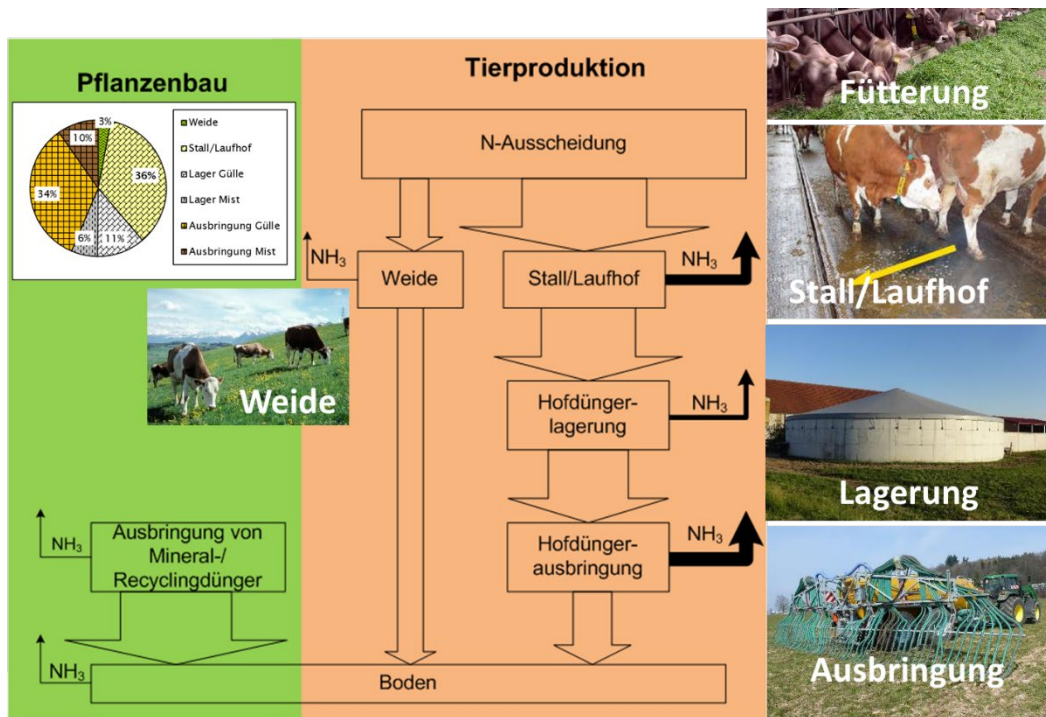


Einfluss der jährlichen Temperaturschwankungen auf die modellierten Ammoniakemissionen der Tierproduktion von 2002 bis 2019



23. November 2023

Im Auftrag des Bundesamts für Umwelt (BAFU)

Impressum

Auftraggeber: Bundesamt für Umwelt (BAFU), Abt. Abteilung Luftreinhaltung und Chemikalien, CH-3003 Bern

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

Auftragnehmer: Berner Fachhochschule, Hochschule für Agrar-, Forst- und Lebensmittelwissenschaften, 3052 Zollikofen

Autoren: Alex Valach, Christoph Häni, Thomas Kupper

Begleitung BAFU: Simone Hofstetter, Bundesamt für Umwelt (BAFU), Abt. Abteilung Luftreinhaltung und Chemikalien, CH-3003 Bern

Hinweis: Diese Studie/dieser Bericht wurde im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) verfasst. Für den Inhalt ist allein der Auftragnehmer verantwortlich.

Inhalt

<i>Zusammenfassung</i>	4
1. Ausgangslage und Zielsetzung	5
2. Datengrundlagen und Vorgehen	5
2.1 Datenquellen der Literaturrecherche	5
2.2 Temperaturanpassung der Emissionen	6
3. Resultate und Diskussion	7
3.1 Datengrundlage der Temperaturabhängigkeit von Ammoniakemissionen	7
3.2 Temperaturabweichungen und Einfluss der jährlichen Temperaturschwankungen auf die modellierten Ammoniakemissionen der Tierproduktion	7
3.3 Einbezug der jährlichen Temperaturschwankungen in das Emissionsinventar	10
4. Schlussfolgerungen	11
5. Referenzen	13
Anhang 1	15
Anhang 2	16

Zusammenfassung

Die mit dem Modell Agrammon modellierten Ammoniakemissionen des Schweizer Emissionsinventars der Jahre 2000 bis 2020 wurden mit einer mittleren Temperaturabhängigkeit von 6% pro °C aus Literaturdaten abgeleitet und anhand von 28 schweizweit verteilten Wetterstationen korrigiert. Die korrigierten Emissionen zeigten eine bessere Übereinstimmung der Langzeittendenz mit den beobachteten Konzentrationen. Die Abweichungen von den unkorrigierten zu den korrigierten Modellwerten lagen zwischen -4% bis +10% mit einer zunehmenden Tendenz wegen der stärkeren Erwärmung in den letzten Jahren. Das Ausmass aller zwischenjährlichen Schwankungen konnte jedoch nicht ausschliesslich durch die Temperaturkorrektur nachgebildet werden. V.a. die Korrektur während der starken Erwärmung der letzten Jahre konnte die höheren Konzentrationen nicht vollständig nachvollziehen. Zudem gab es regionale (je nach Kanton und Höhenlage) Unterschiede in den Temperaturabweichungen zum Referenzjahr (1990) und dem erwarteten Temperaturverlauf in verschiedenen Höhenlagen, was zu grösseren räumlichen Unterschieden und somit Unsicherheiten in den modellierten Emissionen wie auch den gemessenen Konzentrationen führen könnte.

Der Einfluss der Temperatur auf die Emissionen der verschiedenen Stufen wurde zeitlich nach Praxisbedingungen (z.B. Weide und Ausbringung nur von März bis November berücksichtigt) aufgeteilt, was bei Unstimmigkeiten der angenommenen Bedingungen die unterschiedlich abweichende Nachbildung des Emissionsverlaufs erklären könnte. Da die Datengrundlage in der Literatur zur Temperaturabhängigkeit der Ammoniakemissionen unter Praxisbedingungen eher gering ist, sollten Daten von zusätzlichen Messungen, welche die ganze Produktion einschliessen und Schweizer Praxisbedingungen darstellen, beigezogen werden, um die Abbildung der Temperaturabhängigkeit der Emissionen zu verbessern. Literaturdaten von den Stufen Laufhof und Weide fehlten gänzlich oder basierten auf Studien, die Systeme abbildeten, welche nicht in der Schweiz vorkommen (z.B. Feedlots). Ebenso fehlten Messungen von Festmistsystemen. Die Verbesserung der Datenlage ist eine Voraussetzung für zuverlässigere Emissionsrechnungen mittels Agrammon, insbesondere für einzelbetriebliche Anwendungen.

Mit den durch den Klimawandel zu erwartenden Anstieg der Lufttemperatur werden bestehende Ammoniakquellen erhöhte Emissionen verursachen, was den Bedarf an emissionsmindernden Massnahmen weiter verstärkt, um eine effektive Reduktion der Stickstoffeinträge in naturnahe Flächen zu erzielen. Diese sind regional unterschiedlich, wobei Gebiete mit stärkerer Erwärmung auch eine höhere Belastung zeigen. Zudem ergeben sich Synergien mit Klimaschutzmassnahmen, wobei auch die temperaturbedingten Erhöhungen der Ammoniakemissionen aufgrund der verhinderten Erwärmung ausbleiben würden.

Der Einbezug von Temperatur- oder anderer Umwelteinflüsse in die Emissionsberechnungen ist gemäss Richtlinien der EEA/EMEP nicht ausgeschlossen. Falls ein solcher Ansatz in ein Emissionsmodell implementiert würde, müsste die Wirkung von Reduktionsmassnahmen ohne die Temperaturabhängigkeit zusätzlich berechnet werden, da der Verlauf von Aktivitätsdaten und Produktionstechniken der Länder sowie deren Auswirkungen auf die Emissionen ein wichtiger Bestandteil des Inventars darstellt. Die aufgrund des Klimawandels zunehmenden Temperaturen implizieren, dass eine Anpassung wegen dem Temperatureinfluss entweder durch eine periodische Anpassung der Emissionsfaktoren oder eine Modell-basierte Temperaturkorrektur vorgenommen werden muss, damit das Inventar die tatsächlichen Emissionen möglichst genau abbildet.

1. Ausgangslage und Zielsetzung

Im Rahmen des Göteborg-Protokolls der UNECE Konvention über weiträumige grenzüberschreitende Luftverunreinigung ist die Schweiz verpflichtet, regelmässig über den aktuellen Stand der Ammoniakemissionen zu berichten. Die Berechnung der Emissionen erfolgt mit dem Modell Agrammon. Es handelt sich um ein Tier 3 Stofffluss Modell. Im Rahmen der Emissionsrechnungen für die Erstellung der Inventare ist dafür zu sorgen, dass die von den verschiedenen Ländern verwendeten Modelle hinsichtlich der verwendeten Parameter auf validen wissenschaftlichen Grundlagen sowie auf dem aktuellen Wissensstand basieren und konsistent sind. Die Berechnungen für das Inventar basieren auf konstanten Emissionsfaktoren, welche die durchschnittlichen meteorologischen Bedingungen widerspiegeln. Dies führt zu Diskrepanzen zwischen beobachteten Konzentrationen (Seitler, Meier & Ehrenmann, 2021) und den modellierten Emissionen in überdurchschnittlich warmen Jahren, v.a. bei Emissionen aus der Tierproduktion, welche 87% der Gesamtemissionen ausmachen. Wegen dem Klimawandel treten diese über die letzten 10 Jahre gehäuft auf, was den Emissionsverlauf nicht adäquat abbildet. Diese Abweichungen könnten die Glaubwürdigkeit des Emissionsinventars untergraben.

Um die Temperaturabweichungen und deren Auswirkungen auf die modellierten Emissionen zu ermitteln, wurde ein Korrekturfaktor (in Prozent pro Grad Celsius Differenz) anhand einer Literaturrecherche hergeleitet. Die Emissionen aus der Tierproduktion des nationalen Inventars wurden für die Jahre 2002 bis 2019 (2002, 2007, 2010, 2015, 2019) mit dieser Korrektur neu hochgerechnet, sowie Unterschiede nach Höhenlagen und die Änderungen der Emissionstrends pro Tierkategorie aufgezeigt.

2. Datengrundlagen und Vorgehen

2.1 Datenquellen der Literaturrecherche

Die Literaturrecherche zum Einfluss der Temperatur auf Ammoniakemissionen erfolgte mittels Suche mit Web of Science (Suchbegriffe ammonia and emission and temperature, sowie jeweils hous* or build* or outdoor or exercise yard or pasture or slurry or manure stor* or application). Die Suche ergab insgesamt 247 Treffer. Dabei wurden ausschliesslich Daten aus peer review Publikationen verwendet und weiter auf ihren Inhalt geprüft. Die resultierende Liste enthielt 10 Publikationen mit Temperaturabhängigkeiten der Emissionen von Hofdüngern auf den verschiedenen Emissionsstufen (Tabelle 1). Daraus wurde ein Mittelwert von 6% Zunahme der Ammoniakemissionen pro 1 °C Temperaturzunahme für alle Stufen abgeleitet. Für die Weide wurde mangels Datengrundlage eine Studie zu feedlots beigezogen (Baek et al., 2006), da dieses System bezüglich Umweltbedingungen der Weide am ähnlichsten ist. Mehrere Studien (Kupper et al., 2020; Sommer et al., 2022) fassten Daten von weiteren Untersuchungen (120 respektive 44 Studien) aus Messungen im Praxis- oder Labormassstab mit kontrollierten Temperaturbedingungen zusammen. Hafner et al. (2018) bezog sich auf die gesamten ALFAM2 Datensätze, die in Kombination mit den direkten Messungen eine adäquate Grundlage für die anderen Emissionsstufen bildeten.

Daten zu Temperaturabhängigkeiten auf den Stufen Laufhof und Lagerung von Mist lagen nicht vor. Hier wurde ebenfalls der Mittelwert von 6% Zunahme der Ammoniakemissionen pro 1 °C Temperaturzunahme angewendet.

Tabelle 1. Datengrundlage zur Herleitung der Temperaturabhängigkeit (% / °C) von Ammoniakemissionen aus der vorliegenden Literatur nach Emissionsstufe aufgeteilt.

Emissionsstufe	Quelle	Wert
<i>Stall</i>	Hempel et al. (2016)	2% / °C 2 – 6% / °C je nach Tageszeit
	Saha et al. (2014)	2% / °C
	Schrade et al. (2012)	8% / °C
	Pereira et al. (2012)	3% / °C
<i>Laufhof</i>	NA	NA
<i>Weide</i>	Baek et al. (2006)	8% / °C
<i>Lagerung - flüssig</i>	Sommer et al. (2022)	~12% / °C (Fig. 6)
	Kupper et al. (2020)	2 – 6% / °C
<i>Lagerung - fest</i>	NA	NA
<i>Ausbringung - flüssig</i>	Hafner et al. (2018)	2 – 7% / °C
	Häni et al. (2016)	4% / °C
<i>Ausbringung - fest</i>	Niraula et al. (2018)	7 – 9% / °C

NA: Keine Daten vorhanden.

2.2 Temperaturanpassung der Emissionen

Die jährlichen Ammoniakemissionen wurden mit dem Modell Agrammon (Version 6.3.0) berechnet, welches eine jährliche Durchschnittstemperatur verwendet. Für die Temperaturanpassung der Emissionen wurden die jährlichen Abweichungen des Mittelwerts der Jahre 2000-2020 gegenüber dem Referenzjahr 1990 ermittelt. Hierzu wurden Temperaturdaten von 28 Wetterstationen des Netzwerks der MeteoSchweiz beigezogen, die Daten seit 1990 aufzeichnen und repräsentative Verhältnisse in der Schweiz darstellen. Monatliche Mittelwerte wurden zur Korrektur der saisonalen Emissionen (Stufen Weide und Ausbringung) eingesetzt.

Die Korrektur der Emissionen aufgrund der Temperaturabhängigkeit erfolgte über eine Gewichtung des Mittelwerts (6% / °C). Der Temperatureinfluss auf die Emissionsquellen wurde je nach Stufe für unterschiedliche Zeiträume berechnet (Eq. 1 und 2). Die Emissionsdifferenzen (ΔE_{NH_3}) zu den bisherigen Emissionen (E_{NH_3}) wurden für die Stufen Stall, Laufhof und Lager (fest und flüssig) mit Temperaturabweichungen der Jahresmittelwerte (ΔT_{Jahr}) wie folgt berechnet:

$$\Delta E_{NH_3} = E_{NH_3} * 0.06 * \Delta T_{Jahr} \quad \text{Eq. 1}$$

Die saisonabhängigen Emissionen der Stufen Weide und Ausbringung (fest und flüssig) wurden mit der Temperaturabhängigkeit wie oben, aber nur während den Monaten März bis November (d.h. während der Vegetationszeit) korrigiert:

$$\Delta E_{NH_3} = E_{NH_3} * 0.06 * \Delta T_{Mär-Nov} \quad \text{Eq. 2}$$

Die Summen aller Emissionsstufen bildeten die Jahresemissionen.

3. Resultate und Diskussion

3.1 Datengrundlage der Temperaturabhängigkeit von Ammoniakemissionen

Die prozentuale Veränderung der Emissionen von aus der Tierhaltung und von Hofdüngern pro Grad Celsius ($\% / ^\circ\text{C}$) Temperaturzunahme der beigezogenen Publikationen ergab je nach Emissionsquelle und Tageszeit 2–12% / $^\circ\text{C}$ mit einem Gesamtdurchschnitt von 6% / $^\circ\text{C}$ für alle Kategorien. Die Daten stammen auf den Stufen Stall und Weide von Rindvieh. Für die Stufe Stall lagen ausschliesslich Daten aus Emissionsmessungen von Laufställen und hauptsächlich Milchkühen vor. Bei Lagerung und Ausbringung von Hofdüngern stammen die Daten von Rindvieh- oder Schweinegülle. Andere Tierkategorien liessen sich nicht einschliessen. Die Methoden der Messdaten umfassten Laborinkubationen, Kammerrmessungen, Massenaustausch (basierend auf Konzentration und Luftaustauschrate), Tracer-Ratio-Methoden, sowie mikrometeorologische Methoden und Ausbreitungsmodellierung.

3.2 Temperaturabweichungen und Einfluss der jährlichen Temperaturschwankungen auf die modellierten Ammoniakemissionen der Tierproduktion

Die Jahresmittelwerte der Temperaturen basierten auf Medianen und wurden für das ganze Jahr (Stufen Stall/Laufhof, Lagerung) sowie für die saisonal anfallenden Emissionen (Weide, Ausbringung) für die Monate von März bis November für alle Standorte berechnet (Abbildung 1). Die Abweichungen zum Referenzjahr lagen im Bereich von -1 bis +2 $^\circ\text{C}$ mit steigender Tendenz aufgrund des Klimawandels. Wegen der ungleichmässigen Verteilung der Temperaturabweichungen innerhalb des Jahres unterscheiden sich die Verläufe der Temperaturmittelwerte des ganzen Jahres gegenüber den Mittelwerten von März bis November. In Jahren mit tiefen Temperaturen im Winter (z.B. 2003, 2005, 2009, 2010), waren die Jahresmittel niedriger als die März bis November Mittelwerte. Die generellen Tendenzen stimmen jedoch überein.

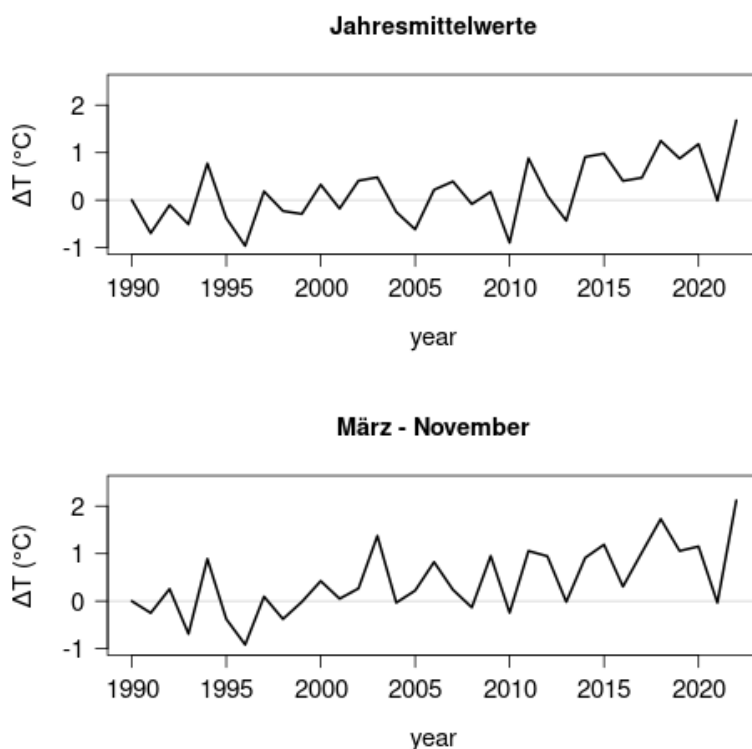


Abbildung 1. Temperaturabweichungen der Jahres- (oben) oder Saisonmittelwerte (Mär-Nov, unten) von 1990 bis 2022 gegenüber dem Referenzjahr 1990 in $^\circ\text{C}$ angegeben.

Die vorliegenden Emissionen aus dem Inventar für die Jahre 2002, 2007, 2010, 2015 und 2019 wurden mit der Temperaturabweichung korrigiert, wobei die Emissionen der Zwischenjahre für den Langzeitverlauf linear interpoliert und nach der entsprechenden Temperaturabweichung angepasst wurden (Abbildung 2). Die korrigierten Jahreswerte wichen von den unkorrigierten Emissionswerten zwischen -4% und +10% mit überwiegend höheren Emissionen ab. Nur in Jahren mit negativen (kühleren) Temperaturabweichungen (z.B. 2005, 2010, 2013) waren die Emissionen gleich oder wenig niedriger (Differenz <4%) als die unkorrigierten Emissionen. Ansonsten waren die meisten korrigierten Emissionen wegen den steigenden Temperaturen höher (<10% Zunahme) als die unkorrigierten.

Der unkorrigierte Verlauf zeigte einen leichten Rückgang der Emissionen zwischen 2000 und 2020 von rund 8% (Kupper et al., 2022) der durch die Temperaturkorrektur auf ca. 4% reduziert wurde und hauptsächlich vor 2010 stattfand. Somit blieb der Verlauf nach 2010 eher eben, wobei die zwischenjährlichen Schwankungen auf die grösseren positiven (wärmeren) Temperaturabweichungen der letzten Jahre folgten.

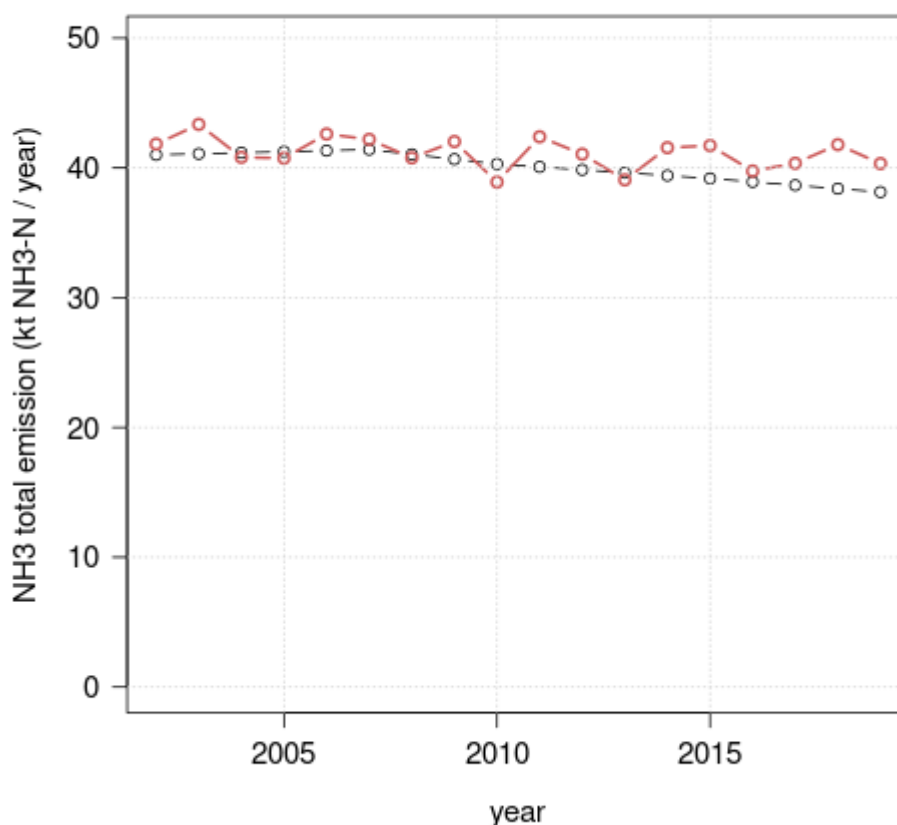


Abbildung 2. Verlauf der unkorrigierten (schwarz) und nach Temperatur korrigierten (rot) Gesamtemissionen der Tierproduktion in der Schweiz (in Kilotonnen Ammoniakstickstoff, NH₃-N, pro Jahr) von 2002 bis 2019.

Da die Emissionsstufen Weide und Ausbringung zusammen etwa die Hälfte der Emissionen aus der Tierproduktion ausmachen, war der Einfluss der Jahres- und Saisonmittelwerte vergleichbar. Dies bedeutet, dass die Gesamtemissionen durch einen warmen Winter in gleichem Masse beeinflusst werden könnten wie durch eine warme Vegetationszeit, wenn der Rest des Jahres durchschnittliche Temperaturen aufweist. Deswegen waren die Emissionen im Jahr 2003 deutlich höher, obschon die Abweichung vom Jahresmittelwert eher gering (<1 °C) war. Die Datengrundlage für die Stufen Laufhof und Weide war mangelhaft (nur eine

Studie von feedlots berichtete über den Zusammenhang mit der Temperatur), weshalb eine durchschnittliche Temperaturabhängigkeit eingesetzt wurde. Dies könnte zu grösseren Unsicherheiten bei der Korrektur dieser Stufen führen. In Fällen, in denen die Temperaturabweichungen in allen Jahreszeiten höher waren (z.B., 2011, 2014, 2015, 2018), nahmen die korrigierten Emissionen stärker (ca. +10%) zu. Diese Schwankungen waren in den Emissionen aller Tierkategorien sichtbar (Anhang 1).

Im Vergleich zu den mit Passivsammlern gemessenen Jahresmittelkonzentrationen der 13 bzw. 21 Standorte des Messnetzwerks (Seitler et al., 2021), von denen 10 bzw. 16 Standorte als ländlich eingestuft und daher hauptsächlich von landwirtschaftlichen Quellen bestimmt werden, folgten die durch die Temperaturkorrektur entstandenen Emissionsschwankungen dem relativen Verlauf der Konzentrationen besser als die unkorrigierten Emissionen (Abbildung 2 und Abbildung 3). Der Temperatureinfluss auf die Emissionserhöhungen in den Jahren 2003, 2011, 2015 und 2018 waren in beiden Verläufen deutlich zu erkennen. Jedoch war der relative Beitrag der Abweichung (in Abbildung 3 auf 2005 normiert) im Jahr 2018 im Vergleich zu 2003 bei den korrigierten Emissionen kleiner (7% im Vergleich zu 3.5%) als in den beobachteten Konzentrationen (20% vgl. zu 30%). Im Jahr 2003 war insbesondere die Vegetationszeit wärmer als der Jahresdurchschnitt. Somit wäre es möglich, dass die Temperaturkorrektur der Weide- und Ausbringungsemissionen zu stark, dagegen die Korrektur anhand des Jahresmittelwerts zu wenig gewichtet wurde. Allerdings würde eine stärkere Gewichtung der Jahresmitteltemperatur nicht zu der grösseren Abweichung der beobachteten Konzentrationen von 2018 führen. Da viele Faktoren und Prozesse (z.B. Verteilung in der Atmosphäre, Deposition auf Oberflächen, Bildung und Sorption von Ammonium an Aerosolen, grossräumige Verfrachtung der Luftmassen, usw. wie von Kupper et al. (2022) beschrieben) den Einfluss von Emissionen auf die vorliegenden Konzentrationen in der Atmosphäre bestimmen, sind Konzentrationsdaten nicht ausreichend, um Abweichungen der modellierten Emissionen abschliessend erklären zu können.

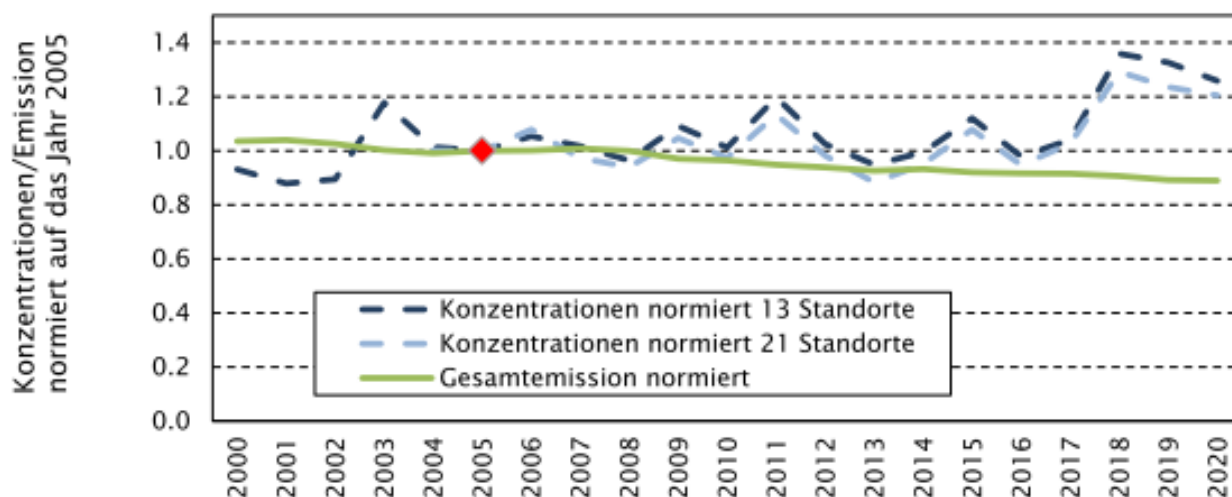


Abbildung 3. Entwicklung der Ammoniakkonzentrationen in der Schweiz zwischen 2000 und 2020 im Vergleich zu den modellierten Emissionen. Für den Vergleich sind alle Werte auf das Bezugsjahr 2005 (roter Rhombus) normiert. Abbildung von Kupper et al. (2022).

Auf regionaler Ebene wiesen Temperaturabweichungen generell eine grössere Wirkung auf, da verschiedene geografische Lagen und Höhenstufen stärkeren Schwankungen ausgesetzt sind. Dies zeigte sich am Beispiel der unterschiedlichen Abweichung der Höhenstufen (Abbildung 4). Grundsätzlich ist ein Temperaturgradient von ca. $0.6\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ Höhendifferenz zu erwarten, jedoch können starke regionale Unterschiede wegen der Topografie, Bodenbedeckung und -nutzung die lokale Temperatur beeinflussen. Beispielsweise zeigten die Gebiete

im Wallis und Tessin aufgrund ihrer Lage in den wärmeren Südalpen höhere Temperaturabweichungen, als in dieser Höhenstufe zu erwarten wäre. Diese Gebiete werden zunehmend von einem Anstieg der temperaturbedingten Emissionen betroffen sein. Hingegen werden andere Gebiete, z.B. Graubünden, welche lokal unterschiedlich höhere und tiefere Temperaturen aufweisen, sich auf regionaler Ebene ausgleichen.

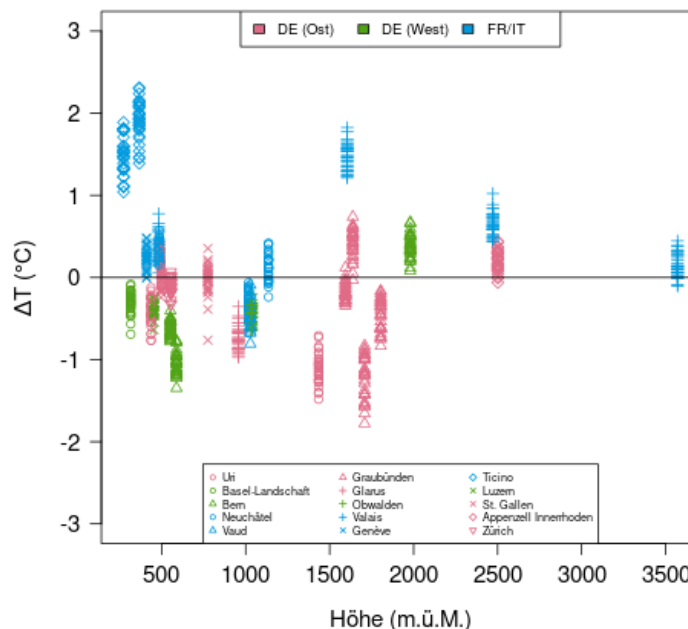


Abbildung 4. Die Abweichungen gegenüber den zu erwartenden Temperaturen in den entsprechenden Höhenlagen aufgeteilt nach Kanton und Sprachregionen (Symbole x Farbe).

Auch Ge et al. (2023), die Ammoniakemissionen von Inventarberechnungen mit bodennahen oder Satellitenmessungen verglichen haben, fanden eine bessere Übereinstimmung der Emissionen mit den beobachteten Jahresschwankungen in der Grössenordnung von 10% nach einer Temperaturkorrektur, wobei auch die höheren Temperaturen von 2018 einen grösseren Einfluss auf die Emissionen hatten als nachgebildet werden konnte. Die im Modell Agrammon verwendete konstante Jahresmitteltemperatur führt zu einer zunehmend grösseren Temperaturkorrektur wegen den höheren Abweichungen aufgrund des Klimawandels. Um die tatsächlichen Ammoniakbelastung zu modellieren und die Wirksamkeit von emissionsmindernden Massnahmen zu überprüfen, wird eine solche Korrektur zukünftig von grösserer Bedeutung sein. Skjøth und Geels (2013) modellierten die klimawandelbedingte Erhöhung der Ammoniakemissionen in Europa in den nächsten 40 und 80 Jahren und fanden eine mittlere Zunahme von 20% und bis zu 40%.

3.3 Einbezug der jährlichen Temperaturschwankungen in das Emissionsinventar

Die Berichterstattung der Emissionen gemäss EEA/EMEP Richtlinien (EEA, 2023) basiert auf nationalen Emissionsfaktoren und Aktivitätsdaten. Verbesserungen der Berechnungsmethodik sollen wenn möglich umgesetzt und allfällige Änderungen müssen rückwirkend auf die gesamte Zeitreihe angewandt und daraus resultierende Differenzen begründet werden. Ein Vorteil der Einbeziehung der Temperaturabhängigkeit wäre die grössere Übereinstimmung der modellierten Daten mit Immissionsmesswerten, welche die Glaubwürdigkeit des Inventars und des Berechnungsansatzes verstärkt. Dies würde auch dazu beitragen, die scheinbar geringeren Auswirkungen von Reduktionsmassnahmen aufgrund des Temperaturanstiegs in

Messdaten (z.B. Immissionsmessdaten) zu erklären. Hingegen wäre es möglich, dass weniger wirksame Reduktionsmassnahmen aufgrund einer günstigen Temperaturlage (z.B. in einem kalten Jahr) einen überhöhten Effekt aufweisen. Generell wirkt sich der Temperatureinfluss kumulativ auf die wegen der Produktionstechnik bestehende Variabilität der Emissionen aus, so dass der Einfluss von Veränderungen aufgrund der Produktionstechnik auf die Zeitreihe der Emission mit Einbeziehung der Temperaturabhängigkeit weniger ersichtlich werden als ohne.

Eine Änderung der Methodik müsste transparent umgesetzt und begründet werden, was eine zusätzliche Analyse der Differenzen erfordern würde, wie die Beispiele in diesem Bericht gezeigt haben, insbesondere der erwarteten Auswirkungen auf den Langzeittrend der Emissionen (Kap. 3.2). Bei steigenden Durchschnittstemperaturen wäre der temperaturbedingte Anstieg der Emissionen weiterhin zu erwarten.

Der Einbezug von Temperatur- oder anderer Umwelteinflüsse in die Emissionsberechnungen wird in den Richtlinien der EEA/EMEP (EEA, 2023) weder ausdrücklich erwähnt noch ausgeschlossen (Anhang 2). Klimawirkungen sind prinzipiell in den Emissionsfaktoren enthalten. Gemäss EEA (2023) werden Berechnungsmethoden bevorzugt, die den Effekt von Minderungsmaßnahmen aufzeigen. Da die Berichterstattung von Luftschadstoffen im Rahmen von Emissionsinventaren u.a. auf rapportierten Aktivitätsdaten basiert, ist der Emissionsverlauf, welcher durch Änderungen von Produktionstechniken der Länder verursacht werden, ein wichtiger Bestandteil. Mit Einbezug einer Temperaturabhängigkeit der Emissionen besteht ein Risiko, dass die individuelle Wirkung von Reduktionsmassnahmen weniger gut sichtbar ist, und müsste daher zusätzlich berechnet werden. Die aufgrund des Klimawandels zunehmenden Temperaturen implizieren, dass Emissionsfaktoren periodisch neu festgelegt werden müssen. Dies sollte idealerweise aufgrund von experimentell bestimmten Daten erfolgen, welche die Emissionen im Rahmen der jeweils vorliegenden Temperaturen widerspiegeln. Falls ein solches Vorgehen nicht umsetzbar ist, was aufgrund des Aufwands zur Generierung von Messdaten zumindest teilweise der Fall sein dürfte, müsste alternativ eine Modell-basierte Korrektur der Emissionsfaktoren erfolgen, da die modellierten Emissionen ohne eine solche Korrektur zunehmend von den tatsächlichen Emissionen abweichen werden.

4. Schlussfolgerungen

Eine Korrektur der berechneten Ammoniakemissionen für die Jahre 2002 bis 2019 mit dem Modell Agrammon anhand einer mittleren Temperaturabhängigkeit basierend auf Literaturdaten (bestehend aus Labor- und Praxisstudien, die teilweise nicht die Praxisbedingungen in der Schweiz widerspiegeln) konnte den relativen Verlauf der zwischenjährlichen Schwankungen der beobachteten Ammoniakkonzentrationen abbilden, wobei Unterschiede während des Hitzejahres 2018 sowie auf regionaler Ebene (Kanton und Höhenlagen) gezeigt wurden. Der Einfluss der Temperaturkorrektur auf die unkorrigierten Emissionen lag zwischen -4% und +10% mit einer systematisch zunehmenden Erhöhung und somit Änderung der Langzeitentendenz wegen der klimawandelbedingten Erwärmung, insbesondere in den letzten 10 Jahren. Um den Temperatureinfluss besser abbilden zu können, sollte die Datenlage mit weiteren Messungen verbessert werden. Emissionsstufen, welche am stärksten zu den Gesamtemissionen beitragen, oder für die Messdaten fehlen (Stall, Laufhof, Weide und Ausbringung), sollten priorisiert werden. Dabei sind Messkonzepte zu bevorzugen, welche die Emissionen unter Praxisbedingungen erfassen können.

Die durch den Klimawandel verursachten Temperaturveränderungen des Jahresdurchschnitts sowie die grösseren Schwankungen zwischen den Jahreszeiten werden voraussichtlich einen zunehmenden Einfluss auf Ammoniakemissionen in Europa und demzufolge auch auf die Emissionen in der Schweiz haben (Skjøth, Geels, 2013). Dies könnte dazu führen, dass

zusätzliche emissionsmindernde Massnahmen erforderlich sein werden, um der temperaturbedingten Emissionserhöhung entgegenzuwirken und eine Reduktion der effektiven Ammoniakbelastung zu erreichen. Vor allem Gebiete, die einer stärkeren Erwärmung ausgesetzt sind, werden vom Temperatureinfluss mehr betroffen sein. Durch diesen Temperatureinfluss ergibt sich eine Synergie, bei der Klimaschutzmassnahmen durch einen vermiedenen Temperaturanstieg auch zusätzlich zur Reduktion von Ammoniakemissionen beitragen würden.

Der Einbezug von Temperatur- oder anderer Umwelteinflüsse in die Emissionsberechnungen ist gemäss Richtlinien der EEA/EMEP (EEA, 2023) grundsätzlich möglich. Falls ein solcher Ansatz in ein Emissionsmodell implementiert würde, müsste die Wirkung von Reduktionsmassnahmen ohne die Temperaturabhängigkeit zusätzlich berechnet werden, da der Verlauf der Aktivitätsdaten und der Produktionstechniken der Länder ein wichtiger Bestandteil des Inventars darstellt. Die aufgrund des Klimawandels zunehmenden Temperaturen implizieren, dass Emissionsfaktoren periodisch angepasst werden müssen oder eine Modell-basierte Temperaturkorrektur nötig wäre, damit das Inventar die tatsächlichen Emissionen möglichst genau abbildet.

5. Referenzen

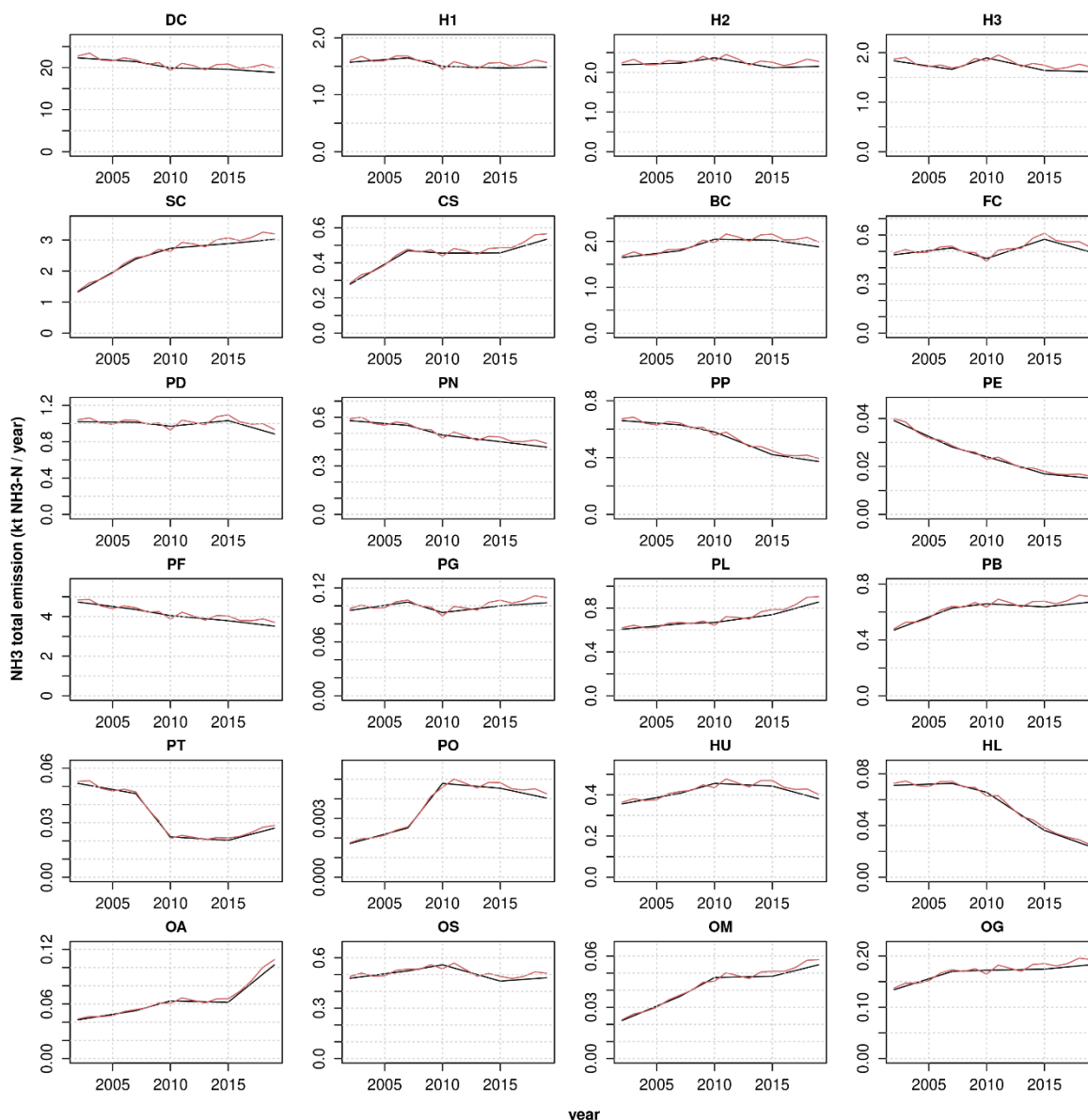
- Baek, B. H., Todd, R., Cole, N. A., Koziel, J. A. (2006). Ammonia and hydrogen sulphide flux and dry deposition velocity estimates using vertical gradient method at a commercial beef cattle feedlot. *International Journal of Global Environmental Issues*, 6(2/3), 189. <https://doi.org/10.1504/IJGENVI.2006.010154>
- EEA (2023). EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2023.
- Ge, X., Schaap, M., Dammers, E., Shephard, M., Vries, W. de. (2023). Impact of interannual weather variation on ammonia emissions and concentrations in Germany. *Agricultural and Forest Meteorology*, 334, 109432. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2023.109432>
- Hafner, S. D., Pacholski, A., Bittman, S., Burchill, W., Bussink, W., Chantigny, M. et al. (2018). The ALFAM2 database on ammonia emission from field-applied manure: Description and illustrative analysis. *Agricultural and Forest Meteorology*, 258, 66–79. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.11.027>
- Häni, C., Sintermann, J., Kupper, T., Jocher, M., Neftel, A. (2016). Ammonia emission after slurry application to grassland in Switzerland. *Atmospheric Environment*, 125, 92–99. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.10.069>
- Hempel, S., Saha, C. K., Fiedler, M., Berg, W., Hansen, C., Amon, B. et al. (2016). Non-linear temperature dependency of ammonia and methane emissions from a naturally ventilated dairy barn. *Biosystems Engineering*, 145, 10–21. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2016.02.006>
- Kupper, T., Häni, C., Bretscher, D., Zaucker, F. (2022). Ammoniakemissionen der schweizerischen Landwirtschaft 1990 bis 2020. Verfügbar unter: https://agrammon.ch/assets/Documents/Bericht_Agrammon_1990-2020_-20220331.pdf
- Kupper, T., Häni, C., Neftel, A., Kincaid, C., Bühler, M., Amon, B. et al. (2020). Ammonia and greenhouse gas emissions from slurry storage - A review. *Agriculture Ecosystems, Environment*, 300, 106963. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2020.106963>
- Niraula, S., Rahman, S., Chatterjee, A. (2018). Temperature response of ammonia and greenhouse gas emission from manure amended silty clay soil. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B — Soil, Plant Science*, 68(8), 663–677. <https://doi.org/10.1080/09064710.2018.1459822>
- Pereira, J., Misselbrook, T. H., Chadwick, D. R., Coutinho, J., Trindade, H. (2012). Effects of temperature and dairy cattle excreta characteristics on potential ammonia and greenhouse gas emissions from housing: A laboratory study. *Biosystems Engineering*, 112(2), 138–150. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2012.03.011>
- Saha, C. K., Ammon, C., Berg, W., Fiedler, M., Loebstin, C., Sanftleben, P. et al. (2014). Seasonal and diel variations of ammonia and methane emissions from a naturally ventilated dairy building and the associated factors influencing emissions. *Science of the Total Environment*, 468-469, 53–62. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.08.015>
- Schrade, S., Zeyer, K., Gygax, L., Emmenegger, L., Hartung, E., Keck, M. (2012). Ammonia emissions and emission factors of naturally ventilated dairy housing with solid floors and an outdoor exercise area in Switzerland. *Atmospheric Environment*, 47, 183–194. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.11.015>
- Seitler, E., Meier, M., Ehrenmann, Z. (2021). Atmosphärische Stickstoff-Deposition in der Schweiz 2000 bis 2019. Rapperswil: FUB - Forschungsstelle für Umweltbeobachtung.

Skjøth, C. A., Geels, C. (2013). The effect of climate and climate change on ammonia emissions in Europe. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 13(1), 117–128. <https://doi.org/10.5194/acp-13-117-2013>

Sommer, S. G., Hafner, S. D., Laubach, J., van der Weerden, T. J., Leytem, A. B., Pacholski, A. (2022). Model for calculating ammonia emission from stored animal liquid manure. *Biosystems Engineering*, 223, 41–55. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2022.08.007>

Anhang 1

Unkorrigierte und nach Temperatur korrigierte Emissionsverläufe aller Tierkategorien



Anhang 1. Unkorrigierte (schwarz) und nach Temperatur korrigierte (rot) Verläufe der Ammoniakemissionen (in Kilotonnen Ammoniakstickstoff pro Jahr) für alle Tierkategorien (DC = Milchkühe, H1-3 = Aufzuchttrinder unter 1 bis über 2-jährig, SC = Mutterkühe, CS = Mutterkuhkälber, BC = Masttiere, FC = Mastkälber, PD = Galtsauen, PN = säugende Sauen, PP = abgesetzte Ferkel, PE = Zuchtschweine, PF = Mastschweine, PG = Junghennen, PL = Legehennen, PB = Mastpoulets, PT = Masttruten, PO = übriges Geflügel, HU = Pferde über 3-jährig, HL = Pferde unter 3-jährig, OA = Ponys/Kleinpferde/Esel/Maultiere, OS = Schafe, OM = Milschschafe, OG = Ziegen).

Anhang 2

EEA (2023), Dokument Time consistency

Kap. 1.1.1, Seite 4

‘The previously used method is insufficient to reflect mitigation activities in a transparent manner. As techniques and technologies for reducing emissions are introduced, inventory compilers should use methods that can account for the resulting changes in emissions in a transparent manner.’

Unsere Interpretation: Änderungen der Emissionen aufgrund von Techniken zur Emissionsminderung müssen transparent ausgewiesen werden.

Kap. 1.1.3, Seite 6,7

‘Emission inventories can track changes in emissions through changing activity levels or changing emission rates, or both.’

Unsere Interpretation: Eine Änderung der Emissionsfaktoren kann eine Korrektur aufgrund eines Temperatureinflusses beinhalten bzw. eine solche wird nicht explizit ausgeschlossen.

‘As a general assumption, emission factors or other estimation parameters do not change over time unless otherwise indicated, so countries should clearly document the reason for using different factors or parameters in the time series.’

Unsere Interpretation: Emissionsfaktoren sollten über die Zeitreihe grundsätzlich nicht verändert werden, es sei denn, dass eine Änderung angezeigt ist und begründet werden kann. Eine Änderung liesse sich aufgrund des Temperatureinflusses rechtfertigen und wird hier nicht explizit ausgeschlossen, müsste jedoch klar dokumentiert werden.

‘Changes in abatement of emissions: Therefore the methods to estimate emissions should be reviewed regularly to ensure that they correspond to the actual generation of emissions for both current and past years. In these cases it is good practice to document the reasons for the changes in the inventory report.’

Unsere Interpretation: Methoden zur Schätzung der Emissionen sollten geeignet sein, die über die Zeitreihe effektiv produzierten Emissionen abzubilden. Dies würde eine Änderung der Emissionsfaktoren mit Berücksichtigung eines Temperatureinflusses einschliessen. Die Methode müsste dokumentiert werden.