



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössische Kommission für Lufthygiene EKL
Commission fédérale de l'hygiène de l'air CFHA
Commissione federale per l'igiene dell'aria CFIAR
Cumissiun federala per l'igièna da l'aria CFIA

Luftqualität 2020

Stickstoffhaltige Luftschadstoffe in der Schweiz

Situation mit Bezug zur Landwirtschaft im Zeitraum 2000–2018



Impressum

Herausgeber

Eidgenössische Kommission für Lufthygiene (EKL)

Die Eidgenössische Kommission für Lufthygiene EKL ist eine vom Bundesrat eingesetzte ausserparlamentarische Fachkommission mit Experten auf dem Gebiet der Luftreinhaltung. Sie berät das Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK) und das Bundesamt für Umwelt (BAFU) in wissenschaftlichen und methodischen Fragen der Luftreinhaltung und bei der Beurteilung, welche Auswirkungen die Luftverschmutzung auf die Gesundheit der Menschen und die Natur hat. Funktionell ist die EKL eine selbstständige und interdisziplinäre Verwaltungskommission, welche zur Behandlung von einzelnen Fragen auch weitere, der Kommission nicht angehörende Fachleute aus verschiedenen Bereichen zur Beratung beiziehen kann.

Mitglieder der Kommission

Nino Künzli, Präsident; Beat Achermann; Christof Ammann; Urs Baltensperger; Brigitte Buchmann; Luca Colombo; Alexandre Flückiger; Hans Gygax; Pierre Kunz; Meltem Kutlar Joss; Linda Kren; Barbara Rothen-Rutishauser; Eva Schüpbach; Andrea von Känel

Autor

Eidgenössische Kommission für Lufthygiene (EKL)

Zitierung

Eidgenössische Kommission für Lufthygiene (EKL) 2020: Stickstoffhaltige Luftschadstoffe in der Schweiz. Situation mit Bezug zur Landwirtschaft im Zeitraum 2000–2018. Bern. 23 S.

Sekretariat EKL

Brigitte Gälli Purghart, Abteilung Luftreinhaltung und Chemikalien,
Bundesamt für Umwelt (BAFU)

Titelbild

© iStockphoto / Magic Dreamer: Landschaft am Tor zum Emmental

PDF-Download

www.ekl.admin.ch/de/dokumentation/publikationen/ (eine gedruckte Fassung liegt nicht vor)

Diese Publikation ist auch in französischer Sprache erhältlich.

© EKL 2020

Inhaltsverzeichnis

Abstracts	4
Vorwort	6
Zusammenfassung	7
1 Einleitung	8
2 Emissionen von Ammoniak und von Stickoxiden von 2000 bis 2018	9
2.1 Emissionen auf nationaler Ebene	9
2.2 Ammoniak-Emissionen der Landwirtschaft im internationalen Vergleich	10
3 Messungen von stickstoffhaltigen Luftschadstoffen und Auswirkungen	11
3.1 Ammoniak- und Stickoxid-Konzentrationen in der Schweiz von 2000 bis 2018	11
3.2 Übermässige Stickstoff-Belastung von naturnahen Ökosystemen	12
3.3 Bildung von Feinstaub (PM) mit Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit	14
3.4 N-Einträge in naturnahe Ökosysteme führen zu Emissionen von Treibhausgasen	15
4 Handlungsbedarf zur Minderung der Emissionen	16
4.1 Ammoniak bezogen auf die Umweltziele Landwirtschaft (UZL) des Bundesrats	16
4.2 Stickoxide bezogen auf das Luftreinhaltekonzept des Bundesrats	16
4.3 Synergien bei Massnahmen zur Minderung der Ammoniak-Emissionen und zur Minderung der Emissionen von Treibhausgasen wie Methan und Lachgas	16
5 Schlussfolgerungen	18
Literaturverzeichnis	20

Abstracts

The high levels of nitrogen-containing air pollutants in Switzerland have harmful effects on (semi-) natural ecosystems. While exhaust emissions of nitrogen oxides have been reduced by one third relative to the year 2000, ammonia emissions from agriculture are stagnating at too high a level. A substantial reduction of agricultural ammonia emissions is necessary and possible. The Swiss agricultural policy AP22+ must implement appropriate measures, taking advantage of greenhouse gas reductions that occur while reducing ammonia emissions.

Key words:

Nitrogen deposition, ammonia, greenhouse gases, agriculture, agricultural policy, eutrophication, semi-natural ecosystems, biodiversity

Die Belastung durch stickstoffhaltige Luftschadstoffe in der Schweiz ist nach wie vor zu hoch und beeinträchtigt naturnahe Ökosysteme. Zwar hat der Stickoxid-Ausstoss aus Abgasen und Verbrennungsprozessen seit dem Jahr 2000 um rund ein Drittel abgenommen, die Ammoniak-Emissionen aus der Landwirtschaft stagnieren jedoch auf zu hohem Niveau. Weitere Massnahmen zur Verminderung der landwirtschaftlichen Ammoniak-Emissionen sind nötig und möglich. Mit der Agrarpolitik AP22+ sind diese konsequent umzusetzen. Dabei bestehen auch Synergien zur Reduktion von klimarelevanten Treibhausgasen.

Stichwörter:

Stickstoffeinträge, Ammoniak, Treibhausgase, Landwirtschaft, Agrarpolitik, Überdüngung, naturnahe Ökosysteme, Biodiversität

La charge en polluants atmosphériques azotés reste trop élevée et affecte les écosystèmes proches de l'état naturel. Alors que les rejets d'oxydes d'azote provenant des gaz d'échappement et des processus de combustion ont diminué d'environ un tiers depuis 2000, les émissions d'ammoniac issues de l'agriculture stagnent à un niveau trop élevé. Des mesures supplémentaires visant à réduire les émissions d'ammoniac d'origine agricole sont nécessaires et possibles. Elles devront être mises en œuvre de manière cohérente dans le cadre de la Politique agricole PA22+. Des synergies existent par ailleurs avec des mesures visant à réduire les gaz à effet de serre.

Mots-clés:

Dépôts d'azote, ammoniac, gaz à effet de serre, agriculture, politique agricole, surfertilisation, écosystèmes proches de l'état naturel, biodiversité

L'esposizione agli inquinanti atmosferici contenenti azoto in Svizzera è ancora troppo elevata e colpisce gli ecosistemi seminaturali. Sebbene le emissioni di ossido di azoto dai gas di scarico e dai processi di combustione siano diminuite di circa un terzo dal 2000, le emissioni di ammoniaca provenienti dall'agricoltura ristagnano a livelli troppo elevati. Sono necessarie e possibili ulteriori misure per ridurre le emissioni di ammoniaca in agricoltura. La politica agricola PA22+ è stata concepita per attuarle in modo coerente. Esistono anche sinergie per la riduzione dei gas serra rilevanti per il clima.

Parole chiave:

azoto in ingresso, ammoniaca, gas a effetto serra, agricoltura, politica agricola, eutrofizzazione, ecosistemi quasi naturali, biodiversità

Vorwort

Die übermässige Belastung naturnaher Ökosysteme durch atmosphärische Stickstoff-Einträge ist seit längerem ein Thema, nicht nur in der Schweiz, sondern in ganz Europa. Hauptverursacher von stickstoffhaltigen Luftschadstoffen sind Landwirtschaft und Verkehr. Mit dem Luftreinhalte-Konzept und den Umweltzielen Landwirtschaft hat der Bundesrat den grossen Handlungsbedarf und Handlungsfelder aufgezeigt.

Die Eidgenössische Kommission für Lufthygiene (EKL) hat sich bereits 2005 und 2014 ausführlich mit der Problematik der stickstoffhaltigen Luftschadstoffe befasst und die beiden Berichte «Stickstoffhaltige Luftschadstoffe in der Schweiz» sowie «Stickstoff-Einträge und Ammoniak-Immissionen» veröffentlicht. Darin hat sie die Auswirkungen von reaktiven Stickstoffverbindungen auf empfindliche Ökosysteme hauptsächlich auf der Grundlage der Critical Loads für Stickstoff und zusätzlich der Critical Levels für Ammoniak beurteilt und Empfehlungen abgegeben. Der vorliegende Bericht fokussiert auf die Entwicklung in der Periode 2000–2018 und zeigt Synergien bei der Bekämpfung von stickstoffhaltigen Luftschadstoffen und von klimarelevanten Treibhausgasen aus der Landwirtschaft auf. Die Umsetzung zielführender Massnahmen sollte nicht mehr verzögert werden.

Ich möchte allen Mitgliedern der EKL und den weiteren beteiligten Expertinnen und Experten für die wertvolle Arbeit danken. Die EKL hat diesen Bericht anlässlich ihrer Sitzungen im Mai 2020 einstimmig verabschiedet.

Prof. Dr. Nino Künzli
Präsident der Eidgenössischen Kommission für Lufthygiene

Zusammenfassung

Reaktive Stickstoffverbindungen in der Luft führen zu übermässigen Stickstoffeinträgen in naturnahe Ökosysteme wie Moore, Wälder und artenreiche Trockenwiesen mit negativen Folgen für die Stabilität und den Artenreichtum. In der Schweiz ist immer noch ein grosser Teil der naturnahen Ökosysteme durch übermässige Stickstoffeinträge belastet.

Hauptquellen für reaktive Stickstoffverbindungen sind einerseits Verbrennungsprozessen, bei denen Stickoxide gebildet werden, und andererseits die Landwirtschaft, insbesondere die Tierhaltung, bei der Ammoniak in die Luft emittiert wird. Durch strenge Vorschriften bei Verkehr, Heizungen und Industrie haben die Stickoxid-Emissionen in der Schweiz im Zeitraum zwischen 2000 und 2018 um gut ein Drittel abgenommen. Beim Hauptverursacher der Ammoniak-Emissionen, der Landwirtschaft, fehlten entsprechende verbindliche Vorschriften noch weitgehend. Die Ammoniakbelastung verminderte sich daher nur in geringem Mass.

Die Ammoniak-Emissionen sind zu gut zwei Dritteln für die übermässigen Stickstoffeinträge in Ökosysteme verantwortlich. Die Stickstoffeinträge führen neben den Beeinträchtigungen der Ökosysteme auch zu Emissionen des Treibhausgases Lachgas. Viele Massnahmen zur Verminderung der Ammoniak-Emissionen haben auch eine Reduktion von Treibhausgasen zur Folge, sei es indirekt durch Verminderung von induzierten Lachgas-Emissionen oder direkt durch abnehmende Methanemissionen.

Die EKL kommt zum Schluss, dass nach wie vor Minderungen der zu hohen Emissionen von stickstoffhaltigen Luftschadstoffen nötig sind. Insbesondere beim Ammoniak ist der Stand der Technik durch verbindliche Vorgaben in der Landwirtschaft flächendeckend einzuführen. Mit der ab 2022 in Kraft tretenden Änderung der Luftreinhalte-Verordnung (LRV) wird ein erster Schritt gemacht in Bezug auf Güllelagerung und -ausbringung. In den kommenden agrarpolitischen Etappen, z. B. der AP22+, sind verbindliche Massnahmen zur Erreichung der Umweltziele Landwirtschaft bezüglich Ammoniak- und Klimagasreduktionen unbedingt nötig, insbesondere in Richtung emissionsarmer Stallsysteme und standortangepasster Nutztierhaltung.

1 Einleitung

Die Eidgenössische Kommission für Lufthygiene (EKL) hat sich in den Jahren 2005 und 2014 mit zwei ausführlichen Berichten zu den Auswirkungen der zu hohen Emissionen von stickstoffhaltigen Luftschadstoffen geäußert (EKL 2005, EKL 2014). Dabei wurden sowohl die Emissionen von Stickoxiden aus Verbrennungsprozessen als auch die Emissionen von Ammoniak, die vorwiegend von der Landwirtschaft stammen, in die Beurteilung einbezogen. Als besonders problematisch wurden die übermässigen atmosphärischen Einträge von stickstoffhaltigen Luftschadstoffen in naturnahe Ökosysteme (z. B. Wälder, Moore, artenreiche Trockenwiesen und -weiden) bewertet.

In beiden Berichten ist die EKL zum Schluss gekommen, dass der Handlungsbedarf zur Minderung der Emissionen sehr gross ist, insbesondere bei den Ammoniak-Emissionen aus der Landwirtschaft. Die EKL hat auch festgestellt, dass das technische Potenzial zur Minderung der Emissionen gross ist und dass mit einer standortangepassten Landwirtschaft substantiell zur Minderung der Emissionen beigetragen werden kann. Von besonderer Wichtigkeit ist dabei auch die Berücksichtigung der Auswirkungen auf nahe gelegene Ökosysteme, wo einzelne oder zahlenmässig wenige Betriebe mengenmässig für einen Grossteil der Stickstoff-Einträge verantwortlich sein können.

Vor dem Hintergrund der beiden erwähnten EKL-Berichte von 2005 und 2014 analysiert die EKL in den folgenden Kapiteln auf der Grundlage der verfügbaren nationalen und internationalen Daten für den Zeitraum von 2000 bis 2018 die zeitliche Entwicklung der Emissionen von stickstoffhaltigen Luftschadstoffen, die Veränderungen bei den Belastungen (Immissionen) sowie die Konsequenzen für den Handlungsbedarf zur Minderung der Emissionen. Schwergewichtig wird die Situation mit Bezug zur Landwirtschaft dargestellt.

2 Emissionen von Ammoniak und von Stickoxiden von 2000 bis 2018

2.1 Emissionen auf nationaler Ebene

Sowohl die vorwiegend von der Landwirtschaft stammenden Emissionen von Ammoniak (NH_3) als auch die Emissionen von Stickoxiden (NO_x) aus Verbrennungsprozessen tragen zur übermässigen Belastung von naturnahen Ökosystemen mit atmosphärischen Einträgen von stickstoffhaltigen Luftschadstoffen bei. Von Interesse ist deshalb die zeitliche Entwicklung der Emissionen der beiden erwähnten Luftschadstoffe. Die Schweiz rapportiert die Emissionen jährlich zuhanden der UNECE Konvention über weiträumige grenzüberschreitende Luftverunreinigung (BAFU [FOEN] 2020a). Gemäss dieser Berichterstattung haben die schweizerischen Emissionen der Stickoxide aus Verbrennungsprozessen von 2000 bis 2018 um rund 35% abgenommen, während bei den gesamtschweizerischen Ammoniak-Emissionen ein Rückgang von rund 10%, bei den landwirtschaftlichen Ammoniak-Emissionen aber nur eine Abnahme von rund 4% ermittelt wurde. Der Verlauf der berechneten gesamtschweizerischen Stickoxid-Emissionen und der landwirtschaftlichen Ammoniak-Emissionen, ausgedrückt in Stickstoff (N), ist in Abbildung 1 dargestellt.

Stickoxid-Emissionen ($\text{NO}_x\text{-N}$) Schweiz und Ammoniak-Emissionen ($\text{NH}_3\text{-N}$) Landwirtschaft 2000–2018

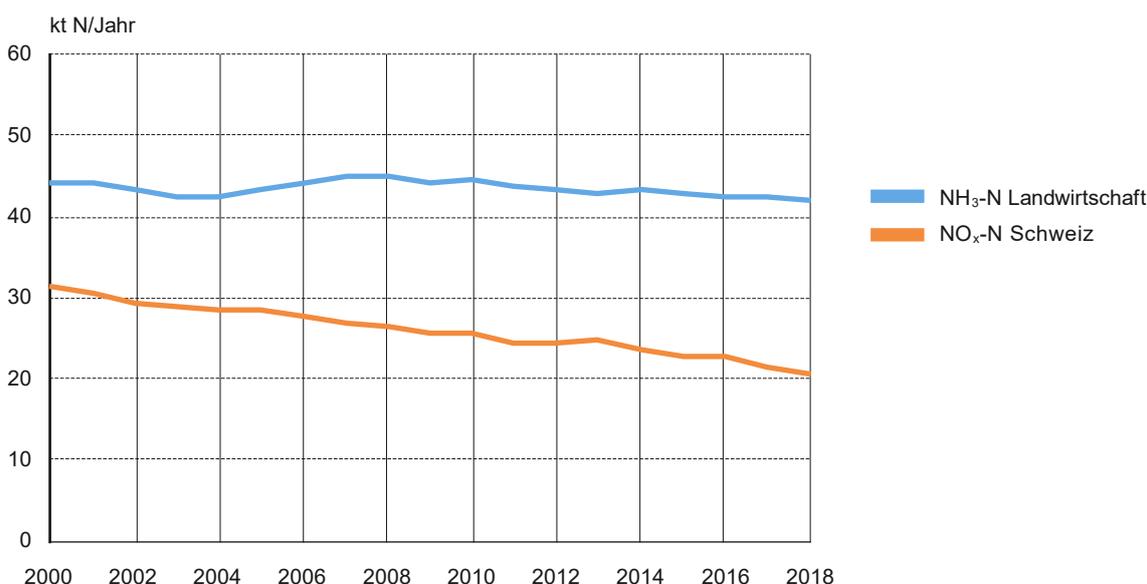


Abb. 1: Verlauf der gesamtschweizerischen Stickoxid-Emissionen ($\text{NO}_x\text{-N}$ in Kilotonnen Stickstoff pro Jahr) und der landwirtschaftlichen Ammoniak-Emissionen ($\text{NH}_3\text{-N}$ in Kilotonnen Stickstoff pro Jahr) in der Schweiz von 2000 bis 2018 (BAFU [FOEN] 2020a).

Im Jahr 2018 betragen die gesamtschweizerischen Ammoniak-Emissionen aller emittierenden Quellen insgesamt 45,1 kt $\text{NH}_3\text{-N}$, jene der Landwirtschaft 42,3 kt $\text{NH}_3\text{-N}$. Die Landwirtschaft hat demnach mit 94% zu den gesamtschweizerischen Ammoniak-Emissionen beigetragen (BAFU [FOEN] 2020a).

2.2 Ammoniak-Emissionen der Landwirtschaft im internationalen Vergleich

Um die Höhe der landwirtschaftlichen Ammoniak-Emissionen der Schweiz mit anderen Ländern vergleichen zu können, wird die Emissionsdichte verwendet, d. h. die Ammoniak-Menge, die pro Hektare landwirtschaftlich genutzte Fläche emittiert wird. Die für das Jahr 2016 verfügbaren Daten für europäische Länder zeigen, dass die Schweiz zu jenen Ländern gehört, die eine hohe Emissionsdichte aufweisen (Eurostat 2020a, Eurostat 2020b, BAFU [FOEN] 2020a, BLW 2019). Nach den Niederlanden und Belgien steht die Schweiz im internationalen Vergleich diesbezüglich an dritter Stelle (Abbildung 2).

Auffallend ist, dass die Schweiz deutlich höhere flächenbezogene Ammoniak-Emissionen aufweist als z. B. Dänemark, obschon beide Länder eine ähnlich hohe Nutztierdichte haben (Eurostat 2020c). Dies ist u.a. darauf zurückzuführen, dass in Dänemark die verfügbaren technischen Massnahmen zur Minderung der Ammoniak-Emissionen auf allen landwirtschaftlichen Betriebsebenen mit verbindlichen Vorgaben seit vielen Jahren stärker umgesetzt werden als in der Schweiz (Gyldenkaerne & Mikkelsen 2007, Kronvang et al. 2008, Jacobsen 2012, Dalgaard et al. 2014, Danish Environmental Protection Agency 2020).

NH₃-Emissionen pro ha LN im Jahr 2016

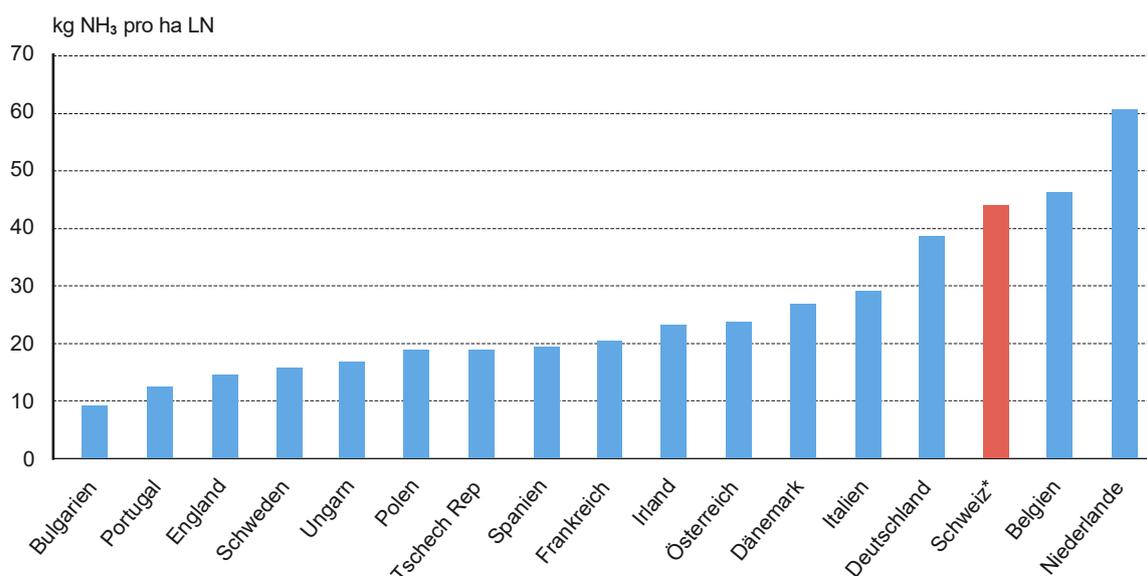


Abb. 2: Internationaler Vergleich der Ammoniak-Emissionen pro Hektare landwirtschaftlich genutzter Fläche (LN) im Jahr 2016 (Einheit: kg NH₃ pro Hektare und Jahr).

* Für die Schweiz wurden 25% der Sömmerungsweideflächen als LN berücksichtigt (EKL 2005).

3 Messungen von stickstoffhaltigen Luftschadstoffen und Auswirkungen

3.1 Ammoniak- und Stickoxid-Konzentrationen in der Schweiz von 2000 bis 2018

Die Ammoniak-Konzentrationen werden in der Schweiz seit 2000 an einer zunehmend höheren Anzahl von Messstationen gemessen (fub 2019). An 13 dieser Standorte wird seit 2000 durchgehend gemessen, an acht weiteren Stationen seit 2004, ab 2013 waren 70 Messstationen in Betrieb. 2018 wurde die Ammoniak-Belastung an insgesamt 83 Standorten ganzjährig erfasst. Die räumliche Abdeckung mit Messstandorten hat somit seit 2000 deutlich zugenommen und die unterschiedlichen Belastungstypen können besser repräsentiert werden. Sie reichen von intensiver Tierhaltung bis hin zu extensiv bewirtschafteten Alpweiden und umfassen auch verkehrsnaher sowie innerstädtische Standorte.

Zeitliche Verläufe der Ammoniak-Konzentrationsmessungen sind in Abbildung 3 für die 13 Stationen dargestellt, an welchen seit 2000 gemessen wird, sowie für die 21 Stationen mit Messergebnissen seit 2004. Mit den zusätzlichen 8 Messstationen konnten auch Standorte mit höheren Belastungen berücksichtigt werden. Dies hat über alle Stationen gesehen höhere Mittelwerte der Belastungen ergeben. Der zeitliche Verlauf der Immissionen hat sich damit aber kaum verändert. Die Mittelwerte der Ammoniak-Konzentrationen der 70 Standorte, an denen seit 2013 gemessen wird, liegen auf dem gleichen Niveau wie jene der 21 Stationen (fub 2019). Das Belastungsniveau der 21 Stationen kann damit als repräsentativ für die Situation in der Schweiz beurteilt werden.

Die meteorologischen Bedingungen führen zu gewissen Schwankungen von Jahr zu Jahr. Insgesamt zeigt sich, dass die Ammoniak-Konzentrationen seit 2000 nicht abgenommen haben. Die Immissionsmessungen bestätigen somit den zeitlichen Verlauf bei den berechneten jährlichen Emissionen (vgl. Abbildung 1).

NH₃-Immissionen Schweiz 2000–2018

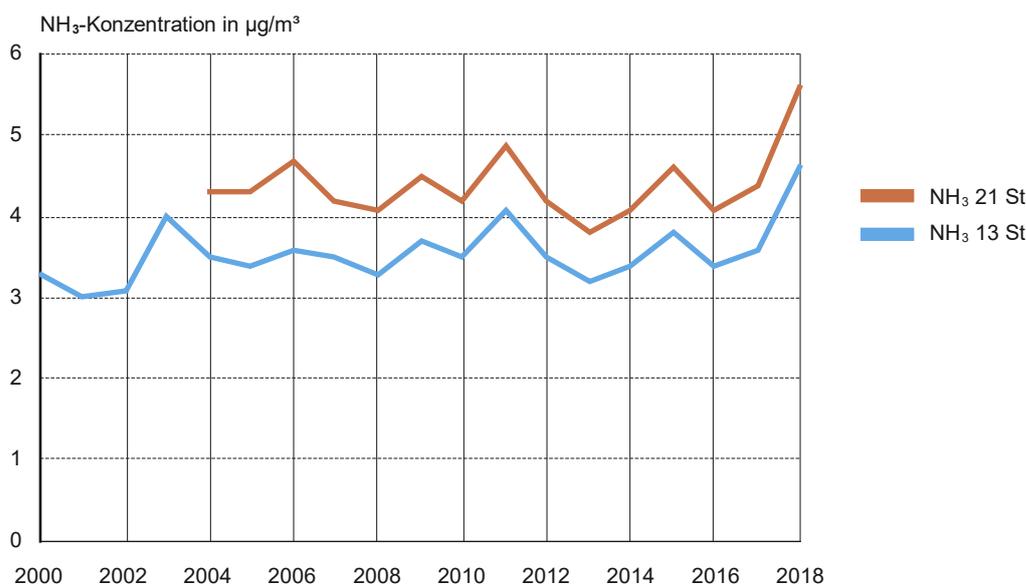


Abb. 3: Zeitliche Verläufe der Mittelwerte der Ammoniak-Konzentrationen (NH₃ in Mikrogramm pro m³) aller 13 Stationen (St) in der Schweiz, an denen seit 2000 gemessen wird, sowie aller Stationen (St), an denen seit 2004 gemessen wird. Datengrundlage sind Monatsmittelwerte (fub 2019).

Die Konzentrationen der Stickoxide werden in der Schweiz an Messstationen des Nationalen Beobachtungsnetzes für Luftfremdstoffe (NABEL) erfasst sowie an zahlreichen kantonalen Messstationen. Der in Abbildung 4 dargestellte Verlauf der gemessenen Stickoxid-Konzentrationen an verschiedenen NABEL-Standorten (BAFU & Empa 2019) bestätigt den berechneten deutlichen Rückgang der Emissionen um rund 35% von 2000 bis 2018 (vgl. Abb. 1).

NO_x-Immissionen Schweiz 2000–2018

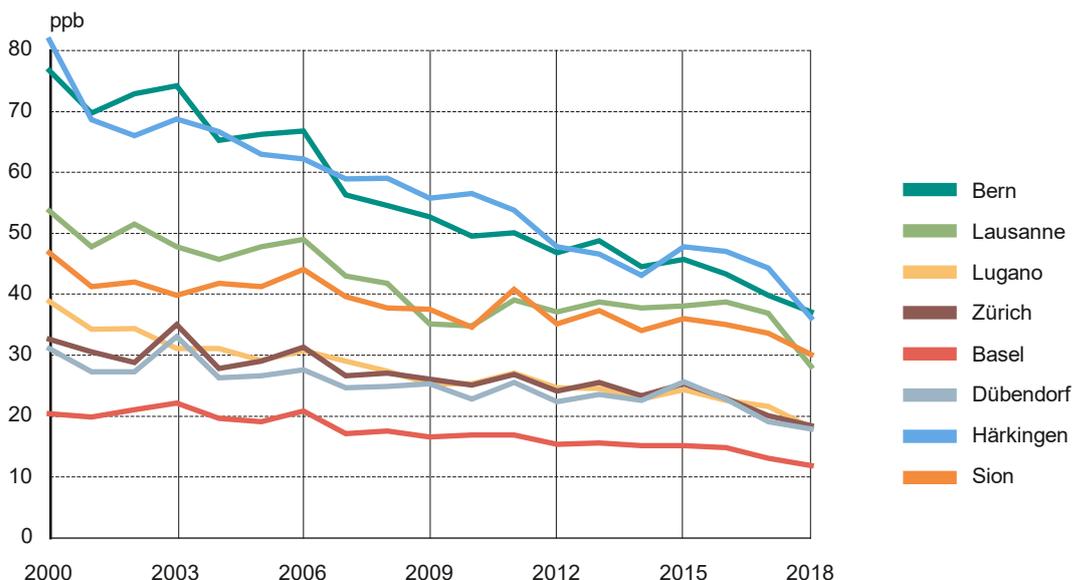


Abb. 4: Zeitlicher Verlauf der Jahresmittel der Stickoxid-Konzentrationen (NO_x in ppb), die an verschiedenen Stationen des Nationalen Beobachtungsnetzes für Luftfremdstoffe (NABEL) gemessen werden (BAFU & Empa 2019).

3.2 Übermässige Stickstoff-Belastung von naturnahen Ökosystemen

Die Emissionen und Immissionen von Stickoxiden sind in den letzten Jahrzehnten deutlich zurückgegangen. Hingegen haben die berechneten Emissionen von Ammoniak seit 2000 nur in geringem Mass abgenommen und die Ammoniak-Konzentrationen (Immissionen) verharren auf konstant hohem Niveau. Dies führt dazu, dass die Stickstoff-Deposition (N-Deposition) auf die Schweiz im Zeitraum von 2000 bis 2015 je nach verwendetem Modellierungsansatz nur um 16–22% abgenommen hat (EMEP 2019, Rihm & Künzle 2019). Die N-Deposition besteht aus der trockenen Deposition der gasförmigen Stickoxide, der Salpetersäure, des Ammoniaks und der N-haltigen Aerosole (z. B. Ammoniumnitrat) sowie aus der nassen Deposition von N-haltigen Komponenten im Niederschlag (Nitrat, Ammonium).

Gemäss Berechnungen des «Co-operative Programme for Monitoring and Evaluation of the Long-range Transmission of Air Pollutants in Europe» (EMEP) für das Jahr 2017 tragen die reduzierten N-Verbindungen, die von den Ammoniak-Emissionen stammen, rund 69% zu den gesamtschweizerischen atmosphärischen N-Einträgen bei. Die übrigen 31% der N-Einträge stammen von Emissionen von oxidierten N-Verbindungen (NO_x) aus Verbrennungsprozessen (EMEP 2019). Im Jahr 2000 betrug der Anteil der reduzierten N-Verbindungen am N-Eintrag noch 57%, stieg dann aber bis 2017 kontinuierlich auf 69% an. Dies erklärt sich mit der in Abschnitt 2.1 dargestellten Entwicklung der gesamtschweizerischen Emissionen: Der Ausstoss von oxidierten N-Verbindungen ist aufgrund von emissionsmindernden

Massnahmen im Energie- und Verkehrssektor im Zeitraum von 2000 bis 2018 deutlich zurückgegangen (–35%), während die Emissionen von reduzierten N-Verbindungen (Ammoniak) deutlich weniger abgenommen haben (–10%), jene des Sektors Landwirtschaft gar nur um –4% (BAFU [FOEN] 2020a).

Zur Beurteilung des erforderlichen Schutzes vor übermässigen Stickstoffbelastungen werden international festgelegte Belastungsgrenzen für die jährlichen atmosphärischen N-Einträge in empfindliche Ökosysteme herangezogen. Sie werden als Critical Loads (ausgedrückt in $\text{kg N ha}^{-1}\text{yr}^{-1}$) bezeichnet und sind ökosystemspezifisch festgelegt (UNECE 2010, Bobbink & Hettelingh 2011, Rihm & Achermann 2016). Auch für Direktwirkungen der gasförmigen Ammoniak-Konzentrationen auf die Vegetation gibt es international festgelegte Belastungsgrenzen. Sie werden als Critical Levels bezeichnet (Jahresmittel der Ammoniak-Konzentration in $\mu\text{g NH}_3/\text{m}^3$; EKL 2014, UNECE 2017).

Unter Berücksichtigung dieser international festgelegten Belastungsgrenzen hat die EKL in ihrem Bericht von 2014 analysiert, welcher Prozentsatz der naturnahen Ökosysteme im Jahr 2007 übermässigen Stickstoff-Einträgen oder Ammoniak-Konzentrationen ausgesetzt war (EKL 2014). Die übermässigen N-Belastungen wurden in Form des Anteils der betroffenen Fläche der jeweiligen Ökosysteme ausgewiesen. Mit der gleichen Beurteilungsmethode wurden die übermässigen Stickstoffbelastungen für den vorliegenden Bericht analysiert und für das Jahr 2015 dokumentiert (Rihm & Künzle 2019, BAFU & Meteotest 2020). Die in der nachstehenden Tabelle 1 aufgeführten Ergebnisse zeigen, dass ein hoher Anteil der Ökosysteme nach wie vor übermässig mit N-Einträgen belastet ist (Überschreitungen von Critical Loads). Die direkte Exposition gegenüber zu hohen Ammoniak-Konzentrationen (Überschreitungen von Critical Levels für Ammoniak) betrifft vergleichsweise weniger Flächenanteile der Ökosysteme. Die räumliche Verteilung der Überschreitungen der Critical Loads für Stickstoff ist in Abbildung 5 dargestellt.

Ökosystem-Inventar	Critical Loads für Stickstoff-Einträge im Jahr 2015 überschritten (Rihm & Künzle 2019)	Critical Levels für Ammoniak im Jahr 2015 überschritten (BAFU & Meteotest 2020)
Hochmoore	94%	47%
Flachmoore	77%	18%
Trockenwiesen	36%	2%
Wald	87%	17%

Tab. 1: Anteil der übermässig mit Stickstoff-Einträgen bzw. Ammoniak-Konzentrationen belasteten Flächen an den Gesamtflächen verschiedener naturnaher Ökosysteme in der Schweiz im Jahr 2015 (Rihm & Künzle 2019, BAFU & Meteotest 2020).

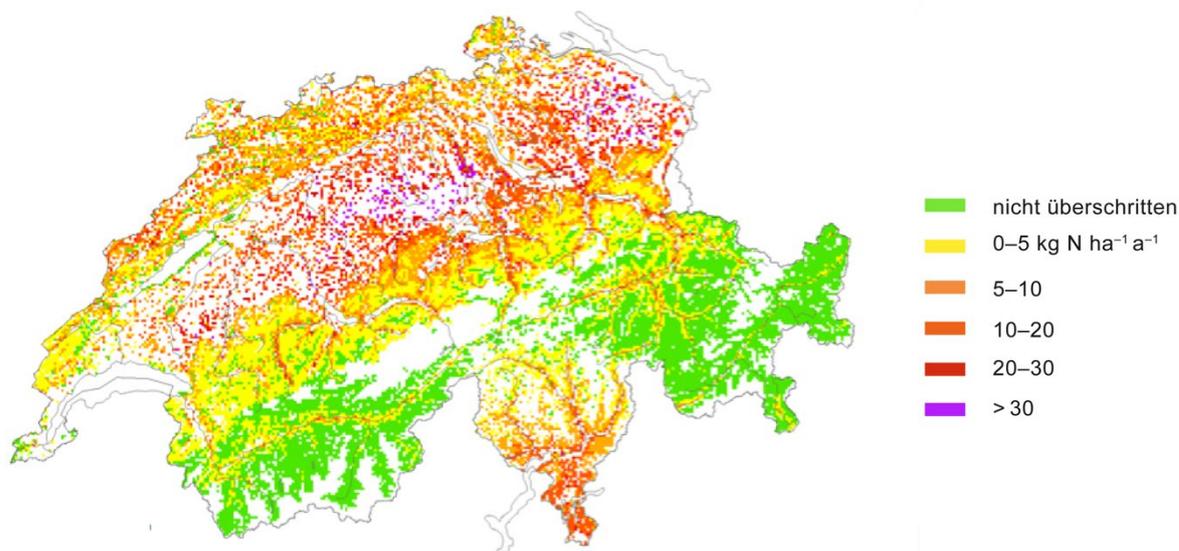


Abb. 5: Überschreitung der Critical Loads für Stickstoff bei naturnahen Ökosystemen in der Schweiz im Jahr 2015 (BAFU & Meteotest 2020). Auf den gelb, orange, rot und violett markierten Flächen sind die Immissionen übermässig.

Die deutlichen Überschreitungen der Critical Loads für Stickstoff haben Auswirkungen bei naturnahen Ökosystemen (u.a. Waldökosysteme, Hochmoore, Flachmoore, artenreiche Trockenwiesen und -weiden) wie:

- Bodenversauerung, mit Beeinträchtigung der Nährstoffversorgung und Stabilität (z. B. Erhöhung des Risikos für Windwurf, für Trockenschäden und Mortalität bei verschiedenen Baumarten in Waldökosystemen);
- Eutrophierung bzw. Überdüngung (bei allen aufgeführten naturnahen Ökosystemen), und als Folge davon Auswaschungen von Nitrat aus dem Wurzelraum ins Grundwasser;
- Auswirkungen auf die Biodiversität, insbesondere Beeinträchtigungen von Pflanzen, die auf nährstoffarme Standorte angewiesen sind. Als Folge der Verarmung der Pflanzenvielfalt ist auch die Fauna (u.a. Vielfalt der Insekten) betroffen, die auf naturnahe Standorte angewiesen ist.

Die negativen Auswirkungen wurden bei wichtigen naturnahen Ökosystemen auch durch Untersuchungen in der Schweiz nachgewiesen (z. B. Rion et al. 2018, Braun et al. 2018, de Witte et al. 2017, Braun et al. 2017, Etzold et al. 2014, Roth et al. 2013, Egli & Brunner 2011, Senn-Irllet et al. 2007, EKL 2005, Mayer et al. 2005, Braun et al. 2003).

3.3 Bildung von Feinstaub (PM) mit Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit

Ammoniak und Stickoxide tragen nach ihrer Emission zur Bildung von sekundären Aerosolen bei, die Bestandteile des Feinstaubs sind. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass Ammonium, Nitrat und Sulfat gesamtschweizerisch etwa die Hälfte, an strassennahen Standorten und in der Südschweiz etwa ein Drittel des Feinstaubs PM_{2.5} (Feinstaub mit einem Durchmesser von weniger als 2,5 Mikrometer) ausmachen (BAFU 2019). Auswirkungen des Feinstaubs auf die menschliche Gesundheit sind in zahlreichen Studien dokumentiert und umfassen akute und chronische gesundheitliche Probleme (Atemwege, Herz-Kreislauf-System) bis zu vorzeitiger Sterblichkeit und somit geringerer Lebenserwartung (EKL 2013).

3.4 N-Einträge in naturnahe Ökosysteme führen zu Emissionen von Treibhausgasen

Eine zu hohe N-Intensität bei der landwirtschaftlichen Produktion führt nicht nur auf landwirtschaftlichen Nutzflächen zu erhöhten Emissionen von Treibhausgasen wie Lachgas (N_2O). Als Folge der Verfrachtung von emittiertem Ammoniak und emittierten Stickoxiden werden diese auf dem Luftweg in naturnahe Ökosysteme eingetragen. Danach wird in diesen Ökosystemen über Bodenprozesse ebenfalls Lachgas gebildet und emittiert. Dies wird als induzierte indirekte Lachgas-Bildung bezeichnet. Sie wurde für die Schweiz untersucht und quantifiziert (Bühlmann et al. 2015).

Für das Jahr 2010 haben die Untersuchungen ergeben, dass die induzierten indirekten Lachgas-Emissionen 1,61 kt N_2O -N betragen. Weil die N-Deposition in der Schweiz zu etwa zwei Dritteln aus reduzierten N-Komponenten besteht (vgl. Kapitel 3.2.), die grösstenteils von den Ammoniak-Emissionen der Landwirtschaft stammen, sind etwa zwei Drittel dieser indirekten Lachgas-Emissionen auf die Ammoniak-Emissionen der Landwirtschaft zurückzuführen. Im Vergleich dazu beliefen sich die direkten Lachgas-Emissionen der Landwirtschaft auf 5,12 kt N_2O -N pro Jahr und jene des Energiesektors auf 0,65 kt N_2O -N pro Jahr. Der Anteil der indirekten Lachgas-Emissionen an den gesamtschweizerischen Emissionen dieses Treibhausgases betrug demnach 21%.

4 Handlungsbedarf zur Minderung der Emissionen

4.1 Ammoniak bezogen auf die Umweltziele Landwirtschaft (UZL) des Bundesrats

Der Bundesrat hat in seinem Bericht vom 9. Dezember 2016 in Erfüllung des Postulats 13.4284 Bertschy vom 13. Dezember 2013 das Umweltziel Landwirtschaft (UZL) für die Ammoniak-Emissionen der Landwirtschaft bestätigt (Bundesrat 2016). Das Erreichen dieses Ziels ist erforderlich, um die in der Schweiz grossräumig vorkommenden übermässigen Stickstoff-Einträge in naturnahe Ökosysteme abzubauen. Das UZL für die Ammoniak-Emissionen der Landwirtschaft beträgt 25 kt NH₃-N pro Jahr (Bundesrat 2016, BAFU und BLW 2016).

Die Ammoniak-Emissionen der Landwirtschaft betragen im Jahr 2018 insgesamt 42,3 kt NH₃-N (BAFU [FOEN] 2020a, vgl. Kapitel 2.1.). Der Handlungsbedarf zur Minderung der landwirtschaftlichen Ammoniak-Emissionen beträgt demnach –41% gegenüber dem Stand der Emissionen von 2018.

Der Handlungsbedarf ist demzufolge nach wie vor etwa gleich hoch wie dies der Bundesrat im Luftreinhaltekonzept von 2009 ausgewiesen hat (Bundesrat 2009). Die notwendige Emissionsreduktion wurde damals auf ca. 40% gegenüber dem Stand von 2005 beziffert.

4.2 Stickoxide bezogen auf das Luftreinhaltekonzept des Bundesrats

Bei den Stickoxiden erfolgte seit 2000 ein deutlicher Emissionsrückgang, der sich gemäss Prognosen weiter fortsetzen wird. Das im Luftreinhaltekonzept des Bundesrats von 2009 festgeschriebene Ziel einer Minderung der Stickoxid-Emissionen um ca. 50% gegenüber dem Stand von 2005 wird voraussichtlich zwischen 2025 und 2030 erreicht werden (Bundesrat 2009, BAFU [FOEN] 2020a).

4.3 Synergien bei Massnahmen zur Minderung der Ammoniak-Emissionen und zur Minderung der Emissionen von Treibhausgasen wie Methan und Lachgas

Bei den Emissionen der Treibhausgase ist die Landwirtschaft in der Schweiz die Hauptquelle für die Methan- und Lachgas-Emissionen, während bei den CO₂-Emissionen die Quellengruppe Energie dominiert (BAFU [FOEN] 2020b). Die Emissionen dieser Treibhausgase der Schweiz im Jahr 2018 sind in Tabelle 2 dargestellt. Bei den CO₂-Emissionen sind nur fossile Brenn- und Treibstoffe berücksichtigt, bei den Methan- und Lachgasemissionen jedoch auch die Emissionen aus der Nutzung von Biomasse.

Sektoren	CO ₂	CH ₄	N ₂ O
Energie	34 714	275	246
Industrielle Prozesse und Produktverwendung	2 114	3	588
Landwirtschaft	46	4 040	1 905
Abfall	9	521	140
Andere	12	0,7	0,6
Total	36 895	4 840	2 880

Tab. 2: Emissionen von Treibhausgasen in der Schweiz im Jahr 2018, ausgedrückt in Kilotonnen CO₂-Äquivalenten, ohne indirekte Lachgas-Emissionen (BAFU [FOEN] 2020b). Die dominanten Quellen für einzelne Treibhausgase sind mit roter Farbe hervorgehoben. CO₂ = Kohlendioxid; CH₄ = Methan; N₂O = Lachgas.

Die Emissionen von Treibhausgasen als Folge von landwirtschaftlichen Aktivitäten sind Gegenstand von zahlreichen Fachpublikationen (u.a. Grossi et al 2019, Bretscher et al. 2018, Hasler et al. 2017, Bundesrat 2016, Wagner et al. 2015, Domingo et al. 2014, Hristov et al. 2013, Oenema et al. 2012, BLW 2011, Smith et al. 2007). Dabei werden auch Synergien bei Massnahmen zur Minderung von Ammoniak-Emissionen und zur Minderung der Emissionen von Treibhausgasen wie Methan und Lachgas untersucht und dokumentiert.

Neben den Lachgas-Emissionen aus der landwirtschaftlichen Nutzfläche und den Tierhaltungsanlagen sind auch induzierte indirekte Lachgas-Emissionen bei naturnahen Ökosystemen von Bedeutung, die als Folge der übermässigen atmosphärischen Stickstoffeinträge in diese Ökosysteme entstehen (vgl. Kapitel 3.4.). Der Anteil der Landwirtschaft an diesen indirekten Lachgas-Emissionen beträgt rund zwei Drittel, weil die Stickstoffeinträge in die naturnahen Ökosysteme zu rund zwei Dritteln aus reduzierten N-Komponenten bestehen, die von den Ammoniak-Emissionen der Landwirtschaft stammen. Vor diesem Hintergrund kann festgestellt werden, dass sämtliche Massnahmen zur Minderung der Ammoniak-Emissionen (insbesondere emissionsarme Stallsysteme, Hofdüngerlagerung und Hofdüngerausbringung, Substitution von harnstoffhaltigen Düngern mit Mineraldüngern auf der Basis von Calcium, Kalium, Ammonium und Nitrat) schliesslich auch zu einer Reduktion der erwähnten indirekten Lachgas-Emissionen führen.

Untersuchungen haben auch ergeben, dass bei einigen Massnahmen zur Minderung der landwirtschaftlichen Ammoniak-Emissionen auch Synergien in Form von direkten Minderungen der Emissionen von Treibhausgasen wie Methan und Lachgas bestehen. Synergien dieser Art sind für folgende Massnahmen dokumentiert:

- Erhöhung der N-Effizienz bei der Hofdüngerbewirtschaftung durch eine an den Bedarf der Pflanzen angepasste Düngung mit Hof- und Mineraldüngern (Stichwort «precision farming»).
- Bedarfsgerechte N-optimierte Fütterung der Nutztiere (Phasenfütterung, stickstoff- und phosphorreduziertes Futter, ausgewogenes Energie-Protein-Verhältnis in der Futtermittelration).
- Reduktion der Methan-Emissionen durch Züchtung auf hohe Futterkonvertierungseffizienz und tiefe Methan-Emissionen.
- Verringerung der N-Überschüsse, u.a. durch Verringerung des N-Inputs ins landwirtschaftliche System (u.a. durch Reduktion der Futtermittelimporte) und durch eine standortgerechte Anpassung der Intensität bei der Nutztierhaltung.
- Abdeckung von Hofdüngerlagern zur Minderung der Ammoniak-Emissionen bewirkt auch eine Verminderung der Methan-Emissionen.
- Emissionsarme Stallsysteme mit häufiger Reinigung der Laufflächen, schneller Trennung von Harn und Kot sowie schnelle Abführung der Hofdünger in gedeckte Lager.
- Anaerobe Vergärung von Hofdünger in Biogasanlagen.
- Förderung des Anbaus von Leguminosen im Ackerbau (Dauerkulturen, Zwischensaat).

Mit einer konsequenten Durchführung von Massnahmen zur Minderung der Ammoniak-Emissionen kann demzufolge auch ein wesentlicher Beitrag zum Erreichen der Ziele der Klimastrategie des BLW und des Bundesrats zur Minderung der Emissionen von Treibhausgasen der Landwirtschaft geleistet werden (BLW 2011).

5 Schlussfolgerungen

Die EKL kommt zum Schluss, dass die Erkenntnisse aus ihren zwei Berichten von 2005 und 2014 zur Problematik der zu hohen Emissionen von stickstoffhaltigen Luftschadstoffen und die Empfehlungen zu ihrer Minderung nach wie vor gültig sind (EKL 2005, EKL 2014). Der Handlungsbedarf zur Reduktion der landwirtschaftlichen Ammoniak-Emissionen ist unverändert hoch. Die Erkenntnisse aus den zwei erwähnten EKL-Berichten stützen auch die Forderungen zur Emissionsminderung im Luftreinhaltekonzept des Bundesrats von 2009 (Bundesrat 2009) und im Bericht des Bundesrats vom 9. Dezember 2016 in Erfüllung des Postulats 13.4284 Bertschy vom 13. Dezember 2013, in welchem das Umweltziel Landwirtschaft (UZL) für die Ammoniak-Emissionen der Landwirtschaft bestätigt wurde (Bundesrat 2016).

Die EKL stellt auf der Grundlage der vorliegenden Analyse der zeitlichen Verläufe der berechneten Ammoniak-Emissionen und der gemessenen Ammoniak-Konzentrationen fest, dass seit 2000 bis 2018 eine Stagnation der Belastungen auf deutlich zu hohem Niveau beobachtet werden kann. Die in allen Agrarpolitiken (AP 2007, AP 2011, AP 2014-17) immer wieder formulierten Etappenziele zur Minderung der Ammoniak-Emissionen wurden jeweils nicht erreicht und in der Folge mehr oder weniger unverändert in die nächste agrarpolitische Etappe fortgeschrieben. In den erwähnten agrarpolitischen Etappen fehlten genügend verbindliche Vorgaben zur Emissionsminderung. Das Ergreifen von Massnahmen beruhte grösstenteils auf Freiwilligkeit, insbesondere auch die Teilnahme von Landwirten an Programmen, mit welchen über finanzielle Beiträge ein Anreiz zur Umsetzung von spezifischen Massnahmen zur Emissionsminderung geschaffen wurde. Für die Länder der EU stellt der Rat der Europäischen Union in einer Analyse betreffend Verbesserung der Luftqualität vom 5. März 2020 fest, dass die Ammoniak-Emissionen in den letzten zehn Jahren in erheblich geringerem Umfang zurückgegangen sind als andere Emissionen, was u.a. auf das Fehlen spezifischer Rechtsvorschriften über die Emissionsbegrenzung an der Quelle zurückzuführen ist (Rat der Europäischen Union 2020). Der Rat unterstreicht auch, dass Massnahmen zur Minderung der Ammoniak-Emissionen verfügbar und technisch und wirtschaftlich tragfähig sind.

Die EKL kommt deshalb zum Schluss, dass in den kommenden agrarpolitischen Etappen deutlich mehr Verbindlichkeit geschaffen werden muss. Es ist ein verbindlicher Pfad zur Minderung der Ammoniak-Emissionen festzulegen, welcher auch die Konkretisierung und Quantifizierung der erforderlichen Massnahmen zum Erreichen des Umweltziels Landwirtschaft (UZL) umfasst. Vor diesem Hintergrund begrüsst die EKL, dass der Bundesrat am 12. Februar 2020 die Aufnahme verbindlicher Bestimmungen in die Luftreinhalte-Verordnung betreffend die wirksame Abdeckung von Güllelagern und die emissionsarme Gülleausbringung genehmigt hat, die ab 1. Januar 2022 in Kraft treten werden. Ebenso begrüsst die EKL die Stossrichtung zur weiteren Ökologisierung der Landwirtschaft, die der Bundesrat mit der Botschaft zur Weiterentwicklung der Agrarpolitik ab 2022 (AP22+) am 12. Februar 2020 verabschiedet hat und mit welcher wesentliche Neuregelungen zur Reduktion der Nährstoffverluste skizziert werden. Die EKL erwartet, dass mit der AP22+ in Ergänzung zu den erwähnten Massnahmen in der Luftreinhalte-Verordnung auch wesentliche Fortschritte in Richtung emissionsarmer Stallsysteme und standortangepasster Nutztierhaltung erzielt werden.

Von der Minderung der Ammoniak-Emissionen und dem Erreichen des diesbezüglichen Umweltziels Landwirtschaft (UZL) kann ein nachhaltiger Schutz von naturnahen Ökosystemen vor negativen Auswirkungen wie Versauerung und Eutrophierung erwartet werden. Dies umfasst auch substanzielle Verbesserungen bei der Erhaltung der Biodiversität, insbesondere hinsichtlich der Lebensbedingungen für Pflanzenarten sowie für die Fauna, die an nährstoffarme Standorte gebunden sind. Gleichzeitig kann auch eine Verbesserung der lufthygienischen Situation in Bezug auf die Feinstaubbelastung erwartet werden, die mit positiven Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit einhergeht. Nicht zuletzt ist beim Ergreifen von Massnahmen zur Minderung der Ammoniak-Emissionen auch mit Synergien zur Minderung

der Emissionen von klimawirksamen Treibhausgasen, insbesondere Lachgas und Methan, sowie mit einer Reduktion der Nitratauswaschung aus naturnahen Ökosystemen zu rechnen.

Als wichtig erachtet die EKL für die kommende Agrarpolitik AP22+, dass das technische Potenzial zur Minderung der Ammoniak-Emissionen auf allen Ebenen eines landwirtschaftlichen Betriebs umfassend ausgeschöpft wird. Es ist noch beachtlich hoch (Amann et al. 2015, Bundesrat 2016). Ergänzend ist eine standortangepasste Landwirtschaft anzustreben, die insbesondere bei der Nutztierhaltung auf die Stickstoffzufuhr über Futtermittelimporte verzichtet und damit über eine Verminderung der Intensität der Produktion zu einer Reduktion der Umweltbelastung beiträgt.

Literaturverzeichnis

Amann M., Borken-Kleefeld J., Cofala J., Kiesewetter G., Klimont Z., Sander R., Schoepp W., Winiwarter W., 2015: Scenarios for further improvements of air quality in Switzerland. International Institute for Applied Systems Analysis IIASA. 84 p. Auf Anfrage beim Bundesamt für Umwelt BAFU, Bern, erhältlich.

BAFU und BLW, 2016: Umweltziele Landwirtschaft. Statusbericht 2016. Herausgegeben vom Bundesamt für Umwelt BAFU und vom Bundesamt für Landwirtschaft BLW. Bundesamt für Umwelt, Bern, Umwelt-Wissen Nr. 1633, 114 S.

BAFU, 2019: Feinstaub PM2.5. Fragen und Antworten zu Eigenschaften, Emissionen, Immissionen, Auswirkungen und Massnahmen. Bundesamt für Umwelt BAFU, Bern, Stand Januar 2019.

BAFU und Empa, 2019: Nationales Beobachtungsnetz für Luftfremdstoffe NABEL. Messergebnisse 2018. Herausgegeben vom Bundesamt für Umwelt BAFU und von der Eidg. Materialprüfungs- und Forschungsanstalt Empa, Bern 2019. 96 S.

BAFU und Meteotest, 2020: Schweizer Daten zur Überschreitung der Critical Loads für Stickstoff und der Critical Levels für Ammoniak im Jahr 2015. Karte zu den Überschreitungen der Critical Loads für Stickstoff erstellt durch die Firma Meteotest. Daten und Karten zur Verfügung gestellt vom Bundesamt für Umwelt (BAFU), Bern.

BAFU [FOEN], 2020a: Switzerland's Informative Inventory Report 2020 (IIR). Submission under the UNECE Convention on Long-range Transboundary Air Pollution. Federal Office for the Environment FOEN, Bern. 374 p.

BAFU [FOEN], 2020b: Switzerland's Greenhouse Gas Inventory 1990–2018. National Inventory Report, including reporting elements under the Kyoto Protocol. Submission of April 2020 under the United Nations Framework Convention on Climate Change and under the Kyoto Protocol. Federal Office for the Environment FOEN, Bern. 660 p.

BLW, 2011: Klimastrategie Landwirtschaft. Klimaschutz und Anpassung an den Klimawandel für eine nachhaltige Schweizer Land- und Ernährungswirtschaft. Eidg. Volkswirtschaftsdepartement EVD, Bundesamt für Landwirtschaft BLW, Bern, 31. Mai 2011.

BLW, 2019: Agrarbericht 2018. Bundesamt für Landwirtschaft BLW, Bern.

Bobbink R., Hettelingh J.-P. (eds.), 2011: Review and revision of empirical critical loads and dose-response relationships. Proceedings of an expert workshop held under the UNECE Convention on Long-range Transboundary Air Pollution, Noordwijkerhout, 23–25 June 2010. Coordination Centre for Effects, RIVM report 680359002.

Braun S., Schindler Ch., Volz R., Flückiger W., 2003: Forest damages by the storm «Lothar» in permanent observation plots in Switzerland: The significance of soil acidification and nitrogen deposition. *Water, Air and Soil Pollution* 142, 327–340.

Braun S., Schindler Ch., Rihm B., 2017: Growth trends of beech and Norway spruce in Switzerland: The role of nitrogen deposition, ozone, mineral nutrition and climate. *Science of the Total Environment* 599–600, 637–646.

Braun S., Hopf S., de Witte L., 2018: Wie geht es unserem Wald? 34 Jahre Walddauerbeobachtung. Interkantonales Walddauerbeobachtungsprogramm im Auftrag der Kantone AG, BE, BL, BS, GR, SO, TG, ZG, ZH und der Zentralschweizer Kantone mit Beteiligung des Bundesamts für Umwelt BAFU. Bericht 2013–2017. Institut für Angewandte Pflanzenbiologie (IAP), Schönenbuch. 140 S.

Bretscher D., Ammann Ch., Wüst Ch., Nyfeler A., Felder D., 2018: Reduktionspotenziale von Treibhausgasemissionen aus der Schweizer Nutztierhaltung. *Agrarforschung Schweiz* 9 (11–12), 376–383.

Bühlmann T., Hiltbrunner E., Körner Ch., Rihm B., Achermann B., 2015: Induction of indirect N₂O and NO emissions by atmospheric nitrogen deposition in (semi-)natural ecosystems in Switzerland. *Atmospheric Environment* 103, 94–101.

Bundesrat, 2009: Bericht Konzept betreffend lufthygienische Massnahmen des Bundes vom 11. September 2009. Bundesblatt (BBl) Nr. 40 vom 6. Oktober 2009.

Bundesrat, 2016: Natürliche Lebensgrundlagen und ressourceneffiziente Produktion. Aktualisierung der Ziele. Bericht des Bundesrats vom 9. Dezember 2016 in Erfüllung des Postulats 13.4284 Bertschy vom 13. Dezember 2013.

Dalgaard T., Hansen B., Hasler B., Hertel O., Hutchings N.J., Jacobsen B.H., Stoumann Jensen L., Kronvang B., Olesen J.E., Schjørring J.K., Kristensen I.S., Graversgaard M., Termansen M., Vejre H., 2014: Policies for agricultural management – trends, challenges and prospects for improved efficiency in Denmark. *Environmental Research Letters* 9, 115002. 16 p.

Danish Environmental Protection Agency, 2020: Environmental Technologies for Livestock Holdings. Internet Access: eng.mst.dk > trade > agriculture > environmental-technologies-for-livestock-holdings > list-of-environmental-technologies.

de Witte L.C., Rosenstock N.P., van der Linde S., Braun S., 2017: Nitrogen deposition changes ectomycorrhizal communities in Swiss beech forests. *Science of the Total Environment* 605–606, 1083–1096.

Domingo J., De Miguel E., Hurtado B., Métayer N., Bochu J.-L., Pointereau Ph., 2014: Measures at farm level to reduce greenhouse gas emissions from EU agriculture. Report prepared on the request of the European Parliament's Committee on Agriculture and Rural Development.

Egli S., Brunner I., 2011: Mykorrhiza. Eine faszinierende Lebensgemeinschaft im Wald. Merkblatt für die Praxis 35, 3. Auflage. Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL, CH-8903 Birmensdorf.

EKL, 2005: Stickstoffhaltige Luftschadstoffe in der Schweiz. Status-Bericht der Eidgenössischen Kommission für Lufthygiene EKL. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft BUWAL, Schriftenreihe Umwelt Nr. 384. 170 S.

EKL, 2013: Feinstaub in der Schweiz 2013. Statusbericht der Eidgenössischen Kommission für Lufthygiene EKL. 63 S.

EKL, 2014: Ammoniak-Immissionen und Stickstoffeinträge. Abklärungen der EKL zur Beurteilung der Übermässigkeit. Eidgenössische Kommission für Lufthygiene EKL. 62 S.

EMEP, 2019: Transboundary air pollution by main pollutants (S, N, O₃) and PM in 2017, Switzerland. Convention on Long-range Transboundary Air Pollution, Co-operative Programme for Monitoring and Evaluation of the Long-range Transmission of Air Pollutants in Europe. Norwegian Meteorological Institute. MSC-W Data Note 1/2019. August 2019.

Etzold S., Waldner P., Thimonier A., Schmitt M., Dobbertin M., 2014: Tree growth in Swiss forests between 1995 and 2010 in relation to climate and stand conditions: Recent disturbances matter. *Forest Ecology and Management* 311, 41–55.

Eurostat, 2020a: Ammonia emissions from agriculture (source EEA), Table, online data code: SDG_02_60. Eurostat, Download 9 April 2020.

Eurostat, 2020b: Farm indicators by agricultural area, type of farm, standard output, legal form and NUTS 2 regions, Table, online data code: ef_m_farmleg. Eurostat, Download 9 April 2020.

Eurostat, 2020c: Livestock density index (Livestock units per ha), Table, online data code: TAI09. Eurostat, Download 9 April 2020:

fub, 2019: Ammoniak-Immissionsmessungen in der Schweiz 2000–2018. Messbericht. Im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU), der OSTLUFT, der ZUDK, des Fürstentums Liechtenstein und der Kantone AG, AI, BE, BL/BS, FR, GL, GR, LU, NE, SG, SH, SO, TG, ZG und ZH. Forschungsstelle für Umweltbeobachtung (fub). 76 S. Download: Bundesamt für Umwelt (BAFU).

Grossi G., Goglio P., Vitali A., Williams A.G., 2019: Livestock and climate change: impact of livestock on climate change and mitigation strategies. *Animal Frontiers* Vol. 9, No. 1, January 2019.

Gyldenkaerne S., Mikkelsen M.H., 2007: Projection of the Ammonia Emission from Denmark from 2005 until 2025. NERI Technical Report No. 239. National Environmental Research Institute, University of Aarhus, Denmark. 47 p.

Hasler K., Bröring S., Omta O., Olf H.-W., 2017: Eco-innovations in the German fertilizer supply chain: Impact on the carbon footprint of fertilizers. *Plant, Soil and Environment* 63, 12, 531–544.

Hristov A.N., Oh J., Lee C., Meinen R., Montes F., Ott T., Firkins J., Rotz A., Dell C., Adesogan A., Yang W., Tricarico J., Kebreab E., Waghorn G., Dijkstra J., Oosting S., 2013: Mitigation of greenhouse gas emissions in livestock production – A review of technical options for non-CO₂ emissions. Edited by Gerber P.J., Henderson B. and Makkar H.P.S. *FAO Animal Production and Health Paper No. 177*. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy.

Jacobsen B.H., 2012: Ammonia Emissions in Europe – Costs, Regulation and Targets with Focus on Denmark. *Journal of Agricultural Science and Technology A* 2, 285–293.

Kronvang B., Andersen H.E., Borgesen C., Dalgaard T., Larsen S.E., Bogestrand J., Blicher-Mathiasen G., 2008: Effects of policy measures implemented in Denmark on nitrogen pollution of the aquatic environment. *Environmental Science & Policy* 11, 144–152.

Mayer Ph., Brang P., Dobbertin M., Hallenbarter D., Renaud J.-P., Walthert L., Zimmermann S., 2005: Forest storm damage is more frequent on acidic soils. *Ann. For. Sci.* 62, 303–311.

Oenema O., Velthof G., Klimont Z., Winiwarter W., 2012: Emissions from agriculture and their control potentials. International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA), TSAP Report#3

Rat der Europäischen Union, 2020: Schlussfolgerungen zur Verbesserung der Luftqualität, die der Rat der Europäischen Union auf seiner 3754. Tagung vom 5. März 2020 angenommen hat.

Rihm B., Achermann B., 2016: Critical Loads of Nitrogen and their Exceedances. Swiss contribution to the effects-oriented work under the Convention on Long-range Transboundary Air Pollution (UNECE). Federal Office for the Environment, Bern. Environmental studies no. 1642. 78 p.

Rihm B., Künzle Th., 2019: Mapping Nitrogen Deposition 2015 for Switzerland. Technical Report on the Update of Critical Loads and Exceedance, including the years 1990, 2000, 2005 and 2010. Commissioned by the Federal Office for the Environment. 49 p.

Rion V., Gallandat J.-D., Gobat J.-M., Vittoz P., 2018: Recent changes in the plant composition of wetlands in the Jura mountains. *Appl. Veg. Sci.* 21, 121–131.

Roth T., Kohli L., Rihm B., Achermann B., 2013: Nitrogen deposition is negatively related to species richness and species composition of vascular plants and bryophytes in Swiss mountain grassland. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 178, 121–126.

Senn-Irlet B., Bieri G., Egli S., 2007: Rote Liste der gefährdeten Grosspilze der Schweiz. Umwelt-Vollzug Nr. 0718. Hrsg. Bundesamt für Umwelt, Bern, und Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL, Birmensdorf. 92 S.

Smith P., Martino D., Cai Z., Gwary D., Janzen H., Kumar P., McCarl B., Ogle S., O'Mara F., Rice C., Scholes B., Sirotenko O., 2007: Agriculture. In *Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of the Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Metz B., Davidson O.R., Bosch P.R., Dave R., Meyer L.A. (eds)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

UNECE, 2010: Empirical critical loads and dose-response relationships. Report on an expert workshop held from 23 to 25 June 2010 in Noordwijkerhout, The Netherlands. Prepared by the Coordination Centre for Effects on behalf of the Convention on Long-range Transboundary Air Pollution, Working Group on Effects, 13 July 2010, ECE/EB.AIR/WG.1/2010/14

UNECE, 2017: Manual on methodologies and criteria for Modelling and Mapping Critical Loads & Levels, Chapter 3, Mapping Critical Levels for Vegetation (update 2017). Convention on Long-range Transboundary Air Pollution, Working Group on Effects, International Cooperative Programme on Modelling and Mapping Critical Levels and Loads and Air Pollution Effects, Risks and Trends, Coordination Centre for Effects (CCE, Umweltbundesamt Germany), United Nations Economic Commission for Europe.

Wagner S., Angenendt E., Beletskaya O., Zeddies J., 2015: Costs and benefits of ammonia and particulate matter abatement in German agriculture including interactions with greenhouse gas emissions. *Agricultural Systems* 141, 58–68.