem unteren Rand der 90%-Bandbreite übereinstimmt. Lediglich im Sommer erreichen einige Stationen tiefere CO₂-Konzentrationen, da tiefer gelegene Stationen aufgrund ihrer Nähe zur Vegetation und die biosphärische CO₂-Aufnahme ausgeprägtere Sommerminima aufweisen können. Die vergleichsweise geringe Variabilität am Jungfraujoch wird auch im Vergleich mit der auf Meereshöhe gelegenen niederländischen Station Cabauw deutlich: Trotz des Einsatzes eines hohen Messsturms (207 m über Grund) sind dort sowohl die Schwankungen von Monat zu Monat als auch von Jahr zu Jahr deutlich stärker ausgeprägt.

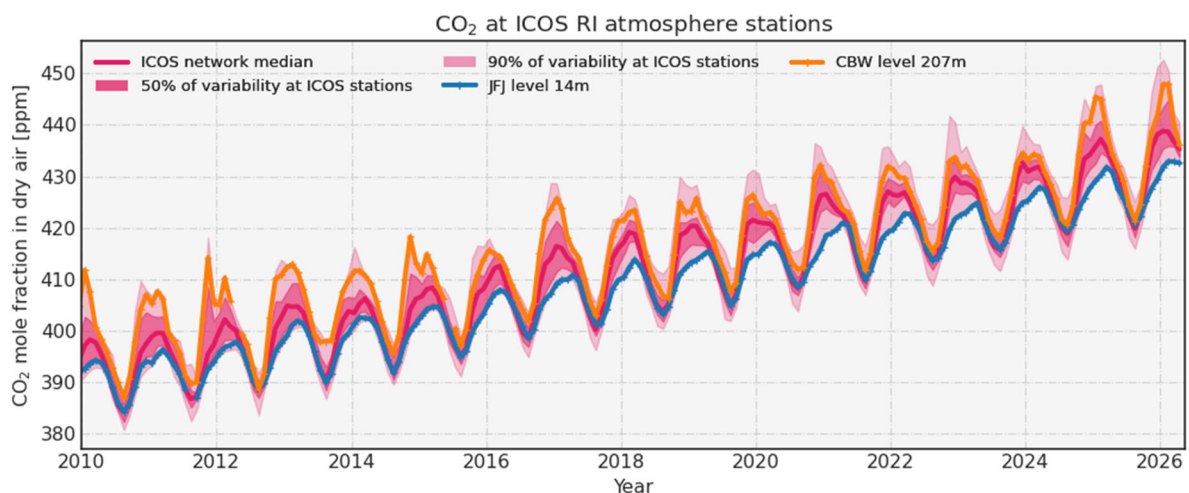


Abbildung 26: Kombinierte Darstellung der CO₂-Konzentrationen basierend auf Daten von 38 europäischen Messstationen. Dargestellt sind der Median des ICOS-Netzwerks (in dunkelrot) sowie die 50% und 90% Bandbreiten der Variabilität (rote und hellrote Schattierungen). Hervorgehoben sind die Zeitreihe des Jungfraujochs (blau) und jene der niederländischen Station Cabauw (orange). Quelle: <https://www.icos-cp.eu/impact/icos-curve>.

4. Modellierung der Schweizer Emissionen

4.1 Abschätzung der Schweizer Emissionen von halogenierten Substanzen

Die Abschätzung der regionalen Emissionen der halogenierten Substanzen wurde mit Hilfe der Korrelation mit CO und folgender Formel berechnet:

$$E_H = E_{CO} \times \frac{\Delta H}{\Delta CO}$$

E_H = Emission halogenierte Substanz

E_{CO} = Emission von CO/Jahr (abgeschätzter Wert CLRTAP/EMEP 2025 = 129 kt yr⁻¹)

ΔH = Konzentrationsunterschied zwischen unbelasteter und belasteter Atmosphäre für die halogenierte Substanz

ΔCO = Konzentrationsunterschied zwischen unbelasteter und belasteter Atmosphäre für CO

Für die Schweizer CO Emissionen wird der territoriale Wert (Emissionen ohne "Tanktourismus und statistische Differenz") von CLRTAP/EMEP verwendet. Für das aktuelle Jahr wird jeweils ein provisorischer Wert aus den Emissionen des vorhergehenden Jahres (letzte erhältliche Information) und dem 3-Jahrestrend zuvor abgeschätzt. Nach der Publikation der Emissionen in CLRTAP/EMEP wird der Wert auf den dort rapportierten Wert korrigiert.

Für die Abschätzung der Schweizer Emissionen werden nur Messdaten verwendet, bei welchen ein Transport aus den belasteten Gebieten auf Grund von parallel ansteigenden Konzentrationen mehrerer Gase festgestellt wird, und bei welchen die 48-Stunden Rückwärtstrajektorien einen überwiegenden Einfluss der Alpennordseite der Schweiz zeigen. Im Jahr 2025 waren diese Bedingungen an 14 Tagen gegeben, welche fast ausschliesslich im Sommer und in der ersten Herbsthälfte während stabilen Hochdrucklagen auftraten. Diese beschränkte Anzahl von Ereignissen in der warmen Jahreszeit könnte einen Einfluss auf die Repräsentativität der Abschätzungen haben und setzt stabile Emissionen voraus, welche nur eine unbedeutende jahreszeitliche Schwankung aufweisen. Intuitiv könnte man annehmen, dass diese Hypothese bei Kältemitteln schlecht erfüllt wird. Es zeigte sich aber, dass zumindest für HFKW-134a die Emissionsraten aus Auto-Klimaanlagen kaum von den klimatischen Bedingungen beeinflusst werden (Schwarz und Harnisch: Establishing the Leakage Rates of Mobile Air Conditioners, EC/DG Environment, 2003).

Die vom Jungfraujoch abgeschätzten Emissionen der Jahre 2021-2024 sind in der Tabelle 2 zusammengefasst.

	CH-Emissionen (Jungfrauoch) [t/Jahr]			
	2021	2022	2023	2024
CF₄	3.8	6.6	5.7	5.8
PFKW-116 (C₂F₆)	0.9	1.6	2.0	1.9
PFKW-218 (C₃F₈)	1.2	1.1	0.0	0.1
PFKW-318 (c-C₄F₈)	1.7	1.7	0.8	0.9
C₆F₁₄	0.9	1.4	1.1	0.4
SF₆	7.3	6.5	4.5	3.3
NF₃	-0.6	-1.2	-0.5	-0.2
HFKW-125	72	76	60	54
HFKW-134a	250	250	204	210
HFKW-152a	17	17	12	12
HFKW-23	4.3	4.8	5.3	4.0
HFKW-32	28	35	37	39
HFKW-143a	39	36	26	22
HFKW-365mfc	5.9	5.4	2.7	1.9
HFKW-245fa	1.5	0.9	1.8	1.3
HFKW-227ea	1.2	1.7	2.5	3.3
HFKW-236fa	0.2	0.6	0.2	0.3
HFKW-43-10mee	-0.7	-0.7	0.3	0.1
FCKW-11	30	19	15	13
FCKW-12	25	16	15	9
FCKW-13	0.1	-0.4	-0.4	0.0
FCKW-113	3.8	3.3	2.0	0.7
FCKW-114	5.0	4.3	-0.5	0.4
FCKW-115	-3.2	-1.5	2.8	2.8
Halon-1301	1.0	0.6	0.7	1.1
Halon-1211	3.4	3.2	2.2	2.3
Methylbromid	3.4	4.9	4.8	4.3
SO₂F₂	1.2	1.5	0.8	0.9
HFCKW-22	68	55	37	27
HFCKW-124	0.5	0.7	0.6	0.3
HFCKW-141b	8	10	10	11
HFCKW-142b	20	25	24	19
CCl₄	11.1	12.5	0.3	7.2
1,1,1-Trichlorethan	4.6	4.8	2.1	1.6
Chloroform	55	53	52	45
Methylenchlorid	150	168	155	135
Trichlorethen	7	7	4	2
Tetrachlorethen	46	43	32	32

Tabelle 2: Zusammenstellung der Emissionsabschätzungen [t/Jahr] Messungen vom Jungfrauoch (2021-2024). Die tabellierten Werte für die Abschätzungen vom Jungfrauoch sind 3-Jahresmittel.

4.1.1 In den Klimakonventionen aufgeführte halogenierte Treibhausgase

In Abbildung 27 bis Abbildung 29 sind die aus den Messungen auf dem Jungfraujoch abgeschätzten Schweizer Emissionen der gemessenen HFKW, SF₆ und PFKW aufgezeigt. Die im Folgenden diskutierten vom Jungfraujoch abgeschätzten Emissionen sind jeweils über drei Jahre gemittelt.

HFKW-134a ist der wichtigste fluoridierte Kohlenwasserstoff, welcher zum grössten Teil als Kältemittel eingesetzt wird. So sind zum Beispiel bis vor kurzem alle Autoklimaanlagen ausschliesslich mit HFKW-134a betrieben worden. Daneben wird HFKW-134a auch in Mischungen mit anderen HFKW in stationären Klimaanlagen verwendet. Die vom Jungfraujoch abgeschätzten Emissionen von HFKW-134a sind in den letzten Jahren rückläufig, was auch beim Inventar ausgewiesen wird. Dies dürfte auf den schrittweisen Ersatz von HFKW-134a mit HFOs und nicht fluoridierten Stoffen zurückzuführen sein. Die vom Inventar abgeschätzten Mengen sind jedoch wie fast während der ganzen 20-jährigen Periode höher als die vom Jungfraujoch abgeschätzten Werte.

HFKW-125, -143a und -32 finden vor allem als Mischungen in stationären Kälte- und Klimaanlagen Verwendung. Für HFKW-125 und HFKW-143a findet sich bei den vom Jungfraujoch abgeschätzten Emissionen seit 2017 eine abnehmende Tendenz. Auch für diese Substanzen sind die Emissionen kleiner als diejenigen im Inventar. Während für HFKW-143a auch beim Inventar eine beträchtliche Abnahme festgestellt wird, vergrössert sich die Differenz beim HFKW-125, wo im Inventar nur ein leichter Rückgang der Emissionen abgeschätzt wird. Für HFKW-32 waren die Jungfraujoch-basierten Emissionsabschätzungen bis ca. 2017 konsistent 30-40% kleiner als diejenigen des Inventars. Während seither auf dem Jungfraujoch nur ein langsamer Anstieg der Emissionen abgeschätzt wird, steigen die Emissionen im Inventar kontinuierlich an. Dies ist darauf zurückzuführen, dass HFKW-32 vermehrt als Ersatz von HFKW-125 und HFKW-143a eingesetzt wird, da HFKW-32 das geringste GWP dieser Kältemittel aufweist.

Die vom Jungfraujoch abgeschätzten Schweizer Emissionen von HFKW-152a zeigen in den letzten Jahren eine fallende Tendenz und lagen 2025 bei ca. 10 t/Jahr (Abbildung 28). Die grosse Differenz zwischen den vom Jungfraujoch abgeschätzten Werten und dem Inventar ist methodisch dadurch bedingt, dass die Emissionen von HFKW-152a, welches als Schäumungsmittel für offenporige Polyurethan (PU)-Schäumstoffe verwendet wird, dem Herstellerland zugerechnet werden.

In Abbildung 28 sind weitere HFKW aufgeführt, bei denen die Schweizer Emissionen im Inventar unter 10 t/Jahr liegen. Für die Schäumungsmittel HFKW-245fa und HFKW-365mfc sind die vom Jungfraujoch abgeschätzten jährlichen Emissionen in den letzten Jahren unter 5 t/Jahr. Während die Werte des Inventars für HFKW-365mfc von der gleichen Grössenordnung sind, sind die Emissionen für HFKW-245fa im Inventar deutlich kleiner. Diese Differenz könnte durch Emissionen aus eingeführtem Schaumstoff stammen. Für das in der Schweiz fast nicht verwendete HFKW-227ea lagen vom Jungfraujoch abgeschätzten Emissionen bei ca. 3 t pro Jahr, während die im Inventar abgeschätzten Emissionen bei 1-2 t/Jahr lagen.

Die Schweizer Emissionen der perfluorierten Verbindungen (SF₆, CF₄ und PFKW) sind in Abbildung 29 zusammen mit HFKW-23 dargestellt. Diese sehr starken Treibhausgase mit atmosphärischen Lebensdauern von tausenden von Jahren haben in der Schweiz nur geringe Emissionen im Bereich von 10 Tonnen/Jahr oder weniger. Die beiden Abschätzungen stimmen innerhalb der Fehlergrenzen gut überein. Für das vor allem in elektrischen Umschaltanlagen und in Teilchenbeschleunigern eingesetzte SF₆ finden beide Ansätze fallende Emissionen in den letzten Jahren. Während beim CF₄ die vom Jungfraujoch abgeschätzten Emissionen in den letzten Jahren zwischen 4-6 t/Jahr liegen, sind die Emissionen im Inventar kleiner als 1 t/Jahr. Hingegen stimmt die Summe der im Inventar abgeschätzten Emissionen der PFKWs (-116 (C₂F₆), -218 (C₃F₈), -318 (C-C₄F₈), C₄F₁₀, C₆F₁₄), welche vor allem in der Elektronikindustrie eingesetzt werden, sehr gut mit den vom Jungfraujoch abgeschätzten Emissionen von einigen Tonnen/Jahr überein. Beim HFKW-23 ist eine Differenz von einigen Tonnen zwischen den Abschätzungen vorhanden.

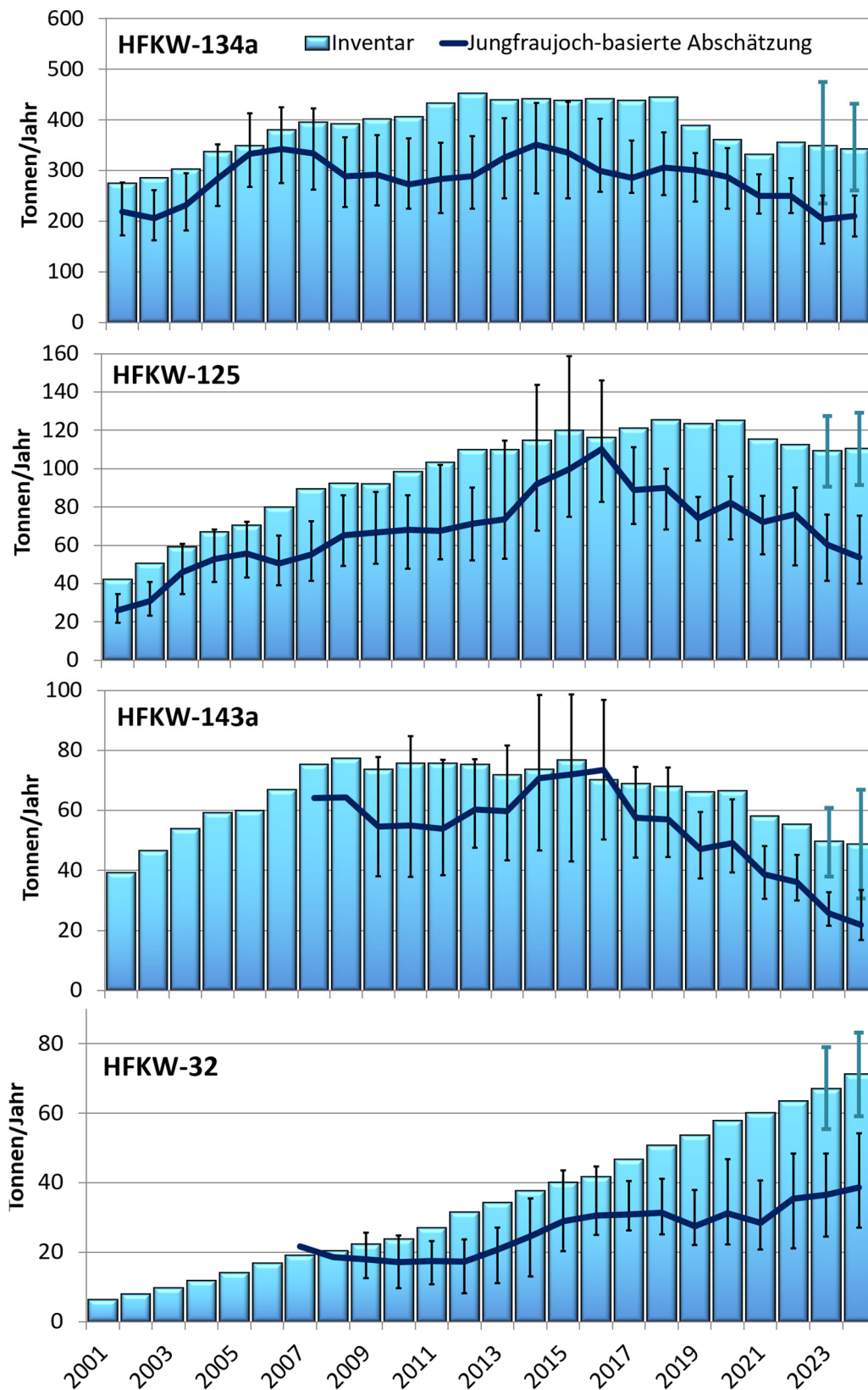


Abbildung 27: Vergleich der auf dem Jungfrauoch abgeschätzten Schweizer Emissionen von HFKW-134a, -125, -143a und -32 (inkl. 25%/75%-Quartile) mit den Werten aus dem Inventar, inkl. Fehlerabschätzung. Diese Substanzen werden vorwiegend in Kälteanlagen eingesetzt.

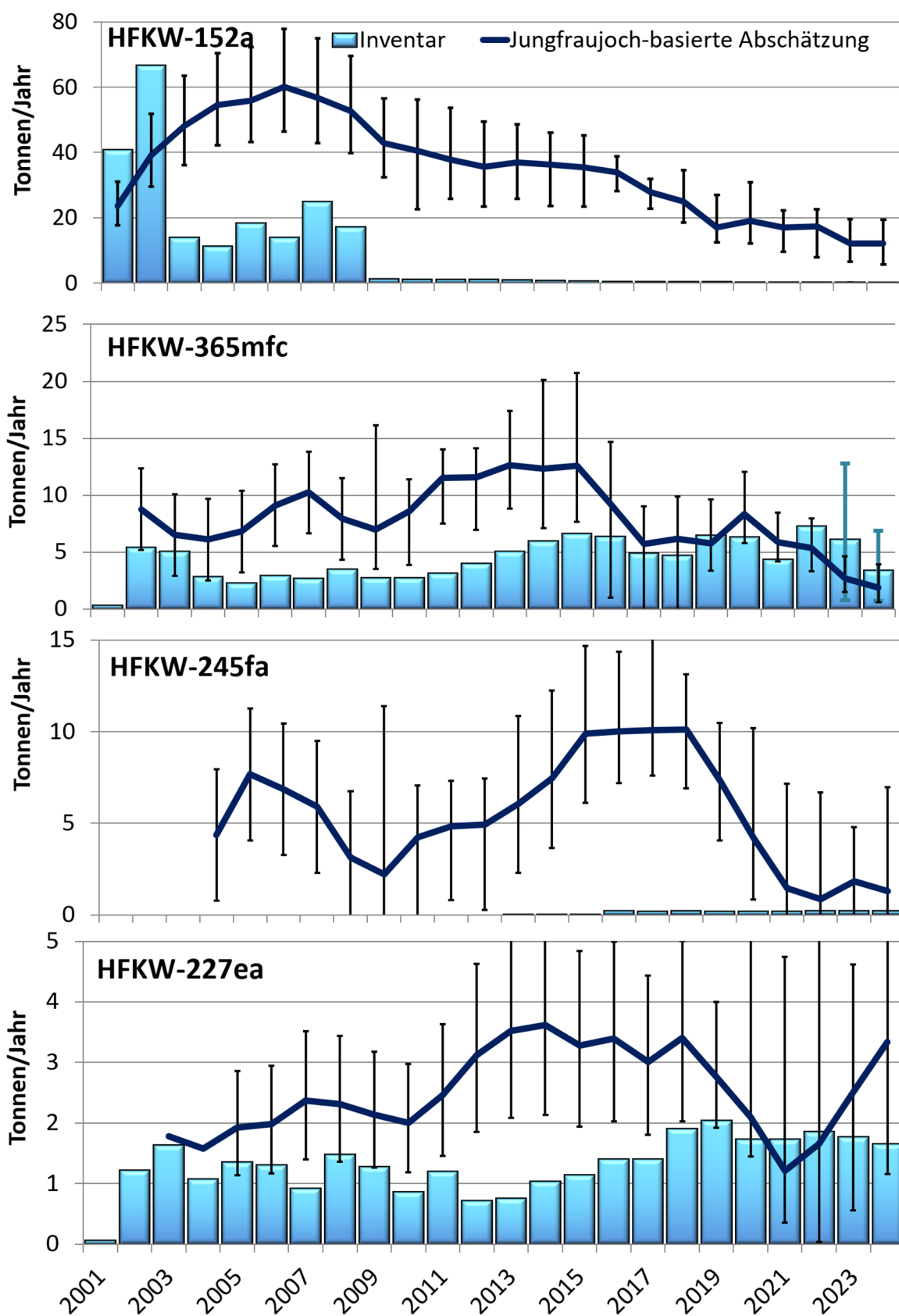


Abbildung 28: Vergleich der auf dem Jungfrauoch abgeschätzten Schweizer Emissionen von HFKW-152a, -365mfc, -245fa und -227ea (inkl. 25%/75%-Quartile) mit den Werten aus dem Inventar, inkl. Fehlerabschätzung.

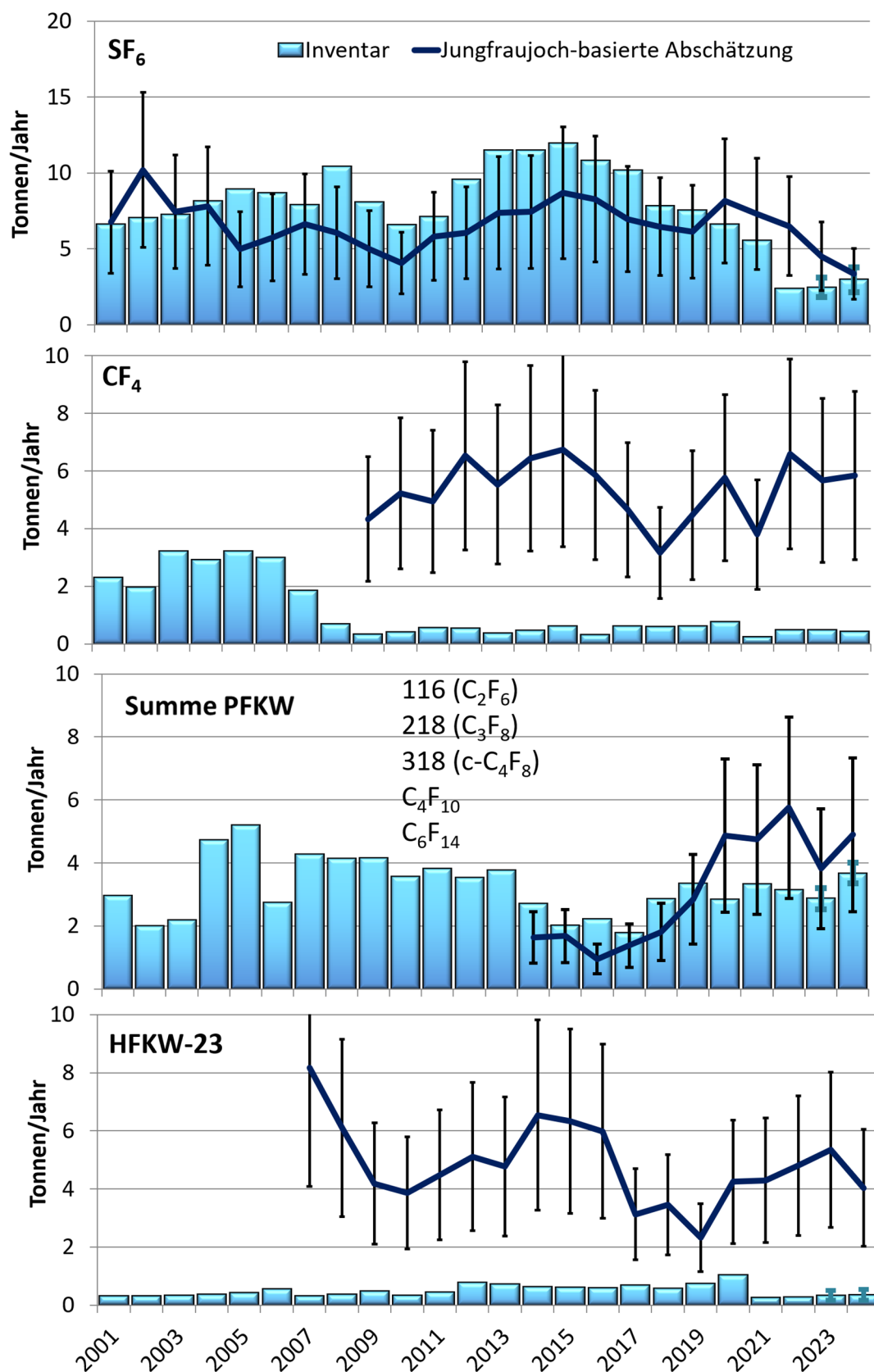


Abbildung 29: Vergleich der auf dem Jungfrauoch abgeschätzten Schweizer Emissionen von SF₆, CF₄, Summe der PFKW (-116, -218, -318, C₄F₁₀, C₆F₁₄) und HFC-23 mit den Werten aus dem Inventar, inkl. Fehlerabschätzung.

4.1.2 Anästhetika

Die fluorierten Anästhetika werden in der Schweiz in Operationen eingesetzt und verlassen die Operationssäle über die Abluft. Diese Treibhausgase sind nicht im Reporting der Staaten vorhanden. Ihre Emissionen betragen 2025 in der Schweiz insgesamt ca. 7 Tonnen/Jahr (Abbildung 30).

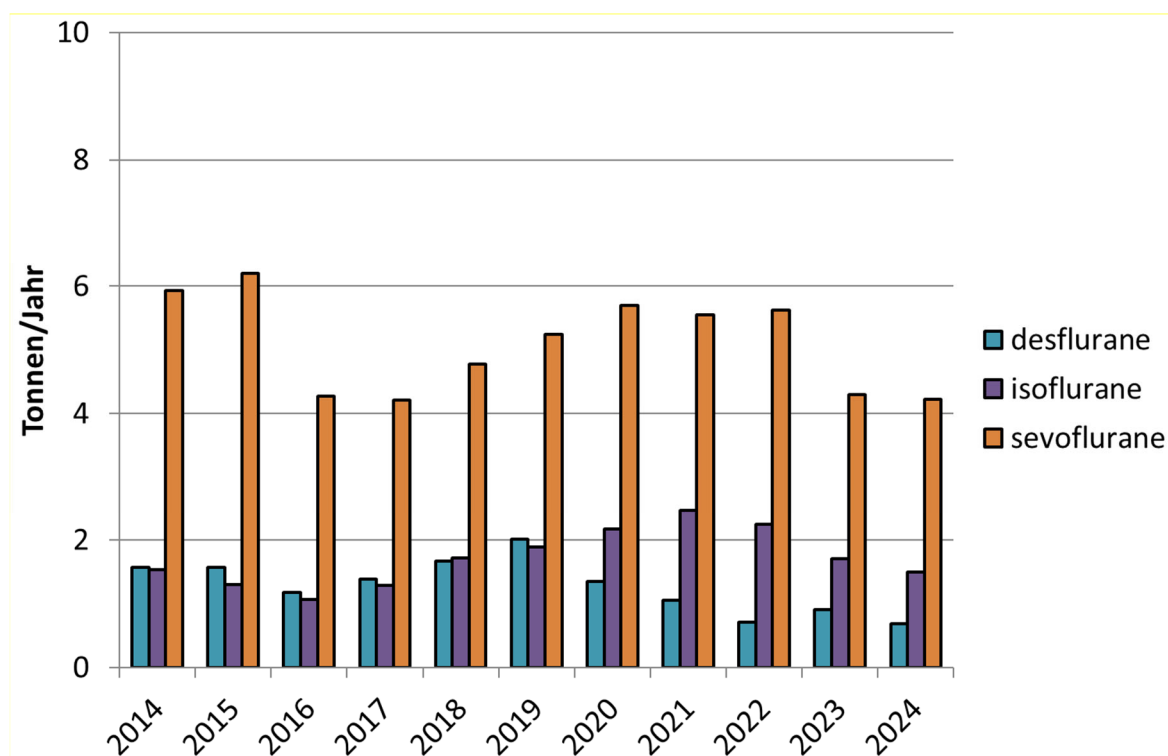


Abbildung 30: Jungfraujoch-basierte Emissionsabschätzung der Anästhetika Desfluran, Isofluran und Sevofluran.

4.1.3 Kurzlebige ungesättigte HFKW (HFO) und HFCKW (HCFO)

Kurzlebige ungesättigte HFKW (HFO, Hydrofluorolefine) und HFCKW (HCFO, Hydrochlorfluorolefine) werden als Ersatz der langlebigen HFKWs eingesetzt. Obwohl ihr Einfluss auf das Klima sehr klein ist, werden ihre Konzentrationen auf dem Jungfraujoch im Sinne einer Vorsorge kontinuierlich gemessen (siehe Kapitel 3.1.3). Die Konzentrationen dieser Substanzen sind seit 2018 auf dem Jungfraujoch genügend gross, um eine Abschätzung der Schweizer Emissionen durchzuführen (Abbildung 31). Die Unsicherheiten der Abschätzungen sind dabei ca. $\pm 20\%$.

HFO-1234yf, welches vor allem in Autoklimaanlagen eingesetzt wird, hatte mit über 15 Tonnen/Jahr im Jahr 2024 die höchsten Schweizer Emissionen. Seit 2021 sind jedoch die Emissionen des in stationären Klimaanlagen eingesetzten HFO-1234ze(E) stark angestiegen, womit dieses Gas nun ähnlich hohe Emissionen aufweist. Das ebenfalls in Kühlmischungen und in Schaumstoffen eingesetzte HCFO-1233zd(E) zeigt im Moment Emissionen von ca. 6 t/Jahr.

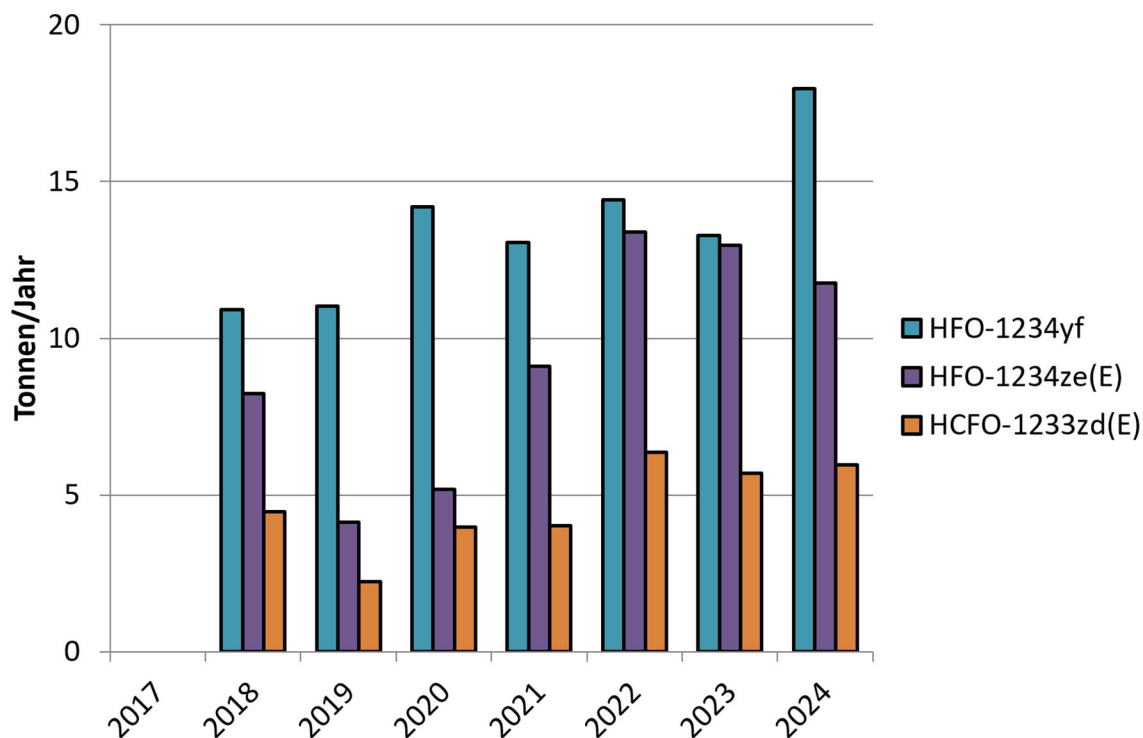


Abbildung 31: Jungfrauoch-basierte Emissionsabschätzung der HFO-1234yf, HFO-1234ze(E) und HCFO-1233zd(E).

4.1.4 Ozonschichtabbauende, im Montrealer Protokoll reglementierte Verbindungen

Bis zum Verbot ihres Verbrauchs im Montrealer Protokoll waren FCKW-11 und FCKW-12 die am meisten eingesetzten FCKW. Die Abschätzung der Schweizer Emissionen vom Jungfrauoch für diese beiden Substanzen (Abbildung 32) ist erschwert, da bestehende Quellen bei den Messungen auf dem Jungfrauoch nur eine minimale Erhöhung über der grossen globalen Hintergrundkonzentration bewirken. Deshalb weisen die jährlichen Emissionsabschätzungen für diese beiden Substanzen, wie auch für alle anderen ozonschichtabbauenden Substanzen eine Unsicherheit von 20% auf. Beim FCKW-12, welches vor allem in Kühlanlagen und Haushaltskühlschränken eingesetzt wurde, fand ab 2010 eine starke Abnahme der Emissionen statt. In den letzten Jahren haben sich die Emissionen dieser Substanz auf tiefem Niveau stabilisiert, was auf die kontinuierlichen Verluste aus alten Kühlanlagen zurückzuführen ist. FCKW-11, welches vor allem noch in Schaumstoffen vorhanden ist, zeigt ebenfalls eine Abnahme. Diese ist jedoch weniger schnell, da die Substanzen aus Schaumstoff weniger schnell emittieren als aus Kühlanlagen. Beim 1,1,1-Trichlorethan, welches früher als Lösemittel eingesetzt wurde, sind die Schweizer Emissionen fast gegen null gesunken. Für alle übrigen FCKWs (-13, 114, 115) sowie für CCl₄ sind keine relevanten Emissionen aus der Schweiz festzustellen (siehe Tabelle 2).

Die Emissionen der heute in der Schweiz praktisch verbotenen HFCKW sind in Abbildung 33 dargestellt. Dabei zeigte sich für das seit 2000 gemessene HFCKW-141b nach einer kontinuierlichen Abnahme zwischen 2012-16 ein geringer Wiederanstieg. Seit 2017 fand aber wiederum eine Abnahme statt mit stabilen Emissionen aus verbauten Anlagen, was auf Quellen von immer noch in Gebrauchsgegenständen vorhandenem HFCKW-141b schliessen lässt. HFCKW-142b und HFCKW-22 konnten wegen deren Gebrauch in Schaumstoffen auf dem Jungfrauoch erst ab 2013 nach der Verlegung des Lufteinlasses gemessen werden. Dabei zeigen sich für das HFCKW-142b relativ stabile Emissionen. Für HFCKW-22 zeigte

sich bis 2019 ebenfalls eine abnehmende Tendenz. Ab 2020-2021 wurden jedoch wieder höhere Emissionen abgeschätzt. Diese ev. auf illegalen Ausserbetriebsetzung von alten Kühlanlagen in Verbindung stehenden Emissionen haben in den letzten Jahren wieder kontinuierlich abgenommen.

In Abbildung 34 sind die Schweizer Emissionen der bromierten ozonschichtabbauenden Substanzen dargestellt. Für die beiden wichtigen in Feuerlöscher eingesetzten Halone-1211 und -1301 finden sich noch kleine, aber konstante Schweizer Emissionen von einigen Tonnen/Jahr. Die Schweizer Methylbromid (CH_3Br) Emissionen sanken anfangs der 2000er Jahre deutlich und betrugen in den letzten Jahren weniger als 5 Tonnen/Jahr (Tabelle 2).

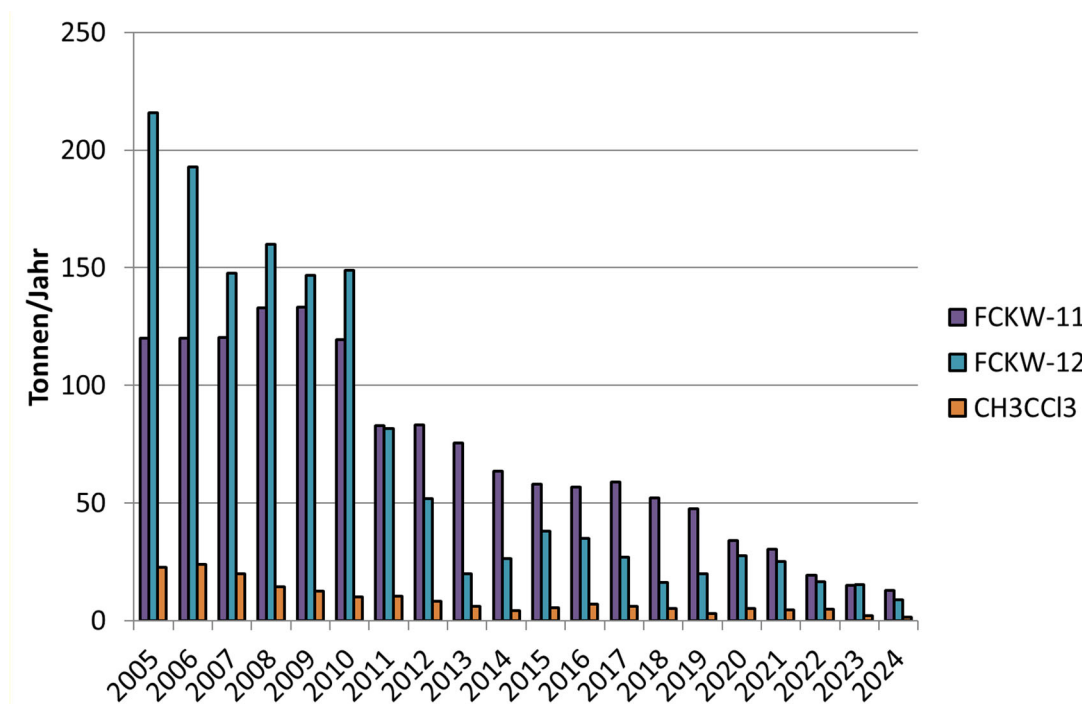


Abbildung 32: Jungfrauoch-basierte Emissionsabschätzung der FCKW-11 und -12 sowie von 1,1,1-Trichlorethan (CH_3CCl_3).

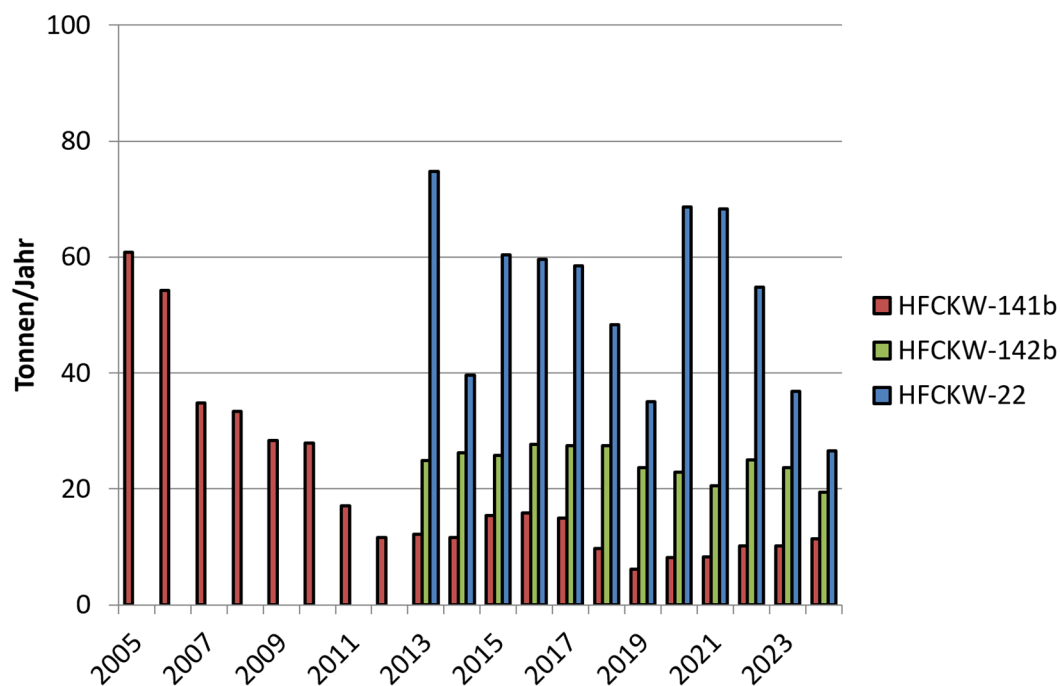


Abbildung 33: Jungfrauoch-basierte Emissionsabschätzung der HFCKW-141, -142b, -22. Für HFCKW-142 und -22 waren Abschätzungen erst ab 2013 möglich wegen internen Verschmutzungen.

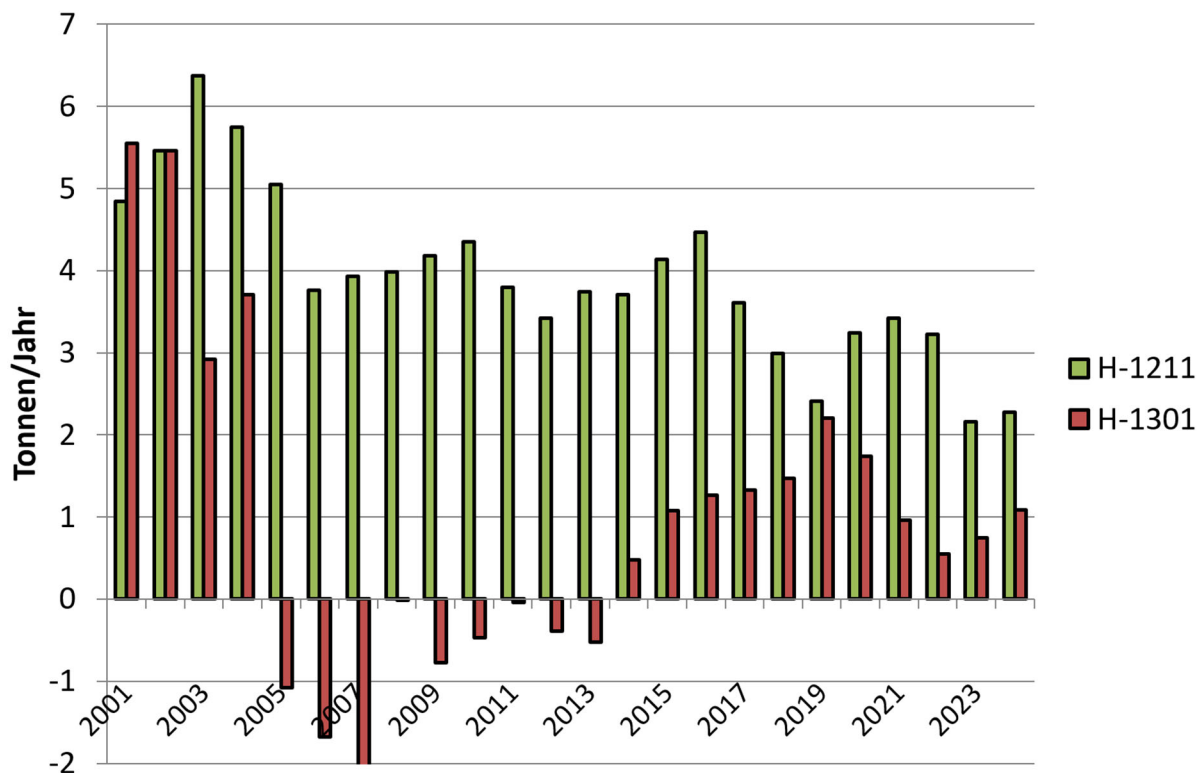


Abbildung 34: Mit Messungen auf dem Jungfrauoch abgeschätzte Schweizer Emissionen von ozonschichtabbauenden bromierten Substanzen, welche durch das Montrealer Protokoll reguliert sind (als arithmetisches Mittel über 3 Jahre). Negative Werte sind durch die Unsicherheiten der Abschätzungen begründet.

4.1.5 Chlorierte Lösungsmittel

Die abgeschätzten Schweizer Emissionen der noch in Gebrauch stehenden chlorierten Lösemittel sind kontinuierlich am Sinken (Abbildung 35). In den letzten Jahren hat jedoch eine Stabilisierung auf tieferem Niveau stattgefunden oder es kann wie im Fall von Methylenchlorid (CH_2Cl_2) zeitweise sogar ein kleiner Wiederanstieg gesehen werden. Methylenchlorid weist die höchsten Emissionen auf, gefolgt von Perchlorethen, Chloroform (CHCl_3) und Trichlorethen ($\text{CHCl}_2\text{CHCl}_2$). Alle diese Substanzen haben relativ kurze atmosphärische Lebensdauern von Wochen bis Monaten und sind deshalb im Montrealer Protokoll aktuell nicht verboten. Die abgeschätzten Emissionen des im Montrealer Protokoll reglementierten CCl_4 aus der Schweiz schwanken um Null. Das heisst mit den Abschätzungen von Jungfraujoch können keine Emissionen aus der Schweiz mehr festgestellt werden.

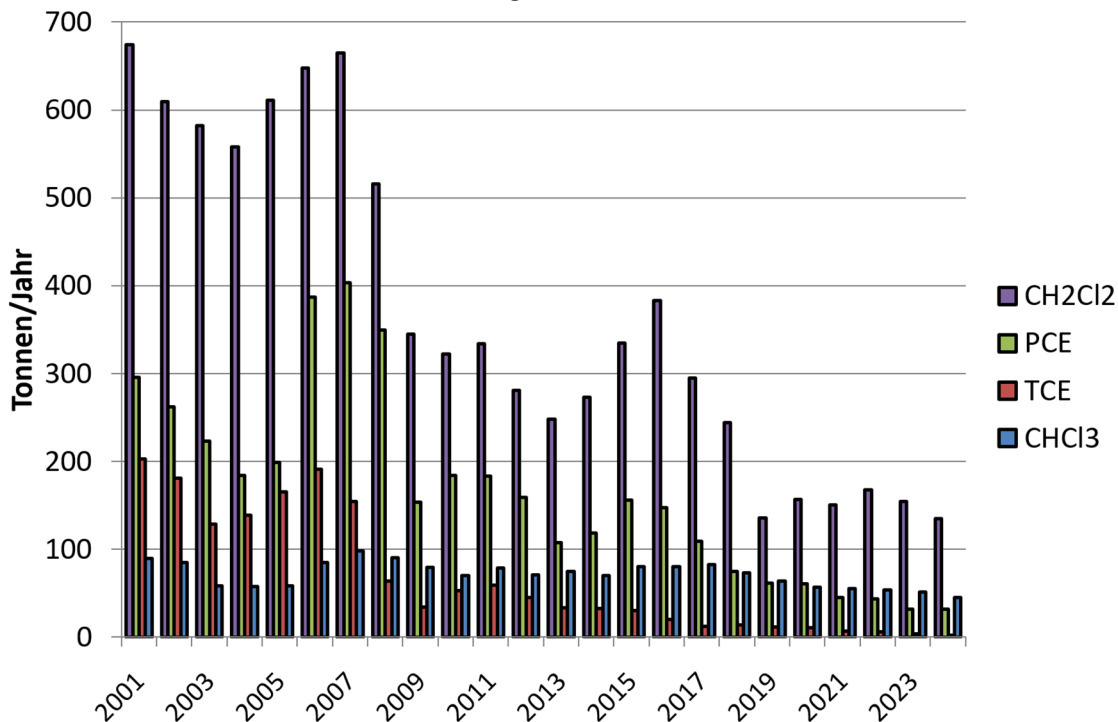


Abbildung 35: Mit Messungen auf dem Jungfraujoch abgeschätzte Schweizer Emissionen von chlorierten Lösungsmitteln (als arithmetisches Mittel über 3 Jahre). Negative Werte sind durch die Unsicherheiten der Abschätzungen begründet.

4.1.6 Zusammenfassende Klimawirksamkeit der Schweizer Emissionen.

In Abbildung 36 sind die Schweizer Emissionen der auf dem Jungfraujoch gemessenen halogenierten Klimagase relativ zu ihrem Einfluss auf die Erwärmung des Klimas dargestellt. Dabei wurden die absoluten vom Jungfraujoch abgeschätzten Emissionen mit den Treibhauspotentialen (Global Warming Potentials, GWP100) aus dem Fünften Sachstandsbericht des IPCC verrechnet. Die Emissionen der ozonschichtabbauenden chlorierten und bromierten Substanzen, welche im Montrealer Protokoll stark reglementiert sind, tragen immer noch 25 % zum Klimaeinfluss der Schweizer Emissionen der halogenierten Verbindungen bei. Dabei haben FCKW-12 aus alten Kälteanlagen und FCKW-11 aus verbauten Schaumstoffen den grössten Einfluss. Der grösste Anteil der durch ausschliesslich klima-aktive fluorierte Substanzen verursachten Emissionen (75%) wird durch das aus Kälteanlagen entweichende HFKW-125 (als Bestandteil von Kältemittelmischungen) verursacht.

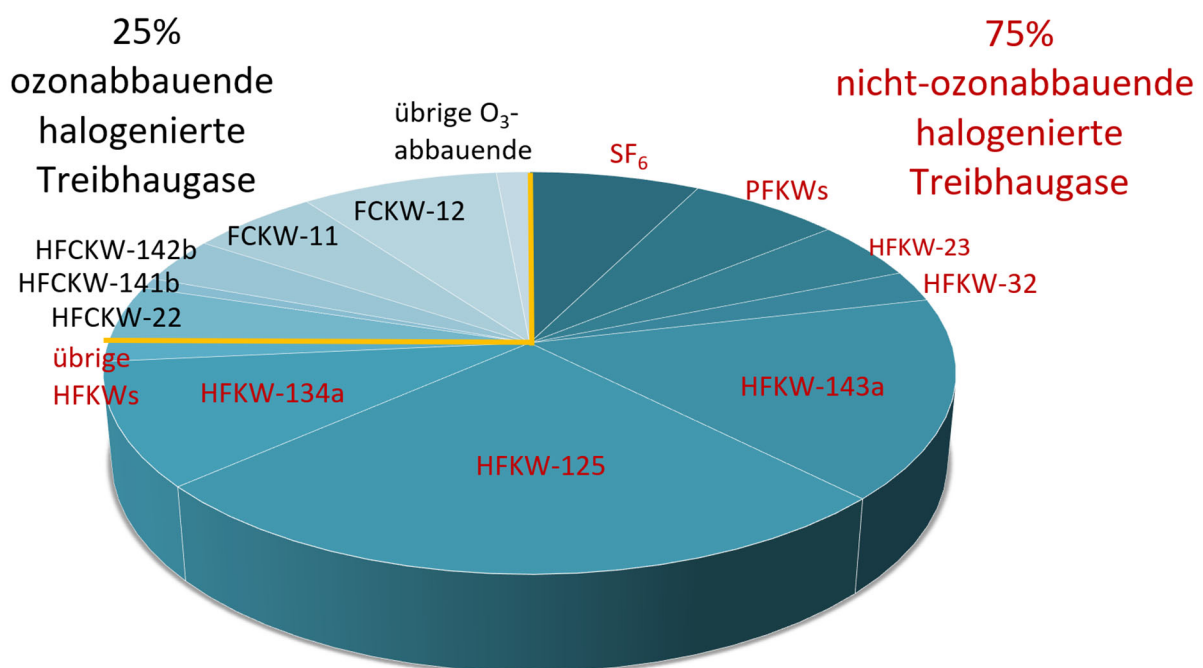


Abbildung 36: Summe der klimarelevanten Schweizer Emissionen in 2021 (als CO₂-Äquivalente) von halogenierten Verbindungen, welche nur Treibhausgase sind (HFKWs, PFKWs, SF₆, Anästhetika) im Vergleich mit der Summe der halogenierten Verbindungen welche zusätzlich noch eine ozonschichtabbauende Wirkung haben (FCKWs, HFCKWs, Halone, Methylbromid, chlorierte Lösungsmittel).

4.2 Abschätzung der Schweizer Emissionen von Methan und Lachgas

Für eine genauere Bilanzierung der Emissionen und natürlichen Flüsse von Methan und Lachgas in der Schweiz werden bodennahe Konzentrationsmessungen dieser Treibhausgase in der Schweiz und benachbarten Ländern benötigt und mithilfe von atmosphärischen Transportmodellen und einer statistischen Methodik zur Abschätzung der nationalen Treibhausgasflüsse verwendet. Eine Übersicht über das verfügbare Messnetz von Treibhausgasen in und ausserhalb der Schweiz ist in Abbildung 37 dargestellt. Während die meisten gezeigten Standorte Teil des Europäischen ICOS-Netzwerks sind, werden die Messungen in Beromünster (BRM) und Lägern-Hochwacht (LHW) von der Empa bzw. Uni Bern (CO₂/CH₄ in BRM) betrieben.

Abbildung 38 zeigt gemessene CH₄ Konzentrationen an allen verwendeten Standorten. Typische Merkmale in diesen Zeitserien sind der positive Trend mit Zeit (Anstieg der Hintergrundkonzentration), erhöhte Konzentrationen in den Wintermonaten (reduzierte atmosphärische Mischung) und verschiedene Grössen von Verschmutzungsereignissen je nach Stationstyp (kleine Amplituden an den hoch-alpinen Standorten JFJ und PRS; grosse Amplituden an den Grenzschichtstandorten BRM, LHW, IPR, KIT). Für denselben Zeitraum sind auch die Lachgas-Konzentrationen im Hintergrund kontinuierlich angestiegen (Abbildung 39). Lachgas-Konzentrationen zeigen keine ausgeprägte Saisonalität. Ähnlich wie für Methan sind Verschmutzungsereignisse an den Grenzschichtstationen stärker ausgeprägt (BRM, KIT) als an hoch-alpinen (JFJ) bzw. erhöhten Standorten (SSL, PUY).

Die hier präsentierten Resultate der inversen Modellierung basieren auf zwei verschiedenen Modellsystemen. Für die Jahre 2013 bis 2021 kam das Transportmodell FLEXPART-COSMO-7 (FP-C7) mit einer horizontalen Auflösung von ca. 7 km x 7 km zum Einsatz und es wurden lediglich Beobachtungen von vier Standorten verwendet. Für die Jahre 2018 bis 2025 konnte eine höher-aufgelöste Version des Transportmodells mit ca. 1 km x 1 km Auflösung verwendet werden (FP-C1). Resultate der beiden Modellversionen werden grösstenteils getrennt betrachtet.

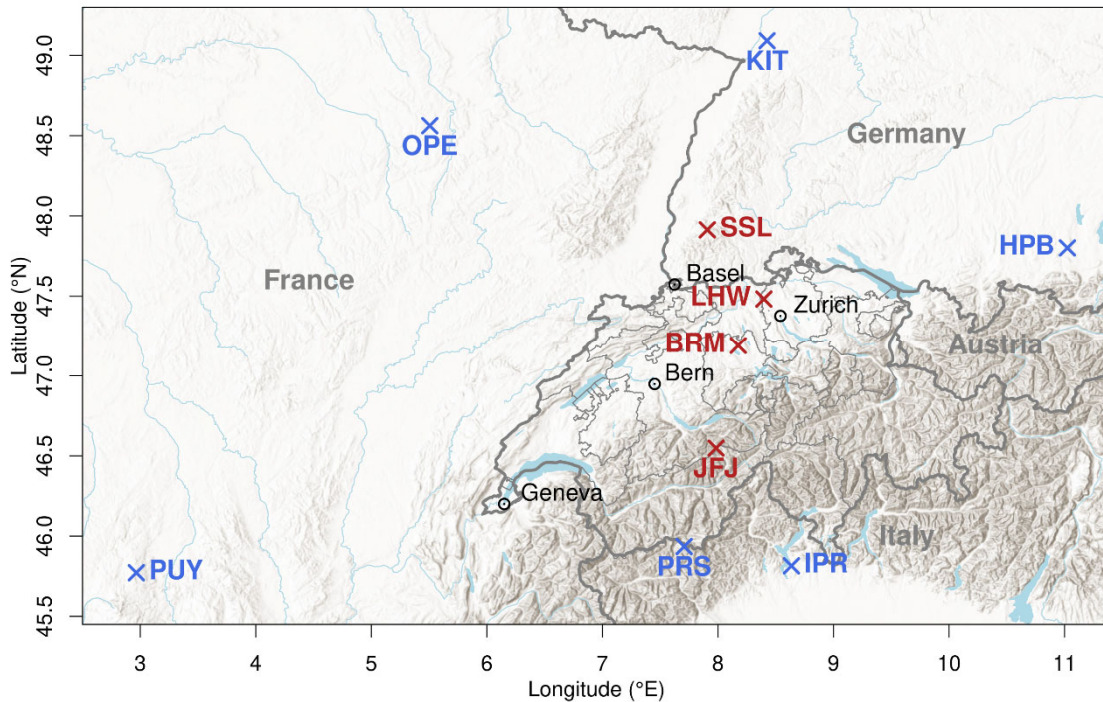


Abbildung 37: Übersicht über das verwendete Treibhausgas Messnetz mit den vier ursprünglich verwendeten Standorten in der Schweiz und Deutschland (rot; Lägern-Hochwacht, LHW, seit Aug. 2012 und Beromünster, BRM, seit Nov. 2012; Jungfraujoch, JFJ; Schauinsland, SSL), sowie weiteren Messstellen, die Teil des ICOS Messnetz sind (blau).

Name	ID	Länge	Breite	Höhe	Einlass- höhe	CH ₄	N ₂ O
Jungfraujoch	JFJ	7.9851	46.5475	3580	2	2013	2017
Beromünster	BRM	8.1755	47.1896	797	212	2013	2017
Lägern-Hochwacht	LHW	8.3973	47.4820	860	32	2013	-
Schauinsland	SSL	7.9079	47.9137	1205	2/32	2013	2017
Hohenpeissenberg	HPB	11.025	47.8011	934	131	2013	2018
Ispra	IPR	8.6359	45.8147	210	100	2018	-
Karlsruhe	KIT	8.4249	49.0914	110	200	2017	2019
Puy DeDome	PUY	2.9658	45.7719	1465	10	2016	2021
Observatoire Perenne De l'Environnement	OPE	5.5057	48.5623	390	120	2017	2019
Plateau Rosa	PRS	7.7070	45.9350	3480	5	2021	-

Tabelle 3: Stationsinformationen für Messungen, die in den Inversionen verwendet wurden. Die Jahreszahlen für CH₄ und N₂O geben die Jahre für welche Messungen der jeweiligen Station erstmal für die Inversion genutzt wurden.

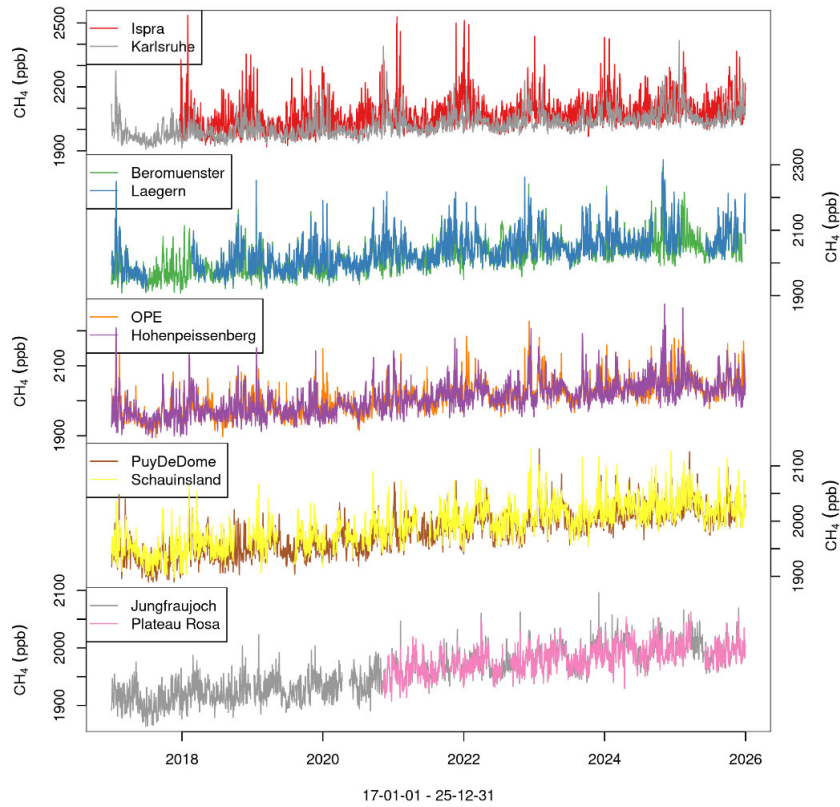


Abbildung 38: Zeitserie der täglichen Mittelwerte der CH_4 Konzentrationen an den in der inversen Modellierung verwendeten Stationen.

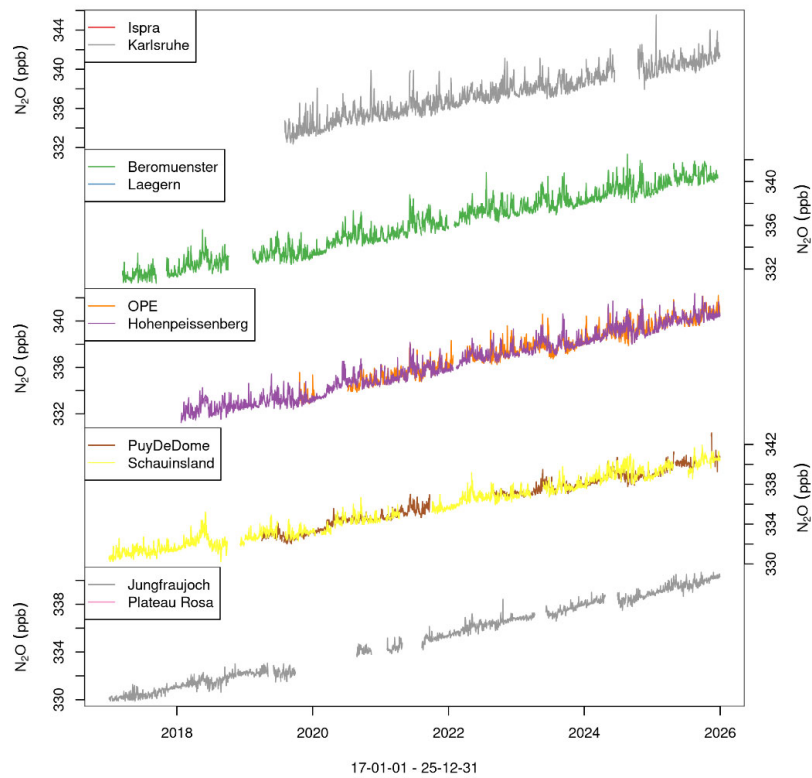


Abbildung 39: Zeitserie der täglichen Mittelwerte der N_2O Konzentrationen an den in der inversen Modellierung verwendeten Stationen.

Das an der Empa entwickelte atmosphärische Transportmodell FLEXPART-COSMO ist ein Lagrangesches Partikeldispersionsmodell, das auf den Analysefeldern des numerischen Wettervorhersagemodells COSMO der MeteoSchweiz aufbaut. Seit Ende Oktober 2020 wurden die bisher verwendeten COSMO Analysen der MeteoSchweiz auf 7 km Auflösung eingestellt. COSMO-7 Simulationen wurden eigenhändig von der Empa bis Ende 2021 weitergeführt. Zusätzlich wurden seit Anfang 2017 FLEXPART Simulationen basierend auf MeteoSchweiz COSMO Analysen mit 1 km Auflösung durchgeführt. Seit August 2024 wurde das COSMO Modell an der MeteoSchweiz vom ICON Modell abgelöst. Dies wird zurzeit mit einer ähnlichen Auflösung mit ca. 1 km Gitterweite betrieben und seither von FLEXPART verwendet.

Basierend auf diesen Transportsimulationen wurden zwei Systeme zur Inversen Modellierung der Emissionen entwickelt. Das erste System optimiert das Emissionsfeld räumlich und pro Jahreszeit (Henne et al. 2016; Katharopoulos et al. 2023), während das zweite System Emissionen einzelner Sektoren und Regionen ermittelt. Das zweite System wurde hier ausschliesslich auf Lachgas angewandt, für welches starke zeitliche Emissionsschwankungen erwartet werden können.

Als Ausgangspunkt für beide inversen Modellierungsansätze dienen räumlich aufgelöste Emissionsinventare, die an die Emissionstotale des Treibhausgasinventars gekoppelt sind (Heldstab et al., 2021). A priori Informationen der Methanquellen zeigen lokale Maxima in den Voralpengebieten mit hoher Viehdichte Abbildung 40, während diese Maxima für Lachgas weniger ausgeprägt sind und sich Emissionen weiter ins Mittelland verschieben (Abbildung 41).

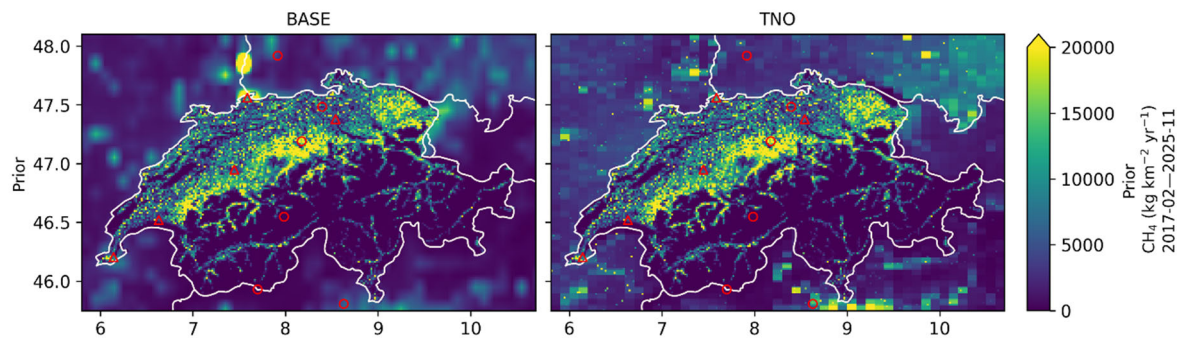


Abbildung 40: Räumliche Verteilung der a priori Emissionen. Schweizer CH_4 Emissionen nach Heldstab et al. (2021), eingebettet in das EDGAR Inventar (links, Version 8.0) und das TNO Inventar (rechts, Version 7.0).

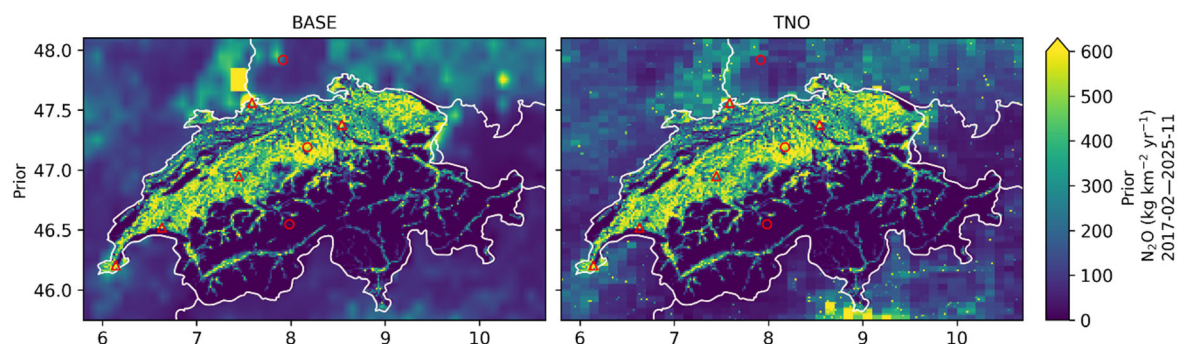


Abbildung 41: Räumliche Verteilung der a priori Emissionen. Schweizer N_2O Emissionen nach Heldstab et al. (2021), eingebettet in das EDGAR Inventar (links, Version 8.0) und das TNO Inventar (rechts, Version 7.0).

4.2.1 Methan

Eine erste Studie von Henne et al. (2016) für den Messzeitraum Februar 2013 bis März 2014 zeigte eine generell gute Übereinstimmung zwischen den für das Jahr 2013 rapportierten CH₄ Emissionen des Schweizer Treibhausgasinventars (206 ± 33 Gg yr⁻¹, 1 σ Konfidenzintervall) und denen aus der inversen Modellierung gewonnenen (196 ± 18 Gg yr⁻¹). Die Fehlerabschätzung der inversen Modellierung resultiert dabei aus der Standardabweichung über ein Ensemble von 30 verschiedenen Sensitivitätsinversionen und ist deutlich höher als die aus einer einzelnen Inversion ermittelte analytische Unsicherheit. Die inverse Modellierung erlaubt auch eine räumliche Bestimmung der Emissionsstärke und deren jahreszeitlichen Verlauf. Zusammen lassen sich daraus Rückschlüsse auf einzelne Emissionsprozesse ziehen. Grundsätzlich wurden für die Wintermonate (Dezember, Januar, Februar) geringere CH₄ Emissionen festgestellt als für die übrigen Jahreszeiten.

Der gleiche Modellierungsansatz wie in Henne et al. (2016) wurde hier mit einer reduzierten Anzahl Sensitivitätsinversionen, auf die Jahre 2013 – 2021 angewandt (FP-C7 im Folgenden), während für die Jahre 2017 - 2025 höher aufgelöste Transportsimulationen und mehr Beobachtungsdaten zum Einsatz kamen (FP-C1). Die mittleren aus der inversen Modellierung (FP-C7) bestimmten Schweizer CH₄ Emissionen während 2013 - 2021 waren 198 ± 15 kt yr⁻¹ (1- σ Unsicherheit). Dieses Ergebnis stellt das Mittel und die Standardabweichung aller Sensitivitätsinversionen für alle Jahre dar und ist leicht grösser (8 %) als die Abschätzung in der nationalen Berichterstattung (NID 2026, inkl. LULUCF) für denselben Zeitraum (183 kt yr⁻¹, s. CRT Table10s3). Dies liegt allerdings im Rahmen der im NID rapportierten Unsicherheit von ± 15 kt yr⁻¹ (1- σ Niveau). Für den Zeitraum 2017 bis 2024 betrugen die Schweizer CH₄ Emissionen, die mit dem FP-C1 System bestimmt wurden, im Mittel 247 (230 – 258) kt yr⁻¹, was 39 % grösser ist als die im NID rapportierten Werte. Es ist deutlich, dass die FP-C1 Inversionen systematisch grössere Emissionsabschätzungen liefern als die FP-C7 Inversionen (Abbildung 42). Mögliche Gründe für diese Unterschiede liegen in den unterschiedlichen Versionen des verwendeten Transportmodells, unterschiedlicher Behandlung des Konzentrationshintergrunds, anderer Verfügbarkeit von Messungen und unterschiedlichen Sensitivitätsinversionen. Für die FP-C1 Inversionen wurden grössere Emissionen ermittelt, wenn dieselbe Methode zur Hintergrundbestimmung verwendet wurde wie für FP-C7. Weiterhin ergaben sich kleinere Emissionen, wenn die Messungen der Station Lägern-Hochwacht nicht verwendet wurden. Generell hatten die verschiedenen a priori Emissionen einen kleinen Einfluss auf die ermittelten a posteriori Emissionen. Eine weitere Analyse der Inversionsergebnisse aus den verschiedenen Konfigurationen, auch mit einer Erweiterung der höher-aufgelösten Simulationen für frühere Jahre, soll in Zukunft genaueren Aufschluss liefern, warum die Emissionsergebnisse so stark voneinander abweichen.

Insgesamt sieht das Treibhausgasinventar eine Reduktion der Schweizer CH₄ Emissionen von 15 kt yr⁻¹ für den Zeitraum 2013 bis 2024. Dagegen zeigen die Inversionsresultate stärkere Schwankungen von Jahr zu Jahr und erhöhte Werte insbesondere in den letzten Jahren. Einerseits zeigen diese Schwankungen die inhärenten Unsicherheiten des Inversionssystems. Andererseits könnten diese Schwankungen auch aufgrund von Umwelteinflüssen (z.B. Temperatur, Niederschlag) beeinflusst sein, die im nationalen Treibhausgasinventar nicht berücksichtigt werden. Aufgrund dieser Schwankungen und der Abweichenden Aussagen der FP-C7 und FP-C1 Konfigurationen ist es derzeit nicht möglich, den Langzeittrend des Treibhausgasinventars mit der inversen Modellierung zu bestätigen oder infrage zu stellen.

In Abbildung 40 ist die räumliche Verteilung der a priori Emissionen dargestellt, während die absoluten Unterschiede zwischen a-posteriori minus a-priori-Emissionen für einzelne Jahre in Abbildung 43 (FP-C7) und Abbildung 44 (FP-C1) gezeigt werden. In den a-priori-Emissionen ist die dominierende Rolle der landwirtschaftlichen Emissionen in den ländlichen Gebieten der Kantone Luzern und Thurgau/Appenzell deutlich zu erkennen. Im Gegensatz dazu treten die dicht besiedelten Gebiete von Zürich, Basel und

Genf nicht als Emissionsschwerpunkte hervor, was mit dem geringen Beitrag der Emissionen aus Erdgasverteilung und Abwasserbehandlung übereinstimmt, wie im NID berichtet.

Die a posteriori Ergebnisse für die FP-C7 Konfiguration (2013 bis 2021) waren hinsichtlich der jährlichen Gesamtemissionen und ihrer räumlichen Verteilung recht ähnlich, was auf die Robustheit der Methode hinweist. Die a-posteriori-Emissionen waren in den landwirtschaftlich geprägten Gebieten des Kantons Luzern geringer als die a priori Emissionen, waren jedoch im nordöstlichen Teil der Schweiz (Kantone Appenzell und St. Gallen) erhöht. In anderen Teilen des Landes wurden nur kleinere Unterschiede beobachtet. Im Gegensatz dazu waren die Ergebnisse von FP-C1 (2017–2025) insgesamt deutlich höher und zeigten weniger des ausgeprägten Ost-West-Musters in den Emissionszunahmen, das in FP-C7 sichtbar war.

Die Analyse der Inversionsergebnisse auf saisonaler Ebene zeigt insgesamt eine ähnliche saisonale Variabilität für beide Inversionskonfigurationen. Für FP-C7 wurden in den meisten Jahren sowie im Mittel über alle Jahre verringerte Emissionen im letzten Quartal des Jahres und leicht erhöhte Emissionen im dritten Quartal festgestellt (Abbildung 45). Im Gegensatz dazu führten die FP-C1-Inversionen zu unterdurchschnittlichen Emissionen im Winter/Frühling und überdurchschnittlichen Emissionen im Sommer/Herbst (August bis Oktober) (Abbildung 46). Dieser saisonale Trend scheint durch mehrere Jahre mit aussergewöhnlich hohen Sommer/Herbst-Emissionen (2019, 2021, 2023) geprägt zu sein, ist jedoch – wenn auch weniger ausgeprägt – auch in anderen Jahren (2017, 2018) erkennbar. Die saisonale Amplitude war in den FP-C1-Inversionen deutlich größer als in FP-C7 Inversionen und ist in dieser Grösse schwer durch Temperatureffekte (z.B. Emissionen aus Hofdünger und Abwasseranlagen) zu erklären.

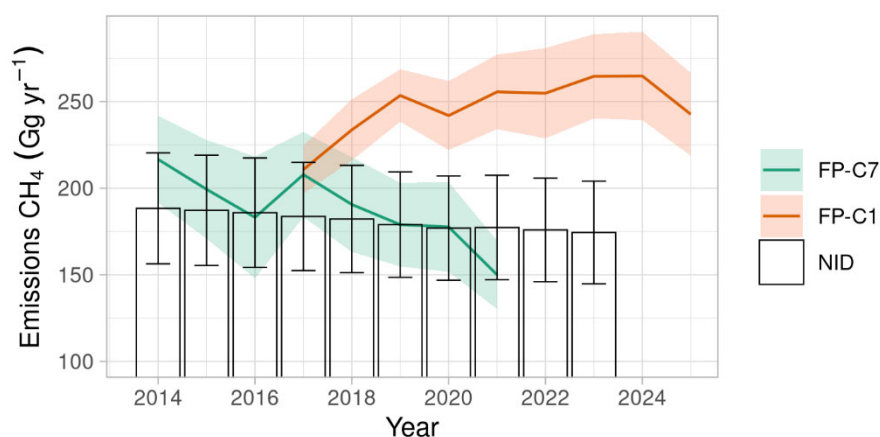


Abbildung 42: Zeitlicher Verlauf der Schweizer CH₄ Emissionen: (Balken, NID) Treibhausgasinventar, Ergebnis (a posteriori) der inversen Modellierung mit der FP-C7 (grün) und FP-C1 (orange) Konfiguration. Die Unsicherheitsbänder geben das 2-σ Konfidenzintervall der Jahresmittel an.

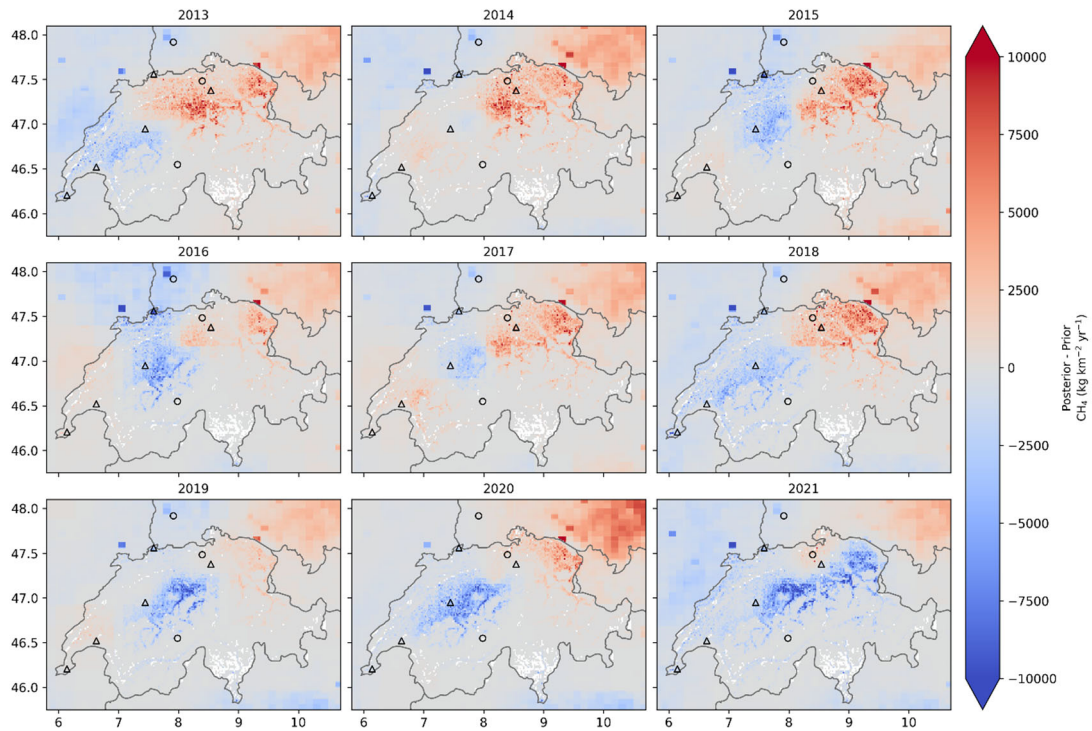


Abbildung 43: Räumliche Verteilung der Methanemissionsdifferenz der aus der inversen Modellierung gewonnenen Verteilung zur a-priori Verteilung des Inventars für die Jahre 2013 bis 2021 (FP-C7). Dabei weisen blaue (rote) Regionen auf geringere (stärkere) Emissionen als im Inventar hin.

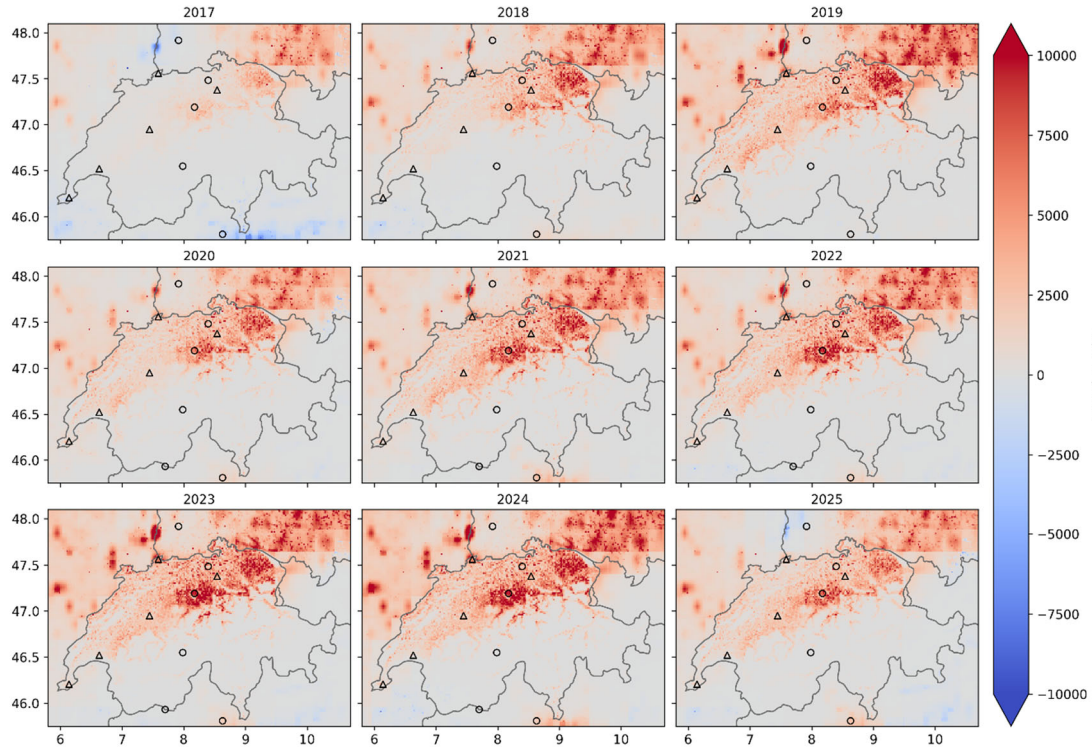


Abbildung 44: Räumliche Verteilung der Methanemissionsdifferenz der aus der inversen Modellierung gewonnenen Verteilung zur a-priori Verteilung des Inventars für die Jahre 2017 bis 2025 (FP-C1). Dabei weisen blaue (rote) Regionen auf geringere (stärkere) Emissionen als im Inventar hin.

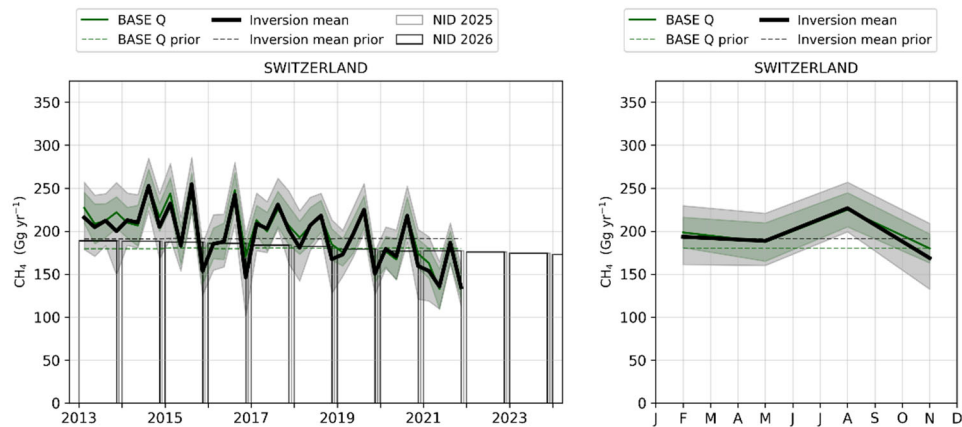


Abbildung 45: (links) Zeitliche Entwicklung der Schweizer Methanemissionen. A posteriori Ergebnisse der inversen Modellierung mit 3-monatlicher Auflösung für die Jahre 2013 – 2021 (FP-C7). Mittel aller Inversionen: schwarze Linie und Unsicherheitsband. BASE Inversion: grüne Linie und Unsicherheitsband. Jahresemissionen aus dem NID sind als schwarze/grau Balken dargestellt. (rechts) Mittlere 3-monatliche Methanemissionen aus der inversen Modellierung, 2013-2021. Alle Unsicherheitsangaben auf 1 σ - Level.

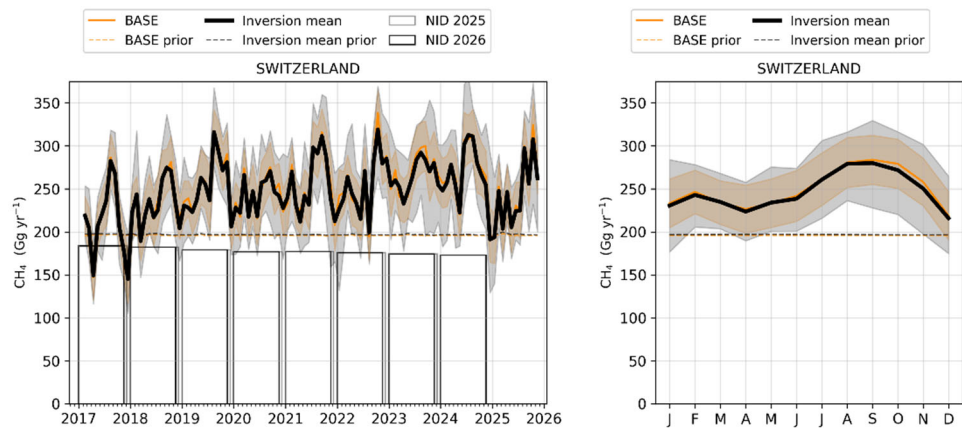


Abbildung 46: (links) Zeitliche Entwicklung der Schweizer Methanemissionen. A posteriori Ergebnisse der inversen Modellierung mit monatlicher Auflösung für die Jahre 2017 – 2025 (FP-C1). Mittel aller Inversionen: schwarze Linie und Unsicherheitsband. BASE Inversion: orange Linie und Unsicherheitsband. Jahresemissionen aus dem NID sind als schwarze/grau Balken dargestellt. (rechts) Mittlere monatliche Methanemissionen aus der inversen Modellierung, 2017-2025. Alle Unsicherheitsangaben auf 1 σ - Level.

4.2.2 Lachgas

Mit der Einrichtung der N₂O-Messungen am Beromünster-Messturm im Jahr 2017 war es möglich, die Schweizer N₂O-Emissionen mithilfe inverser Methoden auf Landesebene für den Zeitraum von März 2017 bis April 2018 zu bestimmen (Henne et al., 2019). Die invers geschätzten Schweizer N₂O-Emissionen waren etwas höher als die im NID 2019 berichteten N₂O-Emissionen. Aufgrund der großen Unsicherheiten, die mit diesen Werten verbunden sind, unterscheiden sich die inversen Schätzungen jedoch nicht signifikant von den NID-Schätzungen. Die relative Unsicherheit der inversen Modellierungsschätzung war geringer als jene der NID-Schätzung. Die Unsicherheitsbandbreite der inversen Methode wurde aus der Streuung über 14 Sensitivitätsinversionen berechnet. Diese umfassten die Anwendung zweier unterschiedlicher Inversionsansätze: eines, das sich auf die räumliche Verteilung konzentrierte (Gitterinversion), und eines, das die zeitliche Entwicklung und die Emissionen nach Sektoren betrachtete (Sektorinversion). Die größten Beiträge zur *a-posteriori*-Streuung stammten aus der Definition und Unsicherheit der für den Modellansatz erforderlichen Hintergrundkonzentration sowie aus systematischen Unterschieden zwischen Gitter- und Sektorinversionen.

Die in Henne et al. (2019) beschriebene inverse Modellierungsmethodik wurde auf den Zeitraum 2017 bis 2025 ausgeweitet. Pro Jahr wurde ein leicht verändertes Set von 11 Sensitivitätsinversionen ausgewählt, das beide Inversionsansätze nutzte und wichtige Faktoren des Inversionsaufbaus variierte wie zum Beispiel Behandlung des Hintergrundsignals und *a priori* Emissionen.

Die beste inverse Schätzung der jährlichen Schweizer N₂O-Emissionen für die Jahre 2018 bis 2024 betrug 10.6 (9.3 bis 12.1) Gg yr⁻¹, basierend auf den FP-C1 Inversionen. Dem gegenüber stehen 11.8 (7.8 bis 14.9) Gg yr⁻¹, wie sie im aktuellen Treibhausgasinventar für denselben Zeitraum angegeben werden (einschließlich Emissionen aus LULUCF; 2-σ-Konfidenzintervall; vgl. Abbildung 47). Mit den jüngsten Aktualisierungen im aktuellen NID stimmen die inversen Schätzungen und die NID-Schätzungen sehr gut überein. Der leichte Abwärtstrend, der im NID für die jüngsten Jahre – insbesondere 2022 aufgrund reduzierter Industrieemissionen – sichtbar ist, zeigt sich in der hochaufgelösten inversen Schätzung (FP-C1 Inversionen) nicht. Ähnlich wie bei CH₄ nahmen die inversen Schätzungen in grober räumlicher Auflösung nach 2018 ab und lagen, allerdings nicht signifikant, unter den berichteten Werten (FP-C7 in Abbildung 47).

Das Sektor-basierte Inversionsmodell ordnete die grössten Änderungen der N₂O-Emissionen (Differenz zwischen *a priori* und *a posteriori*) den Kategorien „Industrie“ (geringer als *a priori*) und „Landwirtschaft“ (grösser als *a priori*) zu, während die Emissionen in allen anderen Kategorien weitgehend den *a priori* Werten entsprachen. Die grössten Reduktionen der Unsicherheit dieser Schätzungen traten in den Sektoren „Landwirtschaft“ und „Industrie“ auf, während sie für die übrigen Kategorien nahezu unverändert blieben (Abbildung 48).

Ähnlich wie für Methan waren auch für Lachgas die *a posteriori* Emissionen in der Ostschweiz grundsätzlich höher als die *a priori* Emissionen, während die Unterschiede zwischen *a priori* und *a posteriori* in der Westschweiz geringer waren (vergleiche die *a priori* Verteilung in Abbildung 41 und *a posteriori* Inkremente in Abbildung 49).

Alle Inversionen deuteten auf eine ausgeprägte Saisonalität der Lachgasemissionen hin, mit einer mittleren Amplitude über alle Inversionen von etwa ±40 % des jährlichen Totals (Abbildung 51 für FP-C1). Die höchsten Emissionen wurden im Sommer geschätzt, die niedrigsten im Winter. Allerdings zeigte sich auch eine beträchtliche Streuung in der saisonalen Amplitude: Inversionen mit geringeren jährlichen Gesamtemissionen neigten dazu, geringere Sommeremissionen und entsprechend kleinere saisonale Amplituden zu ermitteln. Die Saisonalität wurde von Emissionen aus der Landwirtschaft dominiert, unter der Annahme, dass die N₂O Bildung im Boden und die Emissionen aus Böden die Hauptquelle darstellen.

Die hier für die Schweiz ermittelte starke Saisonalität stimmt gut mit anderen jüngeren inversen Schätzungen der N_2O -Emissionen in Europa überein. Einige dieser Studien zeigen ebenfalls eine ähnlich ausgeprägte Saisonalität (Ganesan et al. 2015, Brown et al. 2019, Saboya et al. 2024).

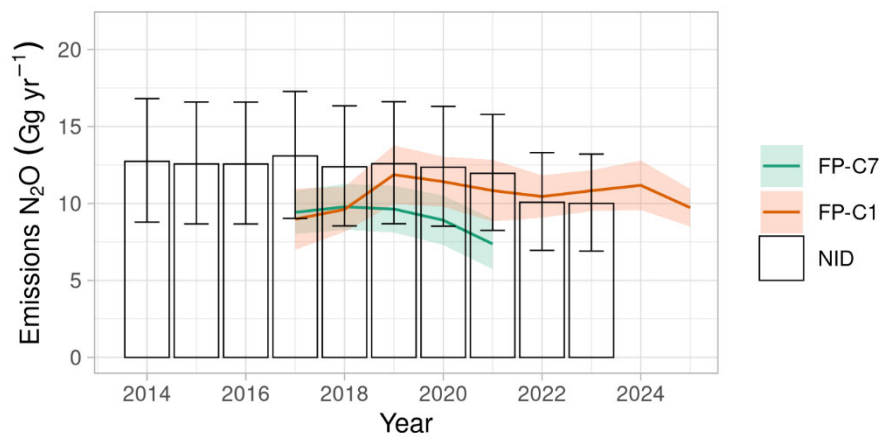


Abbildung 47: Zeitlicher Verlauf der Schweizer N_2O Emissionen: (Balken, NID) Treibhausgasinventar, Ergebnis (a posteriori) der inversen Modellierung mit der FP-C7 (grün) und FP-C1 (orange) Konfiguration. Die Unsicherheitsbänder geben das 2- σ Konfidenzintervall der Jahresmittel an.

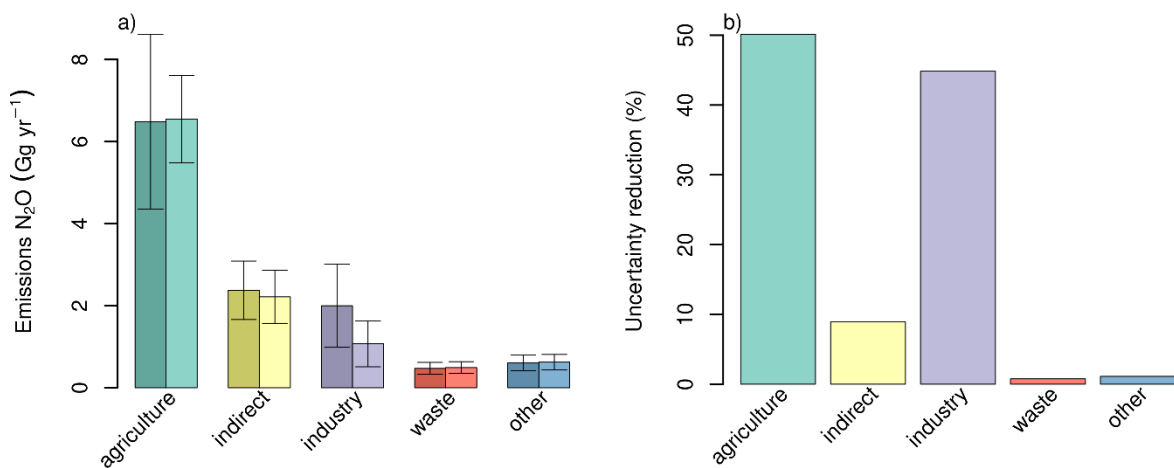


Abbildung 48: (links) mittlere Schweizer N_2O Emissionen nach Emissionssektor für die Jahre 2017-2025 und über alle Sensitivätsinversionen. A priori Werte sind als dunklere Färbung angegeben. Fehlerbalken repräsentieren 2- σ Konfidenzbereiche. (rechts) Unsicherheitsreduktion zwischen a priori und a posteriori Emissionen.

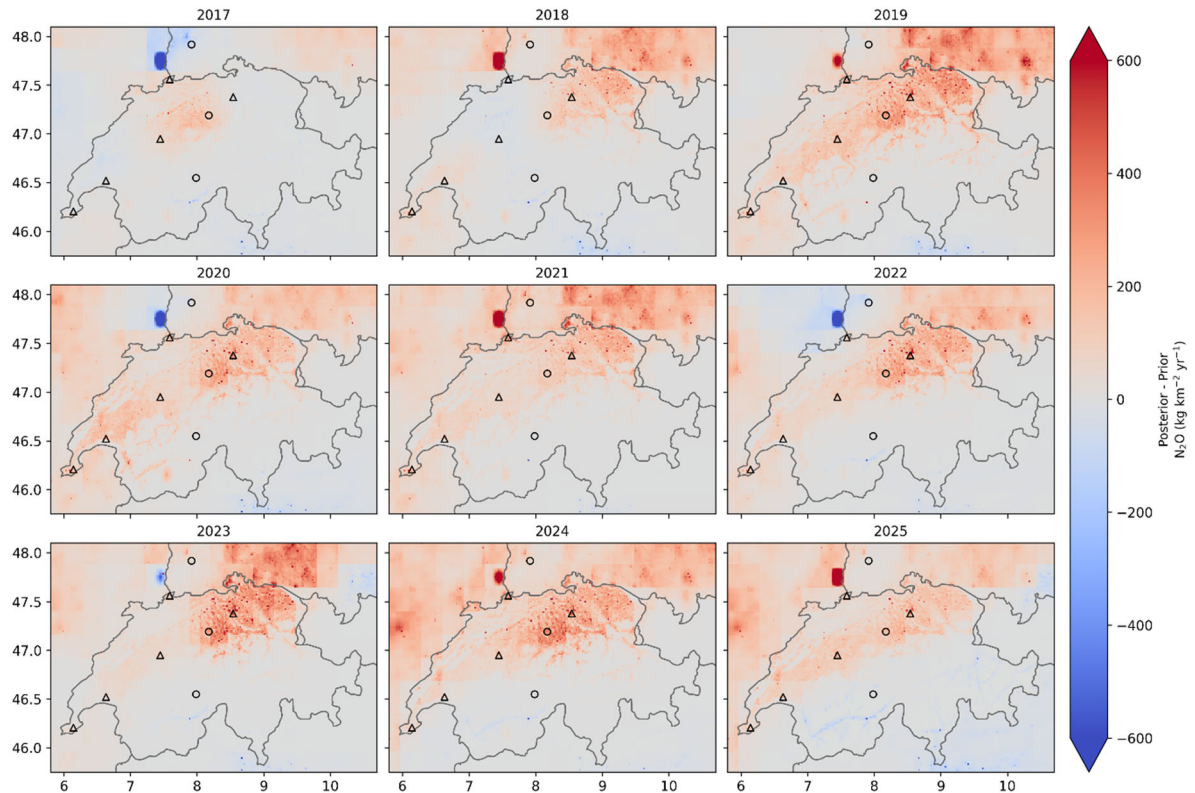


Abbildung 49: Räumliche Verteilung der Lachgasemissionsdifferenz der aus der inversen Modellierung gewonnenen Verteilung zur a-priori Verteilung des Inventars für die Jahre 2017 bis 2025 (FP-C1). Dabei weisen blaue (rote) Regionen auf geringere (stärkere) Emissionen als im Inventar hin.

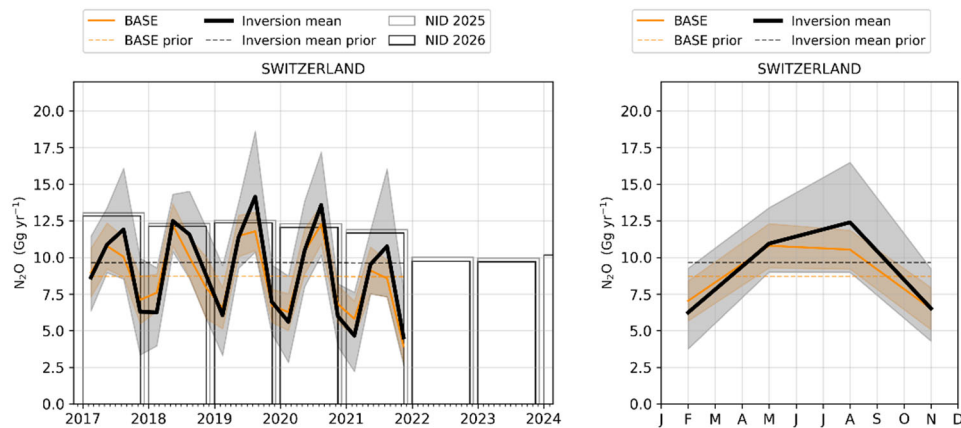


Abbildung 50: (links) Zeitliche Entwicklung der Schweizer Lachgasemissionen. A posteriori Ergebnisse der inversen Modellierung mit 3-monatlicher Auflösung für die Jahre 2013 – 2021 (FP-C7). Mittel aller Inversionen: schwarze Linie und Unsicherheitsband. BASE Inversion: orange Linie und Unsicherheitsband. Jahresemissionen aus dem NID sind als schwarze/grau Balken dargestellt. (rechts) Mittlere monatliche Lachgasemissionen aus der inversen Modellierung, 2017-2021. Alle Unsicherheitsangaben auf 1σ -Level.

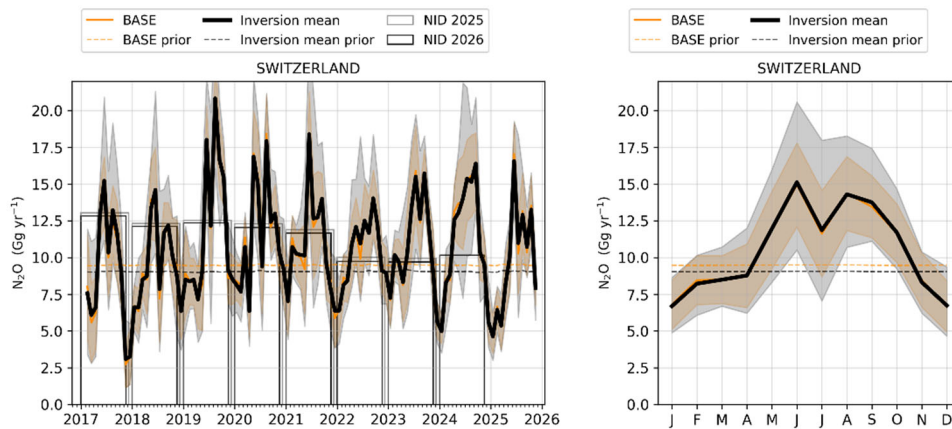


Abbildung 51: (links) Zeitliche Entwicklung der Schweizer Lachgasemissionen. A posteriori Ergebnisse der inversen Modellierung mit monatlicher Auflösung für die Jahre 2017 – 2025 (FP-C1). Mittel aller Inversionen: schwarze Linie und Unsicherheitsband. BASE Inversion: orange Line und Unsicherheitsband. Jahresemissionen aus dem NID sind als schwarze/grau Balken dargestellt. (rechts) Mittlere monatliche Lachgasemissionen aus der inversen Modellierung, 2017-2025. Alle Unsicherheitsangaben auf 1σ -Level.

4.2.3 Ausblick

Die grossen Unterschiede in den Methanemissionen, die sich in der inversen Modellierung mit zwei verschiedenen Transportmodellen ergeben, sollen weiter untersucht werden. Dazu sollen Transportsimulationen auch in den Jahren vor 2017 mit höherer räumlicher Auflösung durchgeführt werden. Dies wird durch eine neues Reanalyse-Produkt der MeteoSchweiz mögliches, welches mit dem ICON-Modell und mit einer Auflösung von ca. 1 km erstellt wurde. Weiterhin wird das hier angewandte Inversionssystem der Empa zurzeit erweitert und soll in Zukunft in der Lage sein, räumlich aufgelöste und Sektor-basierte Inversionen zu vereinen. Dies sollte für Lachgas eine Verbesserung in der Prozesszuordnung ermöglichen. Vergleiche der inversen Modellierung von Lachgasemissionen mit denen aus einem Prozessmodell für landwirtschaftliche Böden (Agroscope) sind in der Planung und sollten zu einem besseren Verständnis zwischen Lachgasemissionen, Umwelteinflüssen und Bewirtschaftungsmassnahmen führen.

5. Abschätzung der europäischen Quellgebiete

5.1 Methode

Die Methode zur räumlichen Zuordnung der europäischen Quellen wurde im Projekt HALCLIM-5 eingeführt und hier unverändert übernommen. Sie basiert auf Rückwärtssimulationen mit dem Lagrange'schen Partikeldispersionsmodell (LPDM) FLEXPART, das neben dem advektiven auch den turbulenten und konvektiven Transport berücksichtigt. Das Modell wird mit meteorologischen Feldern der operationellen Analysen des Europäischen Zentrums für Mittelfristvorhersage (ECMWF) angetrieben. Das Modell berechnet sogenannte *Footprints* des Kontakts der gemessenen Luftmassen mit der Erdoberfläche. Diese werden anschliessend mit den gemessenen Konzentrationen durch ein Verfahren verknüpft, das als Trajektorienstatistik bezeichnet wird und qualitative Karten der Herkunft der Spurengase liefert. Die Karten werden in Einheiten von Emissionen erstellt [$\text{kg km}^{-2} \text{Jahr}^{-1}$], sollten aber nur qualitativ interpretiert werden, da z.B. weiter entfernte Quellen von näherliegenden Emissionen aus der gleichen Richtung verdeckt werden können. Details zur Methode und zur Definition der Footprints sind in Brunner et al. (2013) beschrieben.

Die Berechnung der Karten erfolgt in zwei Schritten: Zunächst wird jeder Messung zu einem Zeitpunkt k eine Emissionsrate $\dot{q}_k$ [$\text{kg km}^{-2} \text{Jahr}^{-1}$] zugewiesen, welche dem mittleren Fluss innerhalb des Footprints entspricht, der nötig ist, um die über Hintergrund gemessene Konzentration zu erklären. Diese Rate lässt sich mit Hilfe der Footprints wie folgt berechnen:

$$\dot{q}_k = \frac{M_s}{M_d} \cdot \frac{\chi_k \cdot h}{\sum_{ij} \left(\frac{\tau_{ij}}{\rho_{ij}} \right)_k}$$

wobei χ_k das zurzeit k gemessene Mischungsverhältnis über Hintergrund und $(\tau_{ij}/\rho_{ij})_k$ den dazugehörigen Footprint bezeichnet (Aufenthaltszeit τ_{ij} der simulierten Luftpakete ("Partikel") in Gitterzelle mit räumlichen Indizes ij dividiert durch die Dichte trockener Luft ρ_{ij}). Weiter ist h die Dicke der Schicht über Grund, für welche die Aufenthaltszeiten berechnet wurde. Standardmässig ist diese auf 100 m gesetzt. M_s ist die Molmasse der gemessenen Substanz, M_d diejenige trockener Luft.

Nachdem allen Messungen eine Emissionsrate $\dot{q}_k$ zugewiesen wurde, wird das räumliche Feld $\dot{Q}_{ij}$ der mittleren Emissionsraten pro Gitterzelle ij berechnet als

$$\dot{Q}_{ij} = \frac{\sum_k \dot{q}_k \left(\frac{\tau_{ij}}{\rho_{ij}} \right)_k}{\sum_k \left(\frac{\tau_{ij}}{\rho_{ij}} \right)_k}$$

Diese Formel entspricht dem Mittel aller Raten $\dot{q}_k$ gewichtet mit den jeweiligen Footprints. Durch die Kombination dieser beiden Gleichungen werden die gemessenen Mischungsverhältnisse χ_k räumlich ihren Quellregionen zugeordnet. Die Methode erlaubt es, Messungen (und Footprints) mehrerer Stationen zu kombinieren. Die Methode kann ausserdem iteriert werden, indem die Footprints $(\tau_{ij}/\rho_{ij})_k$ mit der Verteilung $(Q_{ij})'$ aus der vorangegangenen Iteration gewichtet werden (Stohl et al., Atmos. Environ., 1996). Damit wird berücksichtigt, dass nur der Aufenthalt der Luftmassen über Gebieten, in denen tatsächlich Emissionen stattfinden, zu den gemessenen Konzentrationen beiträgt. In unserem Fall wird ein einzelner Iterationsschritt durchgeführt. Durch die Iteration werden die Quellregionen schärfer abgegrenzt.

Für die hier gezeigten Karten wurden Footprints dreier verschiedener Generationen (2001-2009, 2010-2015, 2016-heute) von FLEXPART-Simulationen mit leicht unterschiedlichen Modell-Auflösungen verwendet. Dies hat nur einen geringen Einfluss auf die Ergebnisse.

5.2 Abschätzung europäischer Quellgebiete

Die abgeschätzten Quellregionen sind für die Jahre 2001 bis 2025 in Abbildung 52 bis Abbildung 57 als 3- bzw. 4-Jahresmittel dargestellt. Für sämtliche Karten wurden sowohl Messungen vom Jungfrauoch als auch von Mace Head verwendet. Einzig bei der Substanz CH_3Br (Abbildung 53) konnten die Daten von Mace Head aufgrund natürlicher lokaler Quellen aus dem Meer nicht verwendet werden.

Wie in früheren Berichten erwähnt, dürften die hohen Werte entlang der nördlichen Atlantikküste Frankreichs und der Niederlande (zu sehen etwa bei HFKW-134a) ein Artefakt der Methode sein, da die Stationen Mace Head und Jungfrauoch die Emissionen aus diesen Regionen nur ungenügend von Emissionen aus Grossbritannien unterscheiden können. Obwohl die Karten nur qualitativen Charakter besitzen, liefern sie wertvolle Einsichten in die grossflächige Verteilung der Quellen innerhalb Europas und ihre langzeitliche Entwicklung.

Bei HFKW-134a zeigt sich über die 24 Jahre eine nur wenig variierende Verteilung, was auf die weitverbreiteten diffusen Quellen aus Autoklimaanlagen und stationären Klimaanlagen zurückzuführen sein dürfte (Abbildung 52). Wichtige Quellregionen sind die dicht besiedelten Gebiete Europas wie Westdeutschland, Benelux (Belgien/Niederlande/Luxemburg), Grossbritannien und Norditalien. Emissionen in Grossbritannien scheinen bis 2015 zugenommen und anschliessend wieder abgenommen zu haben, während Emissionen von der iberischen Halbinsel über alle Jahre eher rückläufig waren.

HFKW-125, welches vor allem in Kältemittel-Mischungen eingesetzt wird, zeigt eine ähnliche räumliche Verteilung wie HFKW-134a aber eine unterschiedliche zeitliche Entwicklung. Von 2001 bis etwa 2012 haben die Quellen europaweit deutlich zugenommen. In Norditalien scheinen die Emissionen ab 2012 wieder etwas gesunken zu sein, während sie über anderen Gebieten konstant hoch blieben. Seit 2020 zeichnet sich ein leichter Rückgang ab.

Emissionen des Schäumungsmittels HFKW-152a sind nördlich der Alpen nach 2008 weitgehend verschwunden, konzentrierten sich danach auf Norditalien, wo sie ab 2013 ebenfalls stark zurückgingen und ab 2016 weitestgehend verschwanden. Die als Ersatz für das verbotene HFKW-141b zur Schaumstoffherstellung eingesetzten HFKW-245fa und HFKW-365mfc zeigen anfänglich eine recht unterschiedliche räumliche Verteilung (Abbildung 53). Die Emissionen von HFKW-245fa konzentrierten sich bis etwa 2012 vor allem auf Norditalien, während danach bis etwa 2019 erhöhte Emissionen auch nördlich der Alpen von Grossbritannien über Nordfrankreich bis Westdeutschland zu finden waren. Seit 2020 sind die Emissionen in allen Gebieten wieder deutlich gesunken. Im Unterschied zu HFKW-245fa lagen die bedeutendsten Quellen von HFKW-365mfc in Frankreich, Grossbritannien und wahrscheinlich den Benelux-Ländern. Direkte Emissionen aus der Produktionsstätte von HFKW-365mfc in Tavaux dürften in der Vergangenheit einen wichtigen Beitrag zu den Emissionen Frankreichs geleistet haben. Von etwa 2012 bis 2020 wurden diese durch Emissionen aus einer unscharf definierten Region überlagert, die sich von Westdeutschland bis Frankreich und Grossbritannien erstreckt. Seit 2020 sind die Emissionen von HFKW-365mfc deutlich rückläufig. Die Quellregionen der beiden in der Schaumstoffherstellung verwendeten Substanzen haben sich angeglichen, wobei deutlich mehr HFKW-365mfc als HFKW-245fa emittiert wird.

Die Emissionen des in Europa seit 2003 in der Schaumstoffherstellung verbotenen HFKW-141b sind nach 2004 sehr stark zurückgegangen, was auf eine gute Einhaltung des Montrealer Protokolls in Europa hinweist. Einzig in Grossbritannien und möglicherweise den Benelux-Ländern scheinen bis heute geringe Quellen vorhanden zu sein.

In der Abbildung 54 sind die Verteilungen der europäischen Quellen derjenigen HFKW abgeschätzt, welche erst seit 2008 mit der Medusa gemessen werden. Die praktisch ausschliesslich in Kältemitteln-

schungen eingesetzten HFKW-32 und HFKW-143a zeigen eine relative ähnliche Verteilung wie die Substanzen HFKW-125 und HFKW-134a. Während bei dem weniger klimawirksameren HFKW-32 die Emissionen von 2008-2022 eher zunahmen, sind die Emissionen von HFKW-143a seit etwa 2015 rückläufig.

In der Abbildung 55 sind europäische Quellen von sehr stabilen Substanzen mit einem entsprechend hohen Treibhauspotential dargestellt. HFKW-23 entweicht vor allem als Nebenprodukt bei der Produktion von HFCKW-22, das als Ausgangssubstanz für die Herstellung von Teflon verwendet wird. Die dominante Quelle in Norditalien ist eine Fabrik zur Herstellung von HFCKW-22 (Keller et al., 2011). Die Grösse dieser Quelle scheint seit 2018 deutlich abgenommen zu haben, was auch von Simmonds et al. (2018) festgestellt wurde, ist aber noch immer deutlich erkennbar. Eine weitere Quelle ist eine Fabrik in Dordrecht in den Niederlanden, wie neuste Messungen der Empa in den Niederlanden gezeigt haben. Diese Quelle kann aus den Messungen am Jungfraujoch und Mace Head lediglich als diffuse Quellregion identifiziert werden.

Potentielle Quellen für das ebenfalls sehr langlebige CF_4 sind die Aluminiumherstellung, die Elektroindustrie und ebenfalls die Produktion von HFCKW-22. Für Europa scheint die Herstellung von HFCKW-22 dominant zu sein, da CF_4 der gleichen Quellregion wie HFKW-23 zugewiesen wird und die meisten Verschmutzungsereignisse eine parallele Erhöhung beider Substanzen zeigen. Seit 2020 sind die Emissionen von CF_4 aus Italien weitgehend verschwunden – auch dies in auffälliger Übereinstimmung zu den HFKW-23 Emissionen.

Für das äusserst langlebige und klimaschädliche SF_6 , mit Emissionen aus elektrischen Hochspannungsschaltanlagen und der Metallherstellung zeigen sich die mit Abstand grössten Quellen in Deutschland, gelegentlich auch in Norditalien. Ein klarer Trend der Emissionen ist bisher nicht ersichtlich. In den Jahren 2017-2019 gab es ungewöhnlich hohe Emissionen aus Deutschland.

Massiv abgenommen haben in Europa die Quellen des im Montrealer Protokoll in den Industrieländern verbotenen CH_3Br (Abbildung 53), welches vor allem als Begasungsmittel in der Landwirtschaft eingesetzt wurde. Bis Mitte der 2000er Jahre fanden sich Quellen vor allem in den südlichen Ländern Italien und Spanien. Seit 2007 werden am Jungfraujoch praktisch keine Verschmutzungsereignisse mehr registriert. Natürliche Emissionen aus dem Mittelmeer sind gegenüber den früheren Emissionen aus der Landwirtschaft offensichtlich vernachlässigbar. Bei SO_2F_2 (Sulfurylfluorid), welches in gewissen Anwendungsbereichen als Ersatz von CH_3Br eingesetzt wird, waren die Emissionen bis 2018 auf wenige, zeitlich stark begrenzte Ereignisse konzentriert, die in Deutschland, Frankreich, Italien und Spanien auftraten. SO_2F_2 wird zum Beispiel als Begasungsmittel in der Kontrolle von Schädlingen in Holzgebäuden sowie wie Silos oder Mühlen eingesetzt. Solche Begasungsereignisse erfolgen sporadisch, z.B. wenn eine Mühle über Feiertage länger geschlossen bleibt. Seit etwa 2019 gibt es jedoch deutlich erhöhte Emissionen besonders aus der Benelux-Region, was auf eine breitere und stark zunehmende Nutzung hindeutet.

Die Emissionen der verbotenen FCKW-11 und -12 haben in Europa zwischen den Jahren 2001 und 2022 deutlich abgenommen, weitaus schneller und stärker bei FCKW-12 als bei FCKW-11 (Abbildung 57). Bis etwa 2010 waren Emissionen der beiden Substanzen noch fast überall in Europa vorhanden, was auf diffuse Emissionen von langlebigen Produkten wie Schaumstoffen und bestehenden Kälteanlagen hinweist. Nach 2012 sind die Emissionen von FCKW-12 fast vollständig verschwunden, während es von FCKW-11 weiterhin Emissionen aus einer Region von Nordfrankreich über Benelux bis nach Grossbritannien sowie aus Norditalien gibt. Halon-1211, welches nur noch in Ausnahmefällen zugelassen ist (z.B. als Löschmittel in Flugzeugen), scheint über die Jahre überwiegend in Italien und Grossbritannien emittiert worden zu sein. Bis etwa 2010 waren die Emissionen deutlich rückläufig, blieben danach aber relativ konstant.

Bei den nicht verbotenen aber dennoch leicht ozonschichtabbauenden chlorierten Lösungsmitteln Dichlormethan (CH_2Cl_2) und Perchlorethylen (C_2Cl_4) (Abbildung 56) zeigt sich über die Jahre ein deutlicher Rückgang der gesamteuropäischen Emissionen. Bei CH_2Cl_2 stammen die verbleibenden Emissionen hauptsächlich aus Norditalien und Grossbritannien. Bei C_2Cl_4 kontrastiert ein starker Rückgang bis auf verschwindend kleine Emissionen in den Ländern nördlich der Alpen und in Spanien mit der Situation in Italien. Bis etwa 2013 sind auch in Italien die Emissionen deutlich gesunken, blieben seither aber relativ stabil.

Bei den HFOs werden seit Beginn der Messungen im Jahr 2012 auf dem Jungfraujoch immer mehr Konzentrationen über dem Detektionslimit gemessen. Dies zeigt sich in einer starken Zunahme zwischen 2013 und 2022 (Abbildung 57). In der letzten 3-Jahresperiode (2020-2022) fanden sich für das HFO-1234yf erhebliche Quellen in den Beneluxländern und England. Dieselben Regionen sind auch für das in stationären Klimaanlage und zur Schaumstoffherstellung gebrauchte HFO-1234ze(E) sichtbar, wobei hier zusätzlich in weiten Teilen von Deutschland erhöhte Emissionen sichtbar sind.

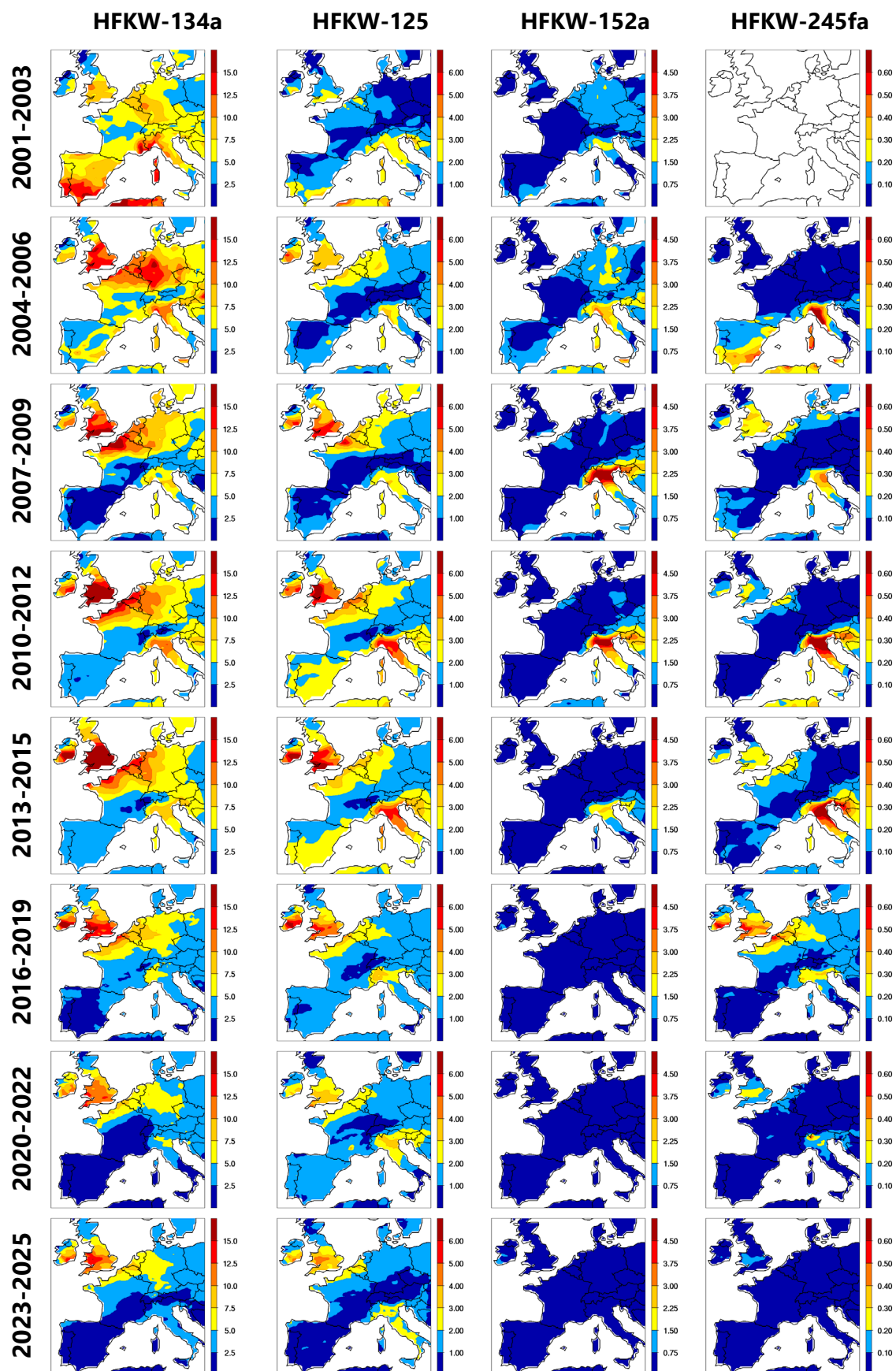


Abbildung 52: Potentielle europäische Quellregionen von HFKW-134a, -125, -152a und -245fa. Die Werte bezeichnen Emissionsraten in Einheiten von $\text{kg km}^{-2} \text{Jahr}^{-1}$.

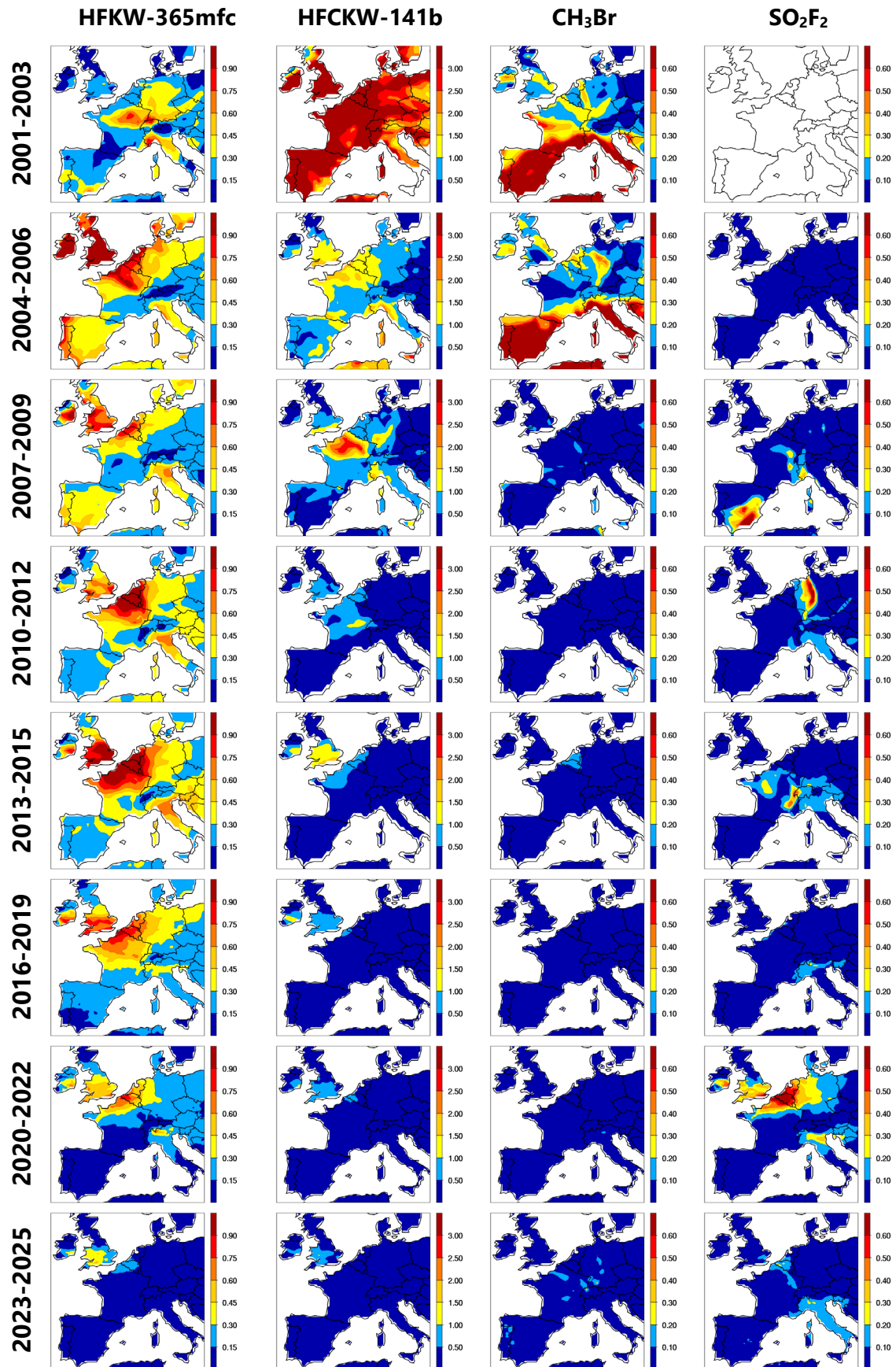


Abbildung 53: Analog zu Abbildung 52 für HFKW-365mfc, HFCKW-141b, Methylbromid (CH₃Br) und SO₂F₂.

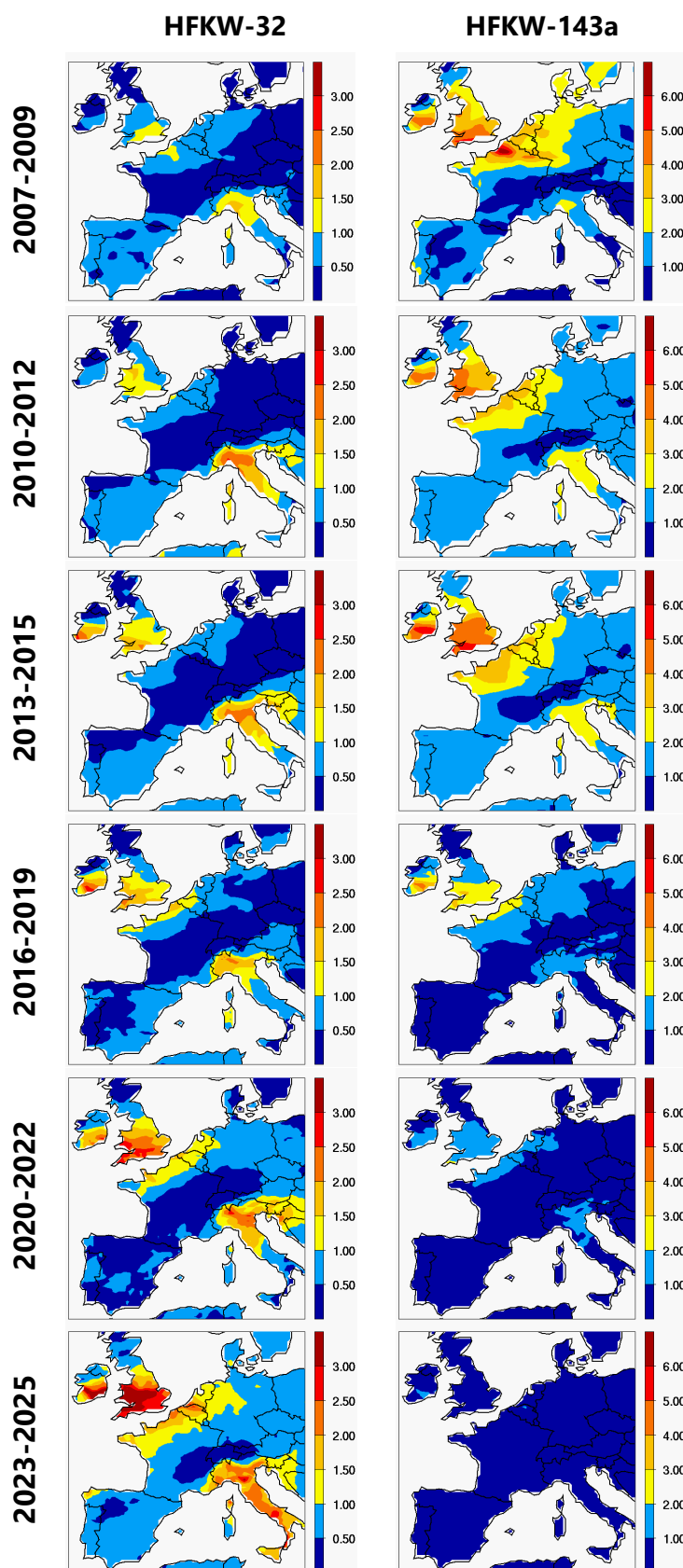


Abbildung 54: Analog zu Abbildung 52 für HFKW-32 und HFKW-143a, welche erst ab 2008 gemessen wurden.

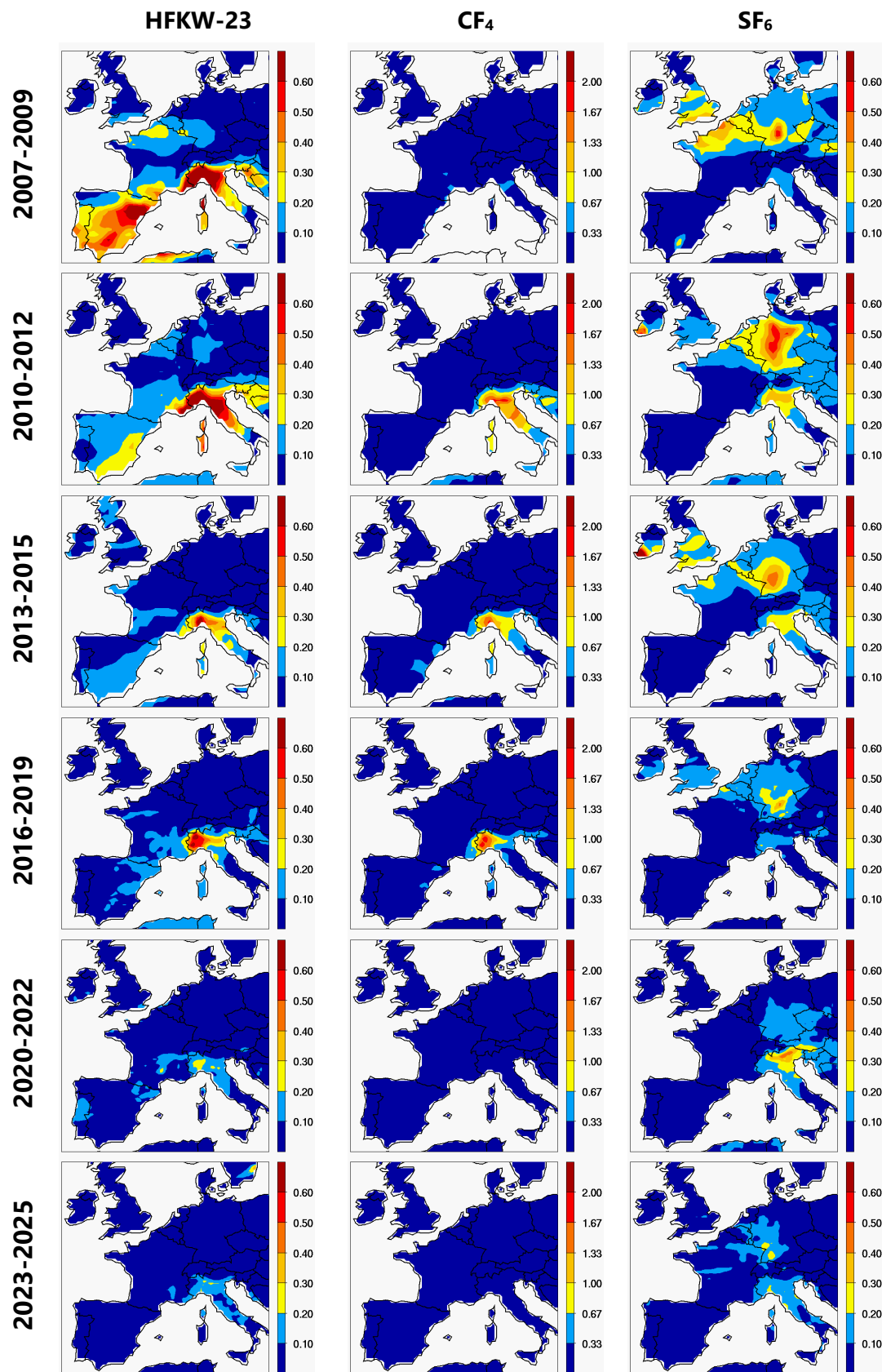


Abbildung 55: Analog zu Abbildung 52 für HFKW-23, CF₄ und SF₆, welche erst ab 2008 genügend genau gemessen werden konnten.

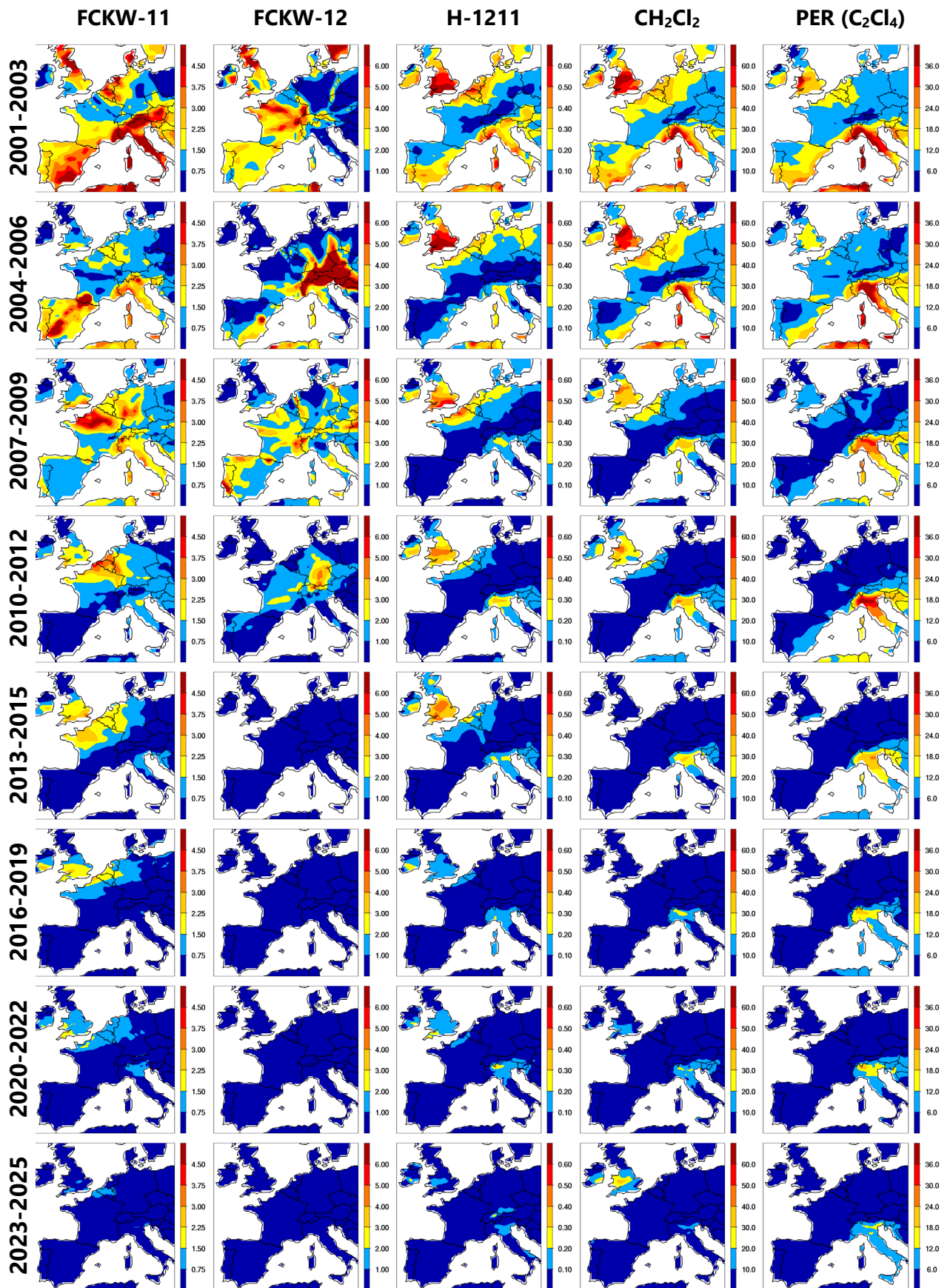


Abbildung 56: Analog zu Abbildung 52 für FCKW-11, FCKW-12, Halon-1211 und die beiden Lösemittel Dichlormethan (CH₂Cl₂) und Perchlorethylen (C₂Cl₄)

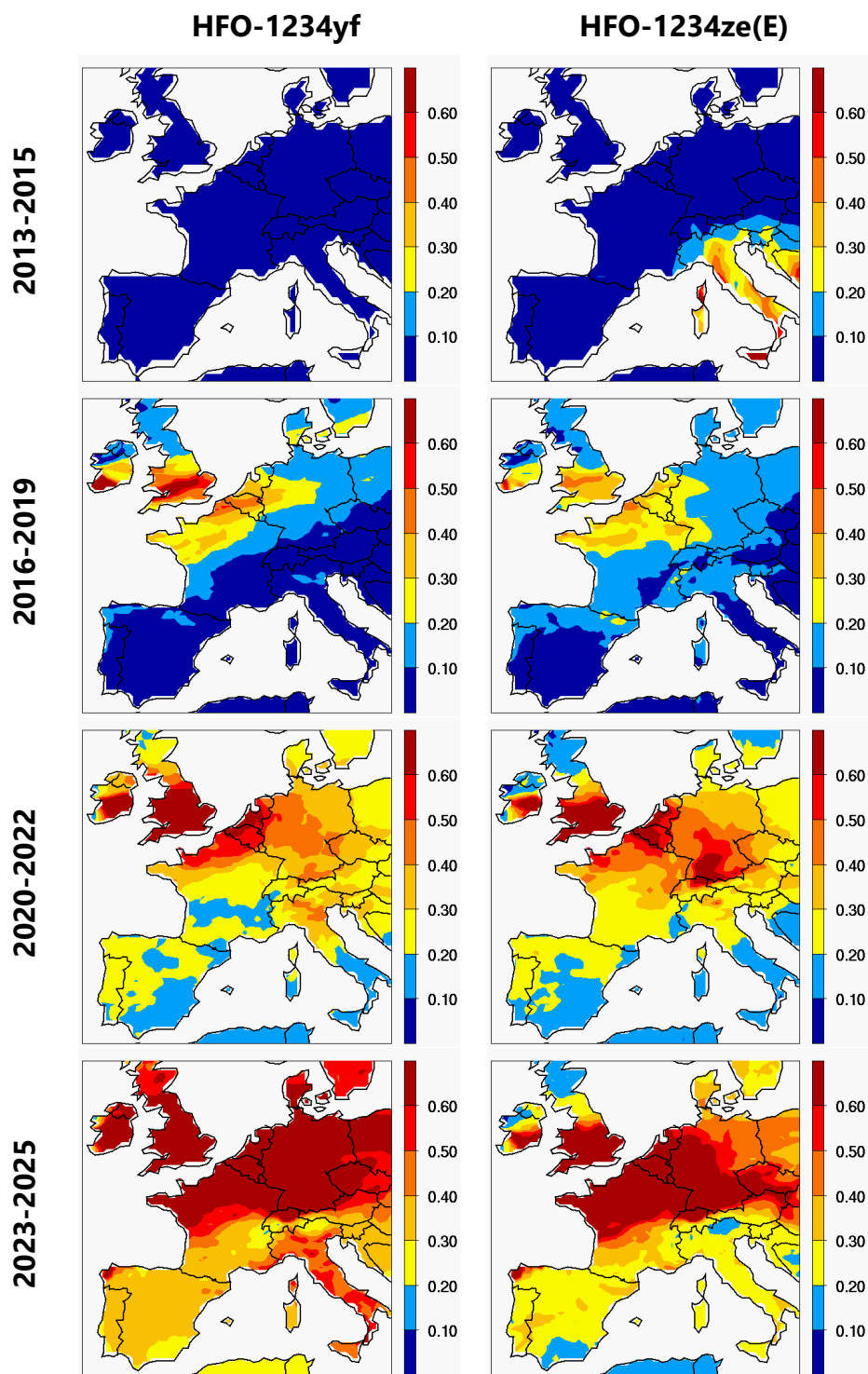


Abbildung 57: Analog zu Abbildung 52 für HFO-1234yf und HFO-1234ze(E).

6. Abschätzung globaler HFKW Emissionen (Kigali-Index)

Da die Einführung und Verwendung der HFKWs eine direkte Folge des weltweiten Verbots von ozon-schichtabbauenden Substanzen ist, haben die Teilnehmer des Montrealer Protokolls beschlossen, die Produktion und den Verbrauch der HFKWs global zu limitieren (Kigali-Änderung zum Montrealer Protokoll). Die Teilnehmer des Montreal Protokolls haben einem mehrstufigen Reduktionsplan zugestimmt, der für Industrie- und Transitionsstaaten maximale Produktion und Verbrauch in der Referenzperiode 2011 bis 2013 vorsieht, während dies für Entwicklungs- und Schwellenländer für 2020 bis 2022 festgelegt wurde.

Um den direkten Erfolg der Kigali-Änderung aus unabhängigen Messungen nachzuweisen, wurde in einem Vorgängerprojekt der sogenannte Kigali-Index vorgeschlagen, der Anhand zweier einfacher Zahlenwerte bzw. Zeitserien aufzeigen soll, ob die eingeleiteten Massnahmen zu Erfolgen führen. Dazu werden die globalen Konzentrationen aller 18 in den Kigali-Änderungen erwähnten HFKW aus Beobachtungen ermittelt und deren Emissionen mit Hilfe globaler inverser Modellierung abgeschätzt.

Von den 18 Substanzen werden bereits heute 11 im AGAGE bzw. NOAA Netzwerk kontinuierlich gemessen. Von den weiteren Substanzen werden zwei (HFKW-41 und HFKW-134) lediglich am Jungfraujoch kontinuierlich gemessen, während die Konzentrationen der verbleibenden Substanzen bislang nur in atmosphärischen Stichproben ermittelt werden und unter der Detektionsgrenze geblieben sind. Aus den global verfügbaren AGAGE Messungen werden mittlere bodennahe Hintergrundkonzentrationen berechnet. Mit diesen wird ein einfaches globales Transport- und Chemiemodell (AGAGE-12-box) angetrieben. Globale Emissionen werden mit diesem Transportmodell und einer Bayesischen Inversion berechnet, welche Monatsmittel der Emissionen in 4 Breitenbändern liefert. Konzentrationen werden weiterhin in globale Strahlungsantriebe übersetzt, indem sie mit den gasspezifischen Strahlungsantrieben gewichtet werden.

Zuletzt werden die Zeitserien von Strahlungsantrieb und Emissionen mit deren Mittelwerten aus der Referenzperiode 2011-2013 normiert, um den Annual Kigali-Index (AKI) für Strahlungsantrieb (RF) (Abbildung 58) und Emissionen (E) (Abbildung 59) zu ermitteln, wobei die Emissionen in CO₂ Äquivalente umgerechnet werden. Obwohl der Kigali-Index aufgrund des uneinheitlichen Reduktionsplans kein absolutes Werkzeug ist und auch nicht direkt Produktion und Verbrauch, sondern allenfalls Emissionen, angeben kann, sollte er den Erfolg der aufgrund der Kigali-Änderungen beschlossenen Massnahmen nach einiger Zeit deutlich sichtbar machen. Sollten erneute Anstiege der Emissionen auftreten, sollten diese auch direkt sichtbar gemacht und kommuniziert werden.

Für das Jahr 2025 berechnen wir einen Annual-Kigali-Index für den Strahlungsantrieb von AKI-RF = 2.47. Dies bedeutet, dass sich der Strahlungsantrieb der Kigali-HFKW seit dem Referenzzeitraum mehr als verdoppelt hat (kontinuierliche Akkumulation in der Atmosphäre). AKI-RF steigt zurzeit weiter kontinuierlich an. Für die Emissionen berechnen wir für 2025 einen AKI-E von 1.78. Im Gegensatz zum Strahlungsantrieb ist dieser Wert im Vergleich zum Vorjahr leicht zurückgegangen. Dies könnte als ein erster Erfolg der Kigali-Massnahmen betrachtet werden, allerdings basieren die Werte für 2025 noch auf vorläufigen Berechnungen, da lediglich Konzentrationsbeobachtungen bis März 2026 berücksichtigt werden konnten.

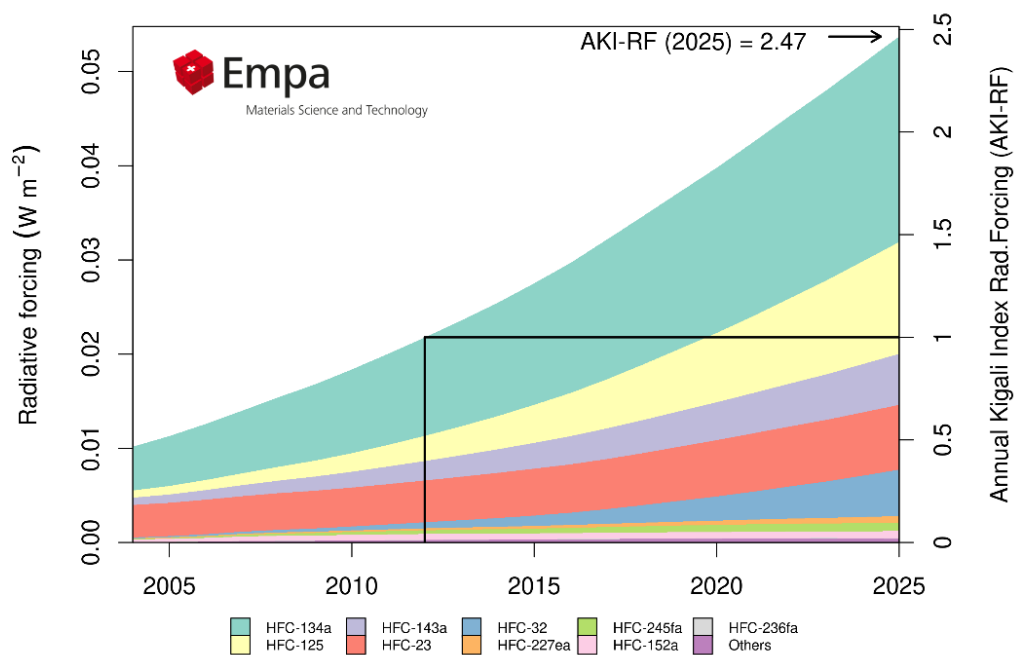


Abbildung 58: Strahlungsantrieb aller in den Kigali-Änderungen aufgeführten 18 HFKW. Der Annual Kigali Index (AKI-RF), welcher den Strahlungsantrieb für die Referenzperiode 2011-2013 zu 1 normiert wird auf der rechten y-Achse gezeigt. Der AKI-RF für das letzte Jahr mit vollständigen Konzentrationsmessungen ist oben rechts angegeben.

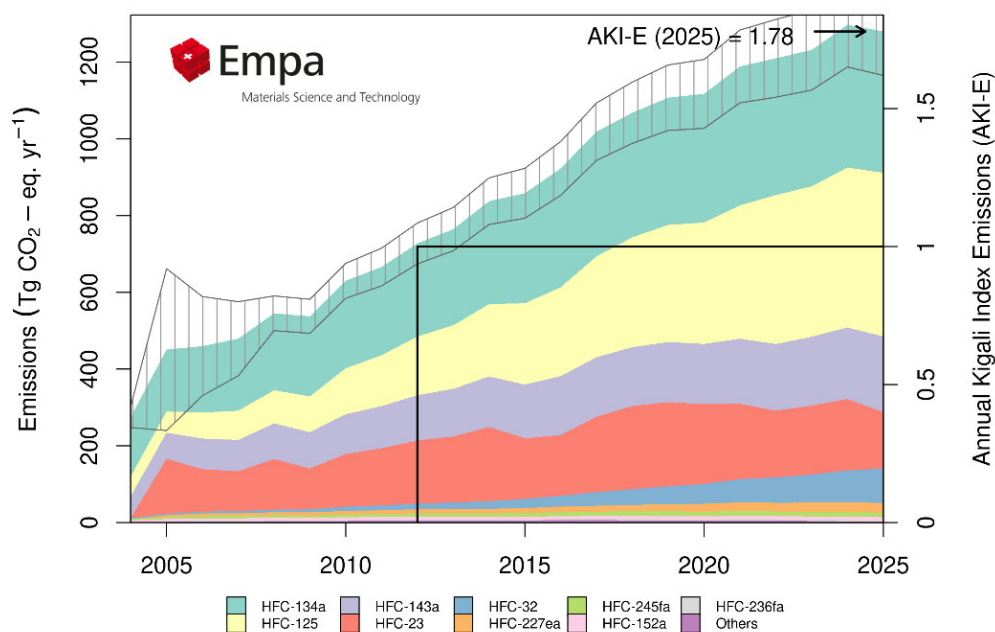


Abbildung 59: Zusammengefasste globale Emissionen aller 18 in den Kigali-Änderungen aufgeführten HFKW. Der Annual Kigali Index (AKI-E), welcher die Emissionen für die Referenzperiode 2011-2013 zu 1 normiert wird auf der rechten y-Achse gezeigt. Der AKI-E für das letzte Jahr mit vollständigen Konzentrationsmessungen ist oben rechts angegeben. Die grau schattierte Fläche gibt die Unsicherheit der Emissionsbestimmung ($1-\sigma$ Niveau).

7. Publikationen CLIMGAS-CH (2021-2026)

Die auf dem Jungfraujoch innerhalb des HALCLIM und CLIMGAS-CH Projektes erstellten Messungen und Analysen wurden während der letzten 5 Jahre in folgenden Publikationen verwendet.

2026

Vollmer, M.K., J.R. Pitt, D.Young, **S. Henne**, B. Mitrevski, J. Mühle, A. Ganesan, J. Arduini, A.J. Manning, T. Wagenhäuser, A.L. Redington, D.B. Melo, B. Murphy, R. Gluckmann, K.M. Stanley, P.B. Krummel, C.R. Lunder, J. Yun, D. Rust, A. Wenger, M. Guillevic, J. Kim, R.H. J. Wang, T.S. Rhee, **L. Constantin**, A. Frumau, C.M. Harth, P.K. Salameh, O. Hermansen, M. Rigby, L.M. Western, A. Engel, S. O'Doherty, S. Park, M. Maione, P. J. Fraser, R. G. Prinn, R. F. Weiss, and **S. Reimann**, Global Observations and European emissions of the halogenated olefins HFO-1234yf, HFO-1234ze(E), and HCFO-1233zd(E) from the AGAGE (Advanced Global Atmospheric Gases Experiment) network, *Atmos. Chem. Phys.*, accepted for publication, 2026.

De Longueville, H., **Brito Melo, D.**, Redington, A., Ramsden, A., Danjou, A., Andrews, P., Pitt, J., Murphy, B., Constantin, L., Stanley, K. M., O'Doherty, S., Wenger, A., Young, D., Engel, A., Schuck, T., Meixner, K., Wagenhaeuser, T., Gad, F., **Vollmer, M. K.**, **Reimann, S.**, Maioine, M., Arduini, J., Lunder, C., Schmidtbauer, N., Haszpra, L., Molnár, M., Frumau, A., Couret, C., Rigby, M., **Henne, S.**, Manning, A., and Ganesan, A.: European HFC emissions evaluated with multiple atmospheric inverse models and UNFCCC national inventories, *EGUsphere*, 1–40, 10.5194/egusphere-2026-194, 2026.

Pitt, J. R., Rust, D., Ganesan, A., Western, L. M., **Vollmer, M. K.**, Mühle, J., Bühlmann, T., Harth, C. M., Montzka, S. A., Hall, B. D., Vimont, I. J., Manning, A. J., Redington, A. L., **Henne, S.**, **Brito Melo, D.**, Annadate, S., Constantin, L., Murphy, B. M., Rigby, M., Young, D., O'Doherty, S., Wenger, A., Lunder, C. R., Hermansen, O., Wagenhäuser, T., Engel, A., Arduini, J., Maione, M., Yun, J., Mitrevski, B., Krummel, P. B., Fraser, P. J., Kim, J., Wang, R. H. J., Rhee, T. S., Salameh, P. K., Spain, T. G., **Reimann, S.**, Prinn, R. G., Weiss, R. F., and Stanley, K. M.: Global and regional emissions of 1,2-dichloroethane derived from AGAGE and NOAA observations, *EGUsphere*, 1–44, 10.5194/egusphere-2026-1589, 2026.

2025

Henne, S., F.R. Storck, **M.K. Vollmer**, H. Wöhrnschimmel, Markus Leuenberger, and **S. Reimann**, Trifluoroacetate (TFA) in Precipitation and Surface Waters in Switzerland: Trends, Source Attribution, and Budget, *Atmos. Chem. Phys.*, 25, 18157–18186, 2025.

Western, L.M., S. Bourguet, M. Crotwell, L. Hu, P.B. Krummel, H. De Longueville, A.J Manning, J. Mühle, D. Rust, I. Vimont, **M.K. Vollmer**, M. An, J. Arduini, A. Engel, P.J. Fraser, A.L. Ganesan, C.M. Harth, C. Lunder, M. Maione, S.A. Montzka, D. Nance, S. O'Doherty, S. Park, **S. Reimann**, P.K. Salameh, R. Schmidt, K.M. Stanley, T. Wagenhäuser, D. Young, M. Rigby, R.G. Prinn, and R.F. Weiss, Impact of leakage during HFC-125 production on the increase in HCFC-123 and HCFC-124 emissions, *Atmos. Chem. Phys.*, 25, 17761–17778, 2025.

Western, L.M., R. Matthew, J. Mühle, P.B. Krummel, C.R. Lunder, S. O'Doherty, **S. Reimann**, **M.K. Vollmer**, D. Young, B. Adam, P.J. Fraser, A.L. Ganesan, C.M. Harth, O. Hermansen, J. Kim, R.L. Langenfelds, Z.M. Loh, B. Mitrevski, J.R. Pitt, P.K. Salameh, R. Schmidt, K. Stanley, A.R. Stavert, H-J. Wang, R.F. Weiss, and

R.G. Prinn, Global Emissions and Abundances of Chemically and Radiatively Important Gases from the AGAGE Network, *Earth Syst. Sci. Data*, 17, 6557–6582, 2025.

Meixner, K., T. Wagenhäuser, T.J. Schuck, S. Alber, A.J. Manning, A.L. Redington, K.M. Stanley, S. O'Doherty, D. Young, J. Pitt, A. Wenger, A. Frumau, A.R. Stavert, C. Rennick, **M.K. Vollmer**, M. Maione, J. Arduini, C.R. Lunder, C. Couret, A. Jordan, X.G. Gutiérrez, D. Kubistin, J. Müller-Williams, M. Lindauer, M. Vojta, A. Stohl, and A. Engel, Characterization of German SF₆ emissions, *ACS ES&T Air*, 2 (12), 2889–2899, 2025.

Annadate, S., E. Mancinelli, B. Gonella, F. Moricci, S. O'Doherty, K. Stanley, D. Young, **M.K. Vollmer**, R. Cesari, S. Falasca, U. Giostra, M. Maione, and J. Arduini, Monitoring the impact of EU F-gas regulation on HFC-134a emissions through a comparison of top-down and bottom-up estimates, *Environ. Sci. Eur.*, 37 (1), 2025.

2024

Ge, Y., S. Solberg, M. Heal, **S. Reimann**, W. van Caspel, B. Hellack, T. Salameh, and D. Simpson, Evaluation of modelled versus observed NMVOC compounds at EMEP sites in Europe, *Atmos. Chem. Phys.* 24, 7699–7729, 2024.

Laj, P., C. Lund Myhre, V. Riffault, V. Amiridis, H. Fuchs, ... **S. Reimann** et al., Aerosol, Clouds and Trace Gases Research Infrastructure – ACTRIS, the European research infrastructure supporting atmospheric science, *BAMS*, 105,7, E1098–E1136, 2024.

Liu, Yu, L., J. Sheng, M. Rigby, A. Ganesan, J. Kim, L. Western, J. Muhle, S. Park, H. Park, R. Weiss, P. Salameh, S. O'Doherty, D. Young, P. Krummel, **M. Vollmer**, **S. Reimann**, C. Lunder, R. Prinn, Increases in global and East Asian nitrogen trifluoride (NF₃) emissions inferred from atmospheric observations, *Environ. Sci. Technol.*, 58, 13318–13326, 2024.

Pardo Cantos, I., E. Mahieu, M.P. Chipperfield, C. Servais, **S. Reimann**, and **M.K. Vollmer**, First HFC-134a retrievals from ground-based FTIR solar absorption spectra, comparison with TOMCAT model simulations, in situ AGAGE observations, and ACE-FTS satellite data for the Jungfraujoch station, *J. Quant. Spectroscop. Rad.*, 318, 108938, 2024.

Thompson, R.L., S.A. Montzka, **M.K. Vollmer**, J. Arduini, M. Crotwell, P.B. Krummel, C. Lunder, J. Mühle, S. O'Doherty, R.G. Prinn, **S. Reimann**, I. Vimont, H. Wang, R.F. Weiss and D. Young, Estimation of the atmospheric hydroxyl radical oxidative capacity using multiple hydrofluorocarbons (HFCs), *Atmos. Chem. Phys.*, 24, 1415–1427, 2024.

Western, L.M., J.S. Daniel, **M.K. Vollmer**, S. Clingan, M. Crotwell, P.J. Fraser, A.L. Ganesan, B. Hall, C.M. Harth, P.B. Krummel, J. Mühle, S. O'Doherty, P.K. Salameh, K.M. Stanley, **S. Reimann**, I. Vimont, D. Young, M. Rigby, R.F. Weiss, R.G. Prinn, and S.A. Montzka, Radiative forcing and equivalent effective chlorine due to hydrochlorofluorocarbons peaked in 2021, *Nature Climate Change*, 2023.

2023

Katharopoulos, I., D. Rust, M.K. Vollmer, S. Reimann, S.J. O'Doherty, D. Young, K.M. Stanley, **D. Brunner, L. Emmenegger, and S. Henne**, Impact of transport model resolution and a-priori assumptions on inverse modeling of Swiss F-gases emissions, *Atmos. Chem. Phys.*, 23, 14159–14186, 2023.

Redington, A.L., A.J. Manning, S. Henne, F. Graziosi, L.M. Western, J. Arduini, A.L. Ganesan, C.M. Harth, M. Maione, J. Mühle, S. O'Doherty, J. Pitt, **S. Reimann**, M. Rigby, P.K. Salameh, P.G. Simmonds, T.G. Spain,

K. Stanley, **M.K. Vollmer**, R.F. Weiss, and D. Young, Western European emission estimates of CFC-11, CFC-12 and CCl₄ derived from atmospheric measurements from 2008 to 2021, *Atmos. Chem. Phys.* 23, 7383–7398, 2023.

Rust, D., M.K. Vollmer, S. Henne, T. Bühlmann, A. Frumau, P. van den Bulk, **L. Emmenegger**, R. Zenobi, and **S. Reimann**, First Atmospheric Measurements and Emission Estimates of HFO-1336mzz(Z), *Environ. Sci. Technol.*, 57 (32), 11903–11912, 2023.

Western, L.M., **M.K. Vollmer**, P.B. Krummel, K.E. Adcock, P.J. Fraser, C.M. Harth, R.L. Langenfelds, S.A. Montzka, J. Mühle, S. O'Doherty, D.E. Oram, **S. Reimann**, M. Rigby, I. Vimont, R.F. Weiss, D. Young and J.C. Laube, Increasing global abundances of five ozone-depleting CFCs from 2010–2020, *Nature Geoscience*, 16, 309–313, 2023.

2022

Rust, D., I. Katharopoulos, M.K. Vollmer, S. Henne, S. O'Doherty, D. Say, **L. Emmenegger**, R. Zenobi and **S. Reimann**, Swiss halocarbon emissions for 2019 to 2020 assessed from regional atmospheric observations, *Atmos. Chem. Phys.*, 22, 2447–2466, 2022.

Western, L.M., A.L. Redington, A.J. Manning, C.M. Trudinger, L.Hu, **S. Henne**, X. Fang, L.J.M. Kuijpers, C. Theodoridi, J. Arduini, B. Dunse, A. Engel, P.J. Fraser, C.M. Harth, P.B. Krummel, M. Maione, J. Mühle, S. O'Doherty, S. Park, **S. Reimann**, P.K. Salameh, D. Say, R. Schmidt, T. Schuck, C. Siso, K. M. Stanley, I. Vimont, **M.K. Vollmer**, D. Young, R.G. Prinn, R.F. Weiss, S.A. Montzka and M. Rigby, A renewed rise in global HCFC-141b emissions between 2017–2021, *Atmos. Chem. Phys.* 22 (14), 9601–9616, 2022.

2021

Guillevic, M., A. Guillevic, **M.K. Vollmer**, **P. Schläuri**, **M. Hill**, **L. Emmenegger** and **S. Reimann**, Automated fragment identification for electron ionisation mass spectrometry: application to atmospheric measurements of halocarbons, *J. Cheminform* 13:78, 2021.

Vollmer, M.K., J. Mühle, **S. Henne**, D. Young, M. Rigby, B. Mitrevski, S. Park, C.R. Lunder, T-S Rhee, C.M. Harth, **M. Hill**, R.L. Langenfelds, **M. Guillevic**, **P.M. Schläuri**, O. Hermansen, J. Arduini, R.H.J. Wang, P.K. Salameh, M. Maione, P.B. Krummel, **S. Reimann**, S. O'Doherty, P.G. Simmonds, P.J. Fraser, R.G. Prinn, R.F. Weiss, and L.P. Steele, Unexpected nascent atmospheric emissions of three ozone-depleting hydrochlorofluorocarbons, *Proc. Nat. Acad. Sci.*, 118(5), e2010914118, 2021.

Gressent, A., M. Rigby, A.L. Ganesan, R.G. Prinn, A. Manning, J. Mühle, P.K. Salameh, P. Krummel, P.B. Fraser, L.P. Steele, B. Mitrevski, R.F. Weiss, C.M. Harth, R. H. Wang, S. O'Doherty, D. Young, S. Park, S. Li, B. Yao, **S. Reimann**, **M.K. Vollmer**, M. Maione, J. Arduini and C.R. Lunder, Growing atmospheric emissions of sulfuryl fluoride *J. Geophys. Res.*, 126, e2020JD034327, 2021.

Manning, A.J., A.L. Redington, D. Say, S. O'Doherty, D. Young, P.G. Simmonds, **M.K. Vollmer**, J. Mühle, J. Arduini, G. Spain, A. Wisher, M. Maione, T.J. Schuck, K. Stanley, **S. Reimann**, A. Engel, P.B. Krummel, P.J. Fraser, C.M. Harth, P.K. Salameh, R.F. Weiss, R. Gluckman, P.N. Brown, J.D. Watterson, and T. Arnold, Evidence of a recent decline in UK emissions of HFCs determined by the InTEM inverse model and atmospheric measurements, *Atmos. Chem. Phys.*, 21, 12739–12755, 2021.

Resovsky A., M. Ramonet, L. Rivier, J. Tarniewicz, P. Ciais, **M. Steinbacher**, I. Mammarella, M. Mölder, M. Heliasz, D. Kubistin, M. Lindauer, J. Müller-Williams, S. Conil, R. Engelen, 2021, An algorithm to detect non-background signals in greenhouse gas time series from European tall tower and mountain stations, *Atmos. Measur. Techn.*, 14, 6119–6135, 2021.

- Say, D., A.J. Manning, L.M. Western, D. Young, A. Wisher, M. Rigby, **S. Reimann**, **M.K. Vollmer**, M. Maione, J. Arduini, P.B. Krummel, J. Mühle, C.M. Harth, and B. Evans, R.F. Weiss, R.G. Prinn, and S. O'Doherty, Global trends and European emissions of tetrafluoromethane (CF_4), hexafluoroethane (C_2F_6) and octafluoropropane (C_3F_8), *Atmos. Chem. Phys.*, 21, 2149–2164, 2021.
- Yver-Kwok C., C. Philippon, P. Bergamaschi, T. Biermann, F. Calzolari, H. Chen, S. Conil, P. Cristofanelli, M. Delmotte, J. Hatakka, M. Heliasz, O. Hermansen, K. Kominkova, D. Kubistin, N. Kumps, O. Lauritzen, T. Laurila, I. Lehner, J. Levula, M. Lindauer, M. Lopez, I. Mammarella, G. Manca, P. Marklund, J.-M. Metzger, M. Mölder, S. M. Platt, M. Ramonet, L. Rivier, B. Scheeren, M. K. Sha, P. Smith, **M. Steinbacher**, G. Vitkova, **S. Wyss**, Evaluation and optimization of ICOS atmospheric station data as part of the labeling process, *Atmos. Measur. Techn.*, 14, 89–116, 2021.

8. Appendix

8.1 Analytische Details der Messungen

Die auf dem Jungfraujoch durchgeführten Messungen basieren auf einer Kombination von Gaschromatographie und Massenspektrometrie (GC-MS). Die Resultate vor April 2008 basieren auf Messungen durch das GC-MS-ADS Messgerät, welches danach durch das GC-MS-Medusa System abgelöst wurde. Im April 2014 wurde die Medusa permanent für die zusätzliche Messung von NF_3 umgebaut. Obwohl diese Massnahme signifikante technische Umbauten verlangten (Ersetzen eines 6-port Ventils durch ein 10-port Ventil, Einbau einer zusätzlichen Chromatographie-Säule), sind davon (bei korrekter Durchführung) nur CF_4 (und NF_3) betroffen.

Bei der Medusa wurden wesentliche Verbesserungen gegenüber dem GC-MS-ADS erzielt. Dies betrifft besonders die Probenaufkonzentrierung. Die ca. 2 Liter Probenluft werden neu auf einem System von 2 Kältefallen bei sehr viel tieferen Temperaturen aufkonzentriert, nämlich bei $-155\text{ }^\circ\text{C}$ im Vergleich zu $-50\text{ }^\circ\text{C}$ beim GC-MS-ADS. Das erlaubt das Verwenden schwächerer Adsorbentien, was wiederum Vorteile bei der Desorption der Substanzen mit sich bringt. Obwohl auch die Problemdiagnose durch umfassendere Fernsteuerung (von der Empa aus) und durch die Aufnahme vieler diagnostisch wichtiger Zustandsvariablen (Temperaturen, Drücke, Flussraten) wesentlich verbessert wurde, wird durch die zunehmende Komplexität des Messgeräts und durch die mehr als Verdoppelung der Datenpunkte (doppelte Messfrequenz und grössere Anzahl Substanzen) der Aufwand zur Betreuung und Datenauswertung erhöht. Mit der Medusa werden gegenwärtig 60 Substanzen gemessen. Unter der Annahme von 1 Messung pro Stunde, und mindestens einem Paar von Ionen pro Substanz, gibt das jährlich mehr als 1 Million chromatographische Peaks, welche im Zuge der Datenqualitätskontrolle überprüft werden müssen. Abb. A1 zeigt einen Ausschnitt aus einem 3-dimensionalen Spektrogramm einer Luftmessung.

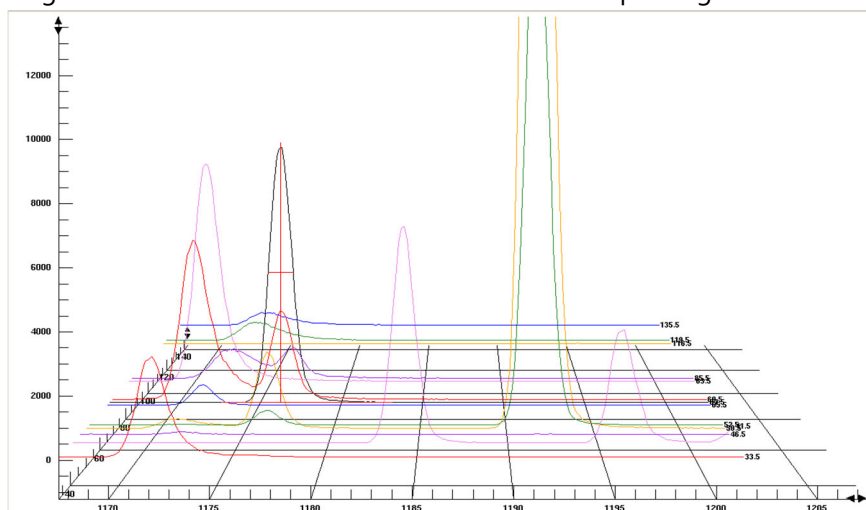


Abbildung A1: 3-Dimensionales Spektrogramm für einen zeitlichen Messausschnitt der Medusa. Die x-Achse zeigt die Retentionszeiten der Substanzen (in sec), die y-Achse die Detektor Response (arbiträre Einheiten), und die z-Achse die m/z der Fragmente. Beispielsweise zeigen die beiden grossen Peaks bei 1191 das Haupt ($m/z = 52$)- und Nebenion ($m/z = 50$) von CH_3Cl .

8.2 Kalibration, Messpräzision

Aufgrund der ändernden Empfindlichkeit der GC-MS Detektion muss das System oft kalibriert werden. Die Kalibration wird durch Messung eines Arbeitsstandards durchgeführt, welcher alternierend zu den Aussenluftmessungen gemessen wird, d.h. für jede Aussenluftmessung gibt es ein Paar eingrenzender Messungen eines Arbeitsstandards. Diese Praxis wurde 2010 leicht abgeändert, sodass zurzeit zwei Luftmessungen nacheinander durchgeführt werden, bevor wieder ein Arbeitsstandard gemessen wird. Arbeitsstandards sind in elektropolierten Edelstahlflaschen abgefüllte Luftproben mit Spurengaskonzentrationen, die in der gleichen Grössenordnung wie die Aussenluftmessungen liegen. Diese Arbeitsstandards reichen typischerweise ca. 6 Monate, bevor sie ersetzt werden müssen. Arbeitsstandards werden auf der Rigi Seebodenalp während einer Periode mit relativ sauberer Luft mit Hilfe einer modifizierten öl-freien Taucherpumpe abgefüllt. Für einige der neuen Substanzen werden geringste Aliquote von hochkonzentrierten Proben dazugegeben, um grössere chromatographische Peaks in den Standards zu erreichen, was ein besseres Abschätzen der Empfindlichkeitsänderungen des Massenspektrometers erlaubt.

Die gefüllten Arbeitsstandards werden regelmässig gegen andere Standards mit bekannter Zusammensetzung vermessen, welche über weitere Standards (Transferstandards, Sekundärstandards) gegen Primärstandards vermessen werden. Die Primärstandards sind künstlich zusammengesetzte Gemische von Spurengasen in einem synthetischen O_2/N_2 -Gemisch, welche auf sehr aufwendige Art hergestellt werden. Diese bilden die Primärkalibrationsskalen. Weil Primärstandards im Konzentrationsbereich von Aussenluft nicht kommerziell erhältlich sind, haben sich hauptsächlich zwei Labors (NOAA und SIO) spezialisiert, solche Standards selbst herzustellen. Die Messungen auf dem Jungfraujoch beruhen hauptsächlich auf Kalibrationsskalen des Scripps Institution of Oceanography (SIO, UC San Diego) aber auch auf Skalen der Empa, Universität Bristol, oder METAS.

8.3 Methode zur Abschätzung der Schweizer Emissionen (mit CO als Tracer)

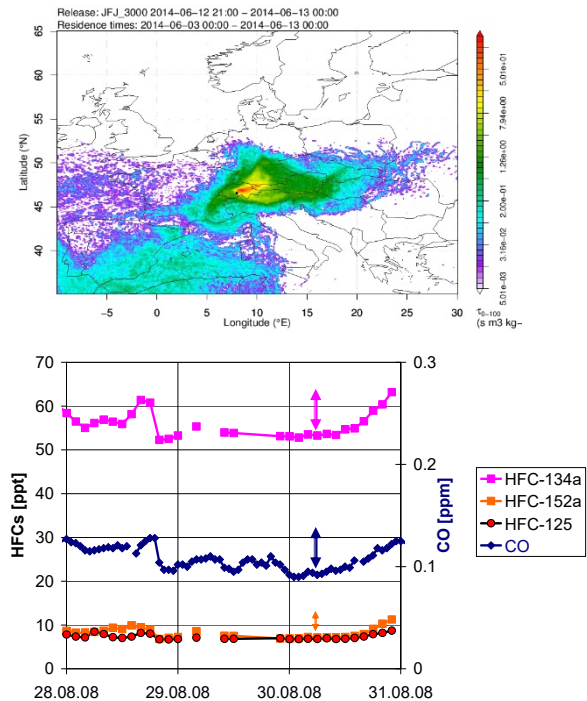
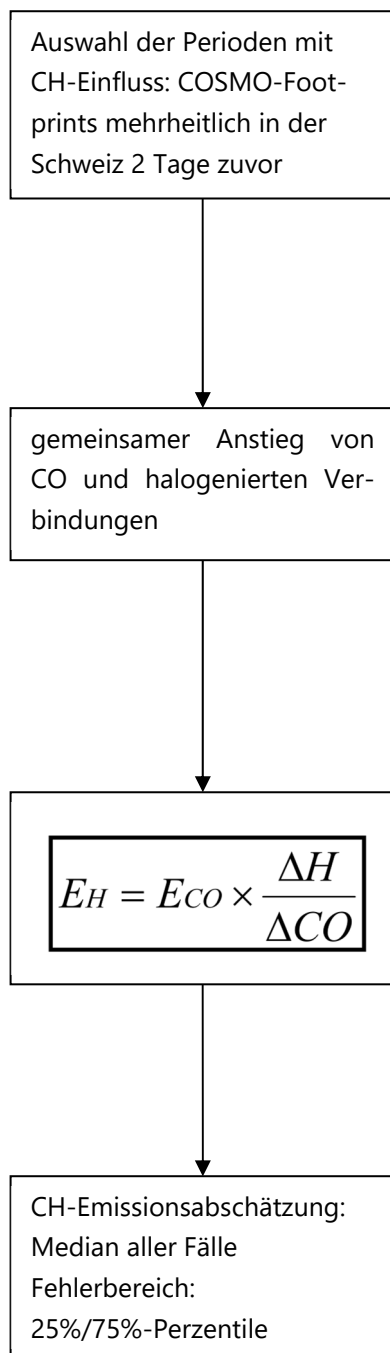
Das Vorgehen zur Abschätzung der Schweizer Emissionen ist in Abb. A2 graphisch dargestellt. Es werden nur Perioden verwendet, bei welchen meteorologische Bedingungen vorherrschen, bei denen ein hauptsächlichlicher Transport aus der Schweiz festgestellt wird. Danach werden durch eine visuelle Durchsicht der meteorologischen Footprints der MeteoSchweiz Perioden ausgewählt, während denen das Jungfraujoch von Luftmassen beeinflusst wird, welche sich während 2 Tagen zuvor hauptsächlich in der Schweiz aufgehalten haben. Danach werden Konzentrationsverläufe von CO und der halogenierten Kohlenwasserstoffe während dieser ausgewählten Perioden verglichen. Die Perioden werden definitiv zur Bestimmung der Schweizer Emissionen verwendet, falls ein gemeinsamer Anstieg von CO und der halogenierten Kohlenwasserstoffe stattfindet, was auf eine gute Durchmischung der eigentlich unabhängigen Schadstoffe vor dem Transport hinweist (Tabelle A1).

Jahr	Fälle	Daten
2003	7	07.07./08.07./11.07./12.07./13.07./14.07./05.08.
2004	11	18.02./24.02./06.03./07.03./08.04./16.07./25.07./29.07./02.08./04.08./16.09.
2005	10	10.06./18.06./20.06./21.06./06.07./06.08./07.08./30.08./02.09./03.09.
2006	9	07.06./08.06./30.06./01.07./02.07./05.07./10.07./12.07./20.07.
2007	10	20.05./23.05./31.05./01.06./09.06./10.06./14.07./26.07./27.07./12.08.
2008	8	21.05./24.06./29.06./25.08./26.08./27.08./28.08./30.08.
2009	12	26.06./30.06./07.08./15.08./18.08./11.09./12.09./14.09./17.09./23.09./25.09./26.09.
2010	9	24.05./05.06./24.06./25.06./20.07./14.08./21.08./03.09./04.09.
2011	14	17.04./19.04./20.04./08.05./10.05./18.05./24.05./29.05./08.06./12.06./15.06./26.7./29.8./23.09.
2012	18	26.05./28.05./30.05./24.06./04.07./23.07./26.07./27.07./03.08./09.08./10.08./11.08./12.08./14.08./21.08./07.09./08.09./10.09.
2013	12	09.07./13.07./14.07./15.07./16.07./22.07./12.08./15.08./16.08./18.08./26.08./30.08.
2014	11	17.06./20.06./21.06./24.06./26.06./01.07./16.07./17.07./18.07./31.07./25.08.
2015	11	16.06./01.07./05.08./21.08./22.08./03.09./04.09./08.09./19.09./25.09./14.10.
2016	10	24.04./21.05./17.07./18.07./14.08./25.08./26.08./27.08./25.09./26.09.
2017	10	25.05./11.06./13.07./17.07./27.07./29.07./06.08./14.08./17.08./30.08.
2018	11	16.06./18.06./20.06./24.06./26.06./08.07./10.07./11.07./12.07./13.07./26.07.
2019	15	31.05./02.06./17.06./14.07./17.07./23.07./25.07./26.07./24.08./25.08./26.08./04.09./15.09. 18.09./20.09.
2020	12	26.05./27.05./28.05./31.05./16.06./05.07./08.07./20.07./07.08./09.08./09.09./18.09.
2021	9	31.03./14.04./23.04./29.05./14.06./15.06./22.07./04.08./20.08.
2022	11	15.04./20.04./29.04./06.07./12.07./13.07./14.07./16.07./03.08./09.08./24.08.
2023	11	04.06./07.06./14.06./20.08./21.08./22.08./10.09./11.09./02.10.
2024	8	13.04./10.05./17.07./03.08./04.08./18.08./02.10./25.11.
2025	14	05.05./08.05./09.05./14.05./12.06./18.06./19.06./20.06./11.07./12.07./11.08./18.08./25.08./25.09.

Tabelle A1: Anzahl und Daten der Fälle an denen die Schweizer Emissionen in den Jahren 2003-2025 mit CO als Tracer abgeschätzt werden konnten.

Danach werden die Emissionen für jeden der Fälle unter Verwendung der in Abb. A2 dargestellten Formel einzeln berechnet. Die erhaltenen Daten werden nur verwendet, falls sie weniger als die 3-fache Standardabweichung vom Mittelwert abweichen (Grubbs-Test). Dies ist im Mittel für mehr als 90 % der Daten der Fall. Anschliessend wird die Emission als der Median der übrigen Werte angegeben und der Fehlerbereich mit den 25%/75% Perzentilen angegeben.

Die auf den Messungen auf dem Jungfraujoch basierten Emissionsabschätzungen weisen eine beträchtliche Unsicherheit auf, welche vor allem durch die limitierte Anzahl der Fälle mit hauptsächlichem Schweizer Einfluss verursacht ist. Diese Fälle finden bedingt durch die Meteorologie meist bei sehr stabilen Wetterlagen unter Hochdruckeinfluss im Sommer und anfangs Herbst statt, welche den vertikalen Austausch von Schadstoffen aus dem Schweizer Mittelland in die Alpen begünstigen. Eine weitere potentielle Fehlerquelle ist die Verwendung von CO als relativen Tracer zur Bestimmung der Emissionen. CO weist meist nicht die gleichen Quellen auf wie die halogenierten Kohlenwasserstoffe. Das gleichzeitige Auftreten auf dem Jungfraujoch ist bedingt durch die schon im Mittelland stattfindende Vermischung, welche aber ebenfalls nicht immer vollständig ist. Zudem ist das Emissionsinventar für das CO in der Berechnung nur jährlich aufgelöst und die Qualität des CO-Inventars mit einer beträchtlichen Unsicherheit verbunden.



E_H = Emission halogenierte Substanz
 E_{CO} = z.B. Emission von CO im Jahr 2025
 = 129 kt
 ΔH = Unterschied unbelastete-belastete
 Atmosphäre für halogenierte
 Verbindungen
 ΔCO = Unterschied unbelastete-belastete
 Atmosphäre für CO

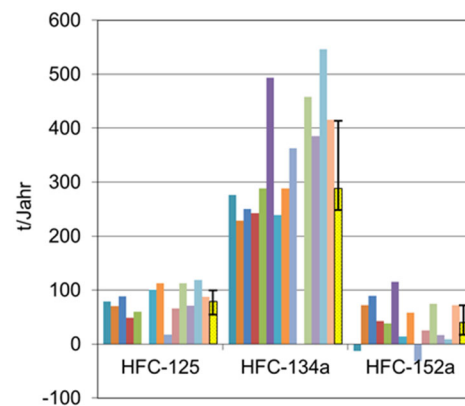


Abbildung A2: Grafische Darstellung der Auswahlkriterien und des Vorgehens zur Bestimmung der Emissionen halogenierter Spurengase der Schweiz.

8.4 Glossar

ADS	A dsorption- D esorption S ystem. Eine Luftprobenaufbereitungseinheit gekoppelt mit GC-MS
AGAGE	A dvanced G lobal A tmospheric G ases E xperiment: Ein Beobachtungsnetzwerk, welches seit über 30 Jahren kontinuierliche Messungen von Spurengasen durchführt
AGU	A merican G eophysical U nion
APRECON	A dvanced P RECONcentration System: Eine von der Empa im 2016/2017 neu gebaute Aufkonzentriereinheit
COSMO	C onsortium for S mall scale M odelling: Das Wettervorhersagemodell der Meteo Schweiz
CDM	C lean D evelopment M echanism
CRDS	Cavity Ring-Down Spectroscopy
ECMWF	E uropean C entre for M edium-Range W eather F orecasts
EMEP	E uropean M onitoring and E valuation P rogramme
FLEXTRA	Trajektorienmodell; verwendet Windfelder des ECMWF Modells IFS
FLEXPART	Lagrangsches Partikelausbreitungsmodell; verwendet ECMWF Modelldaten
FCKW	F luor ch lor k ohlen w asser s toffe (engl. CFC)
GAW	G lobal A tmosphere W atch
GC-MS	G aschromatographie – M assenspektrometrie zur Messung von Spurengasen.
GWP-100	G lobal W arming P otential über 100 Jahre integriert
HFCKW	H ydro f luor ch lor k ohlen w asser s toffe (engl. HCFC)
HFKW	H ydro f luor k ohlen w asser s toffe (engl. HFC)
HFO	Hydrofluorolefin (ungesättigtes HFKW)
Halone	bromierte halogenierte Kohlenwasserstoffe
IPCC	I nternational P anel for C limate C hange
Kontamination	Lokale (unerwünschte) Verunreinigung an der Mess-Station oder im Messgerät. Siehe auch Verschmutzung
LPDM	L agrangian P article D ispersion M odel. Bezeichnet eine Klasse von Modellen, die neben advektivem auch turbulenten und (meist) konvektiven Transport simulieren.
Medusa	(plural: Medusae): Eine Luftprobenaufbereitungseinheit gekoppelt mit GC-MS, welche mehrheitlich die älteren GC-MS-ADS Messgeräte abgelöst hat.
NIES	N ational I nstitute of E nvironmental Sciences (Japan)
NILU	N orsk I nstitut for L uftorskning (Norwegian Institute for Air Research)
NOAA	N ational O ceanic and A tmospheric A dministration. Diese US-amerikanische Institution betreibt ein weltweites Messnetz ähnlich zu AGAGE, das auf kontinuierlichen aber vor allem auch Flaschenproben basiert.
NPL	N ational P hysical L aboratory (Englische Institution, welche Referenzgase bereitstellt).
ODS	O zone D epleting S ubstance
PFKW	P erfluorierte K ohlen w asser s toffe (engl. PFC)
ppb	p arts p er b illion. Anzahl Moleküle in 10^9 Molekülen (nmol mol^{-1}). Die atmosphärische Konzentration der Spurengase wird oft als trockene molare Anteile (dry air mole fraction) angegeben. Oft werden synonym zu Trockenmolfraktion die Begriffe Konzentration oder Mischungsverhältnis (mixing ratio) verwendet.
ppt	p arts p er t rillion. Sinngemäss zu ppb, aber 3 Grössenordnungen weniger (Anteil in 10^{-12} , pmol mol^{-1}).

ppq	p arts p er q uadrillion. Sinngemäss zu ppb, aber 6 Grössenordnungen weniger (Anteil in 10^{-15} , fmol mol^{-1}).
QPS	Q uarantine and P re S hipment. Eine Sonderregelung des Montrealer Protokolls für den ausnahmsweisen Einsatz von reglementierten Verbindungen
SIO	S cripps I nstitution of O ceanography. Ein Institut an der Universität von Kalifornien, in welchem die meisten instrumentellen Entwicklungen von AGAGE durchgeführt werden.
SNU	S eoul N ational U niversity
SOGE	S ystem for O bservations of G reenhouse G ases in E urope. Ein loses Netzwerk von 4 europäischen Station
SOGE-A	Erweiterung von SOGE auf Asien, insbesondere auf die chinesische Beobachtungsstation Shangdianzi
SPARC	S tratospheric P rocesses a nd their R ole in C limate. Eine internationale Initiative zur Erforschung der Stratosphäre
TFA	T rifluoroacetic a cid (Trifluoressigsäure)
TOF-MS	T ime- o f- F light M ass S pektrometer (Flugzeit-Massenspektrometer)
UNEP	U nited N ations E nvironment P rogramme
UNFCCC	U nited N ations F ramework C onvention on C limate C hange
Verschmutzung	oder Verschmutzungsereignis: Darunter wird hier die Heranführung von Luft an die Stationen verstanden, welche erhöhte Konzentrationen von Luftfremdstoffen mit sich bringt.
WMO	W orld M eteorological O rganization