



innet
Umweltmonitoring



Messbericht Ammoniak

Ammoniakmessungen in der Zentralschweiz von 2000 bis 2022

Autorin

Dr. Hannah Wey

Geprüft

Ursina Schwyn
Daria Göllnitz
Dr. Christian Ruckstuhl

Titelbild

Niklas Joos, AfU Uri



Umwelt
Zentralschweiz

Zusammenfassung

Ammoniak (NH₃) gelangt überwiegend durch landwirtschaftliche Aktivitäten in die Umwelt. Vor allem beim Ausbringen und Lagern von Gülle und Mist sowie im Stall und auf dem Laufhof entstehen hohe Emissionen. Diese führen zu negativen Gesundheits- und Umwelteffekten. Deshalb werden die Ammoniakkonzentrationen in der Zentralschweiz an verschiedenen Orten überwacht, während gleichzeitig Massnahmen zur Emissionsminderung umgesetzt werden.

Seit 2000 werden im Kanton Luzern und auf dem Zugerberg im Kanton Zug die Ammoniakimmissionen als Konzentration in der Luft mit Passivsammlern gemessen. Die Messgebiete liegen in Landwirtschaftszonen oder in der näheren Umgebung von ökologisch sensiblen Gebieten. 2007 kamen vier Messpunkte im Kanton Zug hinzu. Seit 2010 messen die Zentralschweizer Kantone Nidwalden, Obwalden, Schwyz, Uri und Zug an landwirtschaftlich exponierten Standorten an je mindestens drei Messpunkten die Ammoniakkonzentration. Seit 2014 bzw. 2019 wird diese zusätzlich in Ausserschwyz an drei Messpunkten erhoben.

Das gesamte Messnetz dient einerseits als Grundlage für die **Überwachung der Massnahmenpläne und andererseits als Wirkungsmonitoring der Ressourcenprogramme** zur Ammoniakminderung. In den Kantonen Luzern und Zug sind bis im Jahr 2030 Massnahmenpläne aktiv, welche behördenverbindliche Pläne nach Luftreinhalteverordnung (LRV) darstellen.

Die Ammoniakkonzentrationen in der Zentralschweiz bewegten sich im Jahr 2022 in den meisten Messungen auf dem Niveau der Werte von vor 2018 oder leicht darüber. Sie lagen damit tiefer als in den Hitzejahren 2018–2020, jedoch höher als im von Starkniederschlägen geprägten Jahr 2021. Der typische **Frühlingspeak im März** war 2022 an den meisten Messpunkten aussergewöhnlich deutlich ausgeprägt und fiel zeitlich wohl mit dem synchronen Ausbringen von Gülle zusammen. Je nach Messpunkt verblieben die Konzentrationen danach auf erhöhtem Niveau oder stiegen nach einem kurzfristigen Rückgang in den Sommermonaten erneut an. Der Herbstpeak war – je nach Messpunkt – deutlich bis gar nicht sichtbar.

Die Ammoniakkonzentrationen von 2010 bis 2022 **überschreiten im mehrjährigen Mittel den Critical Level für höhere Pflanzen** von 3 µg m⁻³ in 13 von 17 langjährigen Messgebieten **zum Teil sehr deutlich**. Über alle Messgebiete gerechnet beträgt der Faktor 1.86.¹ Im Vergleich zum Vorjahr ist dies ein erneuter Anstieg. Selbst wenig belastete Messpunkte in der Nähe empfindlicher Ökosysteme (Zigerhüttli, Frübüel und Zugerberg) zeigen im mehrjährigen Jahresmittel eine Überschreitung des Critical Levels von 1 µg m⁻³ für empfindliche Moose und Flechten.

Die Trendberechnungen für die Messgebiete im Kanton Luzern zeigen eine **Zunahme der Ammoniakkonzentration** in den Messgebieten Eschenbach, Neudorf und Holderhus (+0.19 / +0.12 / +0.16 µg m⁻³ a⁻¹, statistisch signifikant) bzw. Schüpfheim (+0.06 µg m⁻³ a⁻¹, nicht statistisch signifikant). Die Messgebiete des Zentralschweizer Ressourcenprojekts mit Daten ab 2010 zeigen **langfristig gleichbleibende Tendenzen**, wobei kein Messgebiet eine statistisch signifikante Zu- oder Abnahme der Ammoniakkonzentration zeigt. Von den fünf Messpunkten in der Nähe von empfindlichen Ökosystemen im Kanton Zug zeigen zwei gleichbleibende Ammoniakimmissionen (Inwil, Zugerberg). Die Messpunkte Frauental, Zigerhüttli und Frübüel verzeichnen langfristig eine statistisch signifikante Zunahme (+0.07 / +0.06 / +0.07 µg m⁻³ a⁻¹).

Sowohl Witterungsschwankungen als auch die reduzierte Feinstaubbildung können gemäss Modellierungen die langfristigen positiven Trends nur teilweise erklären. Gemäss der aktuellen Datenlage muss also davon ausgegangen werden, dass die **Verringerung der Ammoniakemissionen rund um mehrere Messpunkte, vor allem im Kanton Luzern, zu gering** ist, um die Ammoniakimmissionen ganzjährig und langfristig zu senken. Es ist daher angebracht, die **Tierzahlen** im Umkreis der Messpunkte zu untersuchen, bei **Baugesuchen von Ställen** auf emissionsmindernde Massnahmen zu achten und weitere Massnahmen zu verfügen.

Um die Zielerreichung der verschiedenen Massnahmenpläne und Ressourcenprojekte zu prüfen ist es dringend notwendig, in den nächsten Jahren die Messungen an möglichst vielen Standorten weiterzuführen.

¹Es werden nur gültige Jahresmittelwerte verwendet. Die beiden neueren Messgebiete Uri Nord und Ausserschwyz sind nicht in die Berechnung des Faktors mit eingeflossen.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	4
1.1	Emissionen und Immissionen	5
1.2	Auswirkungen von Ammoniak	7
1.3	Landwirtschaft in der Zentralschweiz	8
1.4	Politische Einbettung und Massnahmen	9
2	Methodik	12
2.1	Übersicht der Messungen in der Zentralschweiz	13
2.2	Messperioden aller Messpunkte	14
2.3	Richtwerte und Beurteilung	17
3	Resultate	18
3.1	Meteorologie 2022	18
3.2	NH ₃ -Belastung	19
3.2.1	Mittlerer Jahresgang	19
3.2.2	Mehrjahresmittelwerte	20
3.2.3	Verlauf der Ammoniakkonzentration	23
3.2.4	Monatsbeiträge zur Gesamtbelastung	27
3.3	Trendanalyse	28
3.3.1	Jahresmittel-Trends nach Messgebieten	28
3.3.2	Jahresmittel-Trends nach Messpunkten	32
4	Diskussion und Schlussfolgerungen	35
5	Anhang	37
5.1	Detaillierte Standortbeschreibungen	37
5.1.1	Wauwil, Luzern	37
5.1.2	Eschenbach, Luzern	38
5.1.3	Neudorf, Luzern	38
5.1.4	Schüpfheim, Luzern	39
5.1.5	Holderhus, Luzern	39
5.1.6	Root Michaelskreuz, Luzern	40
5.1.7	Nidwalden	40
5.1.8	Uri	41
5.1.9	Obwalden	42
5.1.10	Schwyz	42
5.1.11	Zug	44
5.1.12	Rigi-Seebodenalp (NABEL)	45
5.2	Charakterisierung der Messpunkte	46
5.3	Jahresmittel nach Messgebieten	48
5.4	Jahresgang nach Messgebieten (Mittelung 2018–2022)	50
5.5	Jahresgang im Kanton Uri im Jahr 2022	52
5.6	Trendberechnungen	53
5.6.1	Jahresmittel-Trends nach Messgebieten	53
5.6.2	Jahresmittel-Trends nach Messpunkt	54
5.7	Anmerkungen zur statistischen Analyse	59
5.8	Übersicht über die Messprogramme	60

1 Einleitung

Der Eintrag von Stickstoff durch Ammoniakemissionen (NH_3) in die Umwelt ist gross. Das Reduktionsziel 2017, die Ammoniakemissionen aus der Landwirtschaft auf nationalem Level auf 41 kt NH_3 zu senken, wurde nicht erreicht (Abbildung 1).² Die negativen Umweltwirkungen dieser Emissionen sind beträchtlich. Eine Studie im Auftrag des BAFU zeigte, dass die Stickstoffeinträge - von welchen Ammoniak aus der Landwirtschaft rund zwei Drittel ausmacht - in naturnahe Wiesen, Wälder und Moore vielerorts zu hoch sind. Bei mehr als 90 % der Wälder und bei rund 70 % der (halb)natürlichen Ökosysteme wurden im Jahr 2010 die Critical Loads für Stickstoff überschritten.³ Der gesamtschweizerische Ammoniak-Immissionsmessbericht kommt weiter zum Schluss, dass die Ammoniakkonzentrationen seit dem Jahr 2000 weder zu- noch abgenommen haben (Abbildung 2).⁴

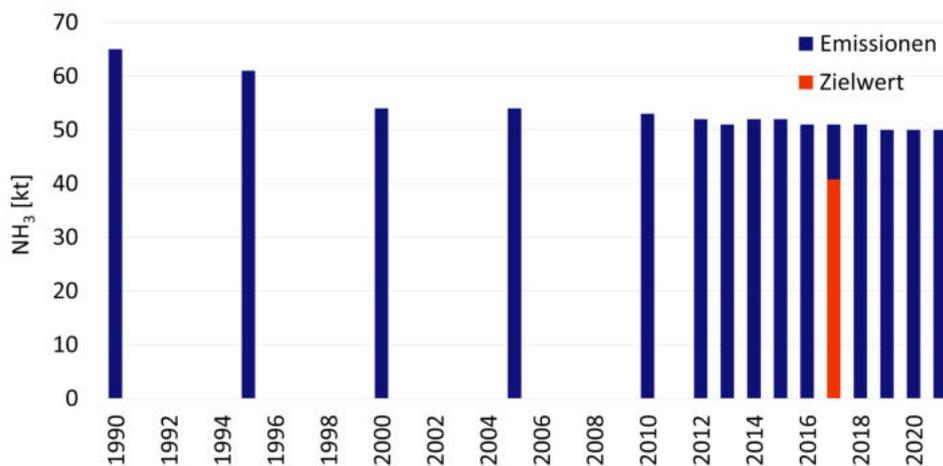


Abbildung 1: Ammoniakemissionen aus der Landwirtschaft in der Schweiz von 1990 bis 2021.⁵ Der rote Balken zeigt den vom BAFU kommunizierten Zielwert für 2017.

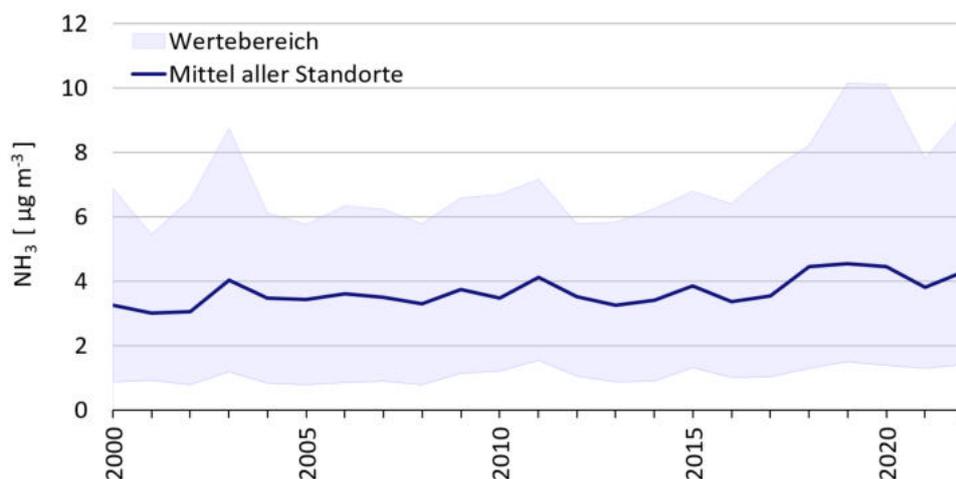


Abbildung 2: Jahresmittel der Ammoniakkonzentrationen von 13 Immissions-Messstandorten in der Schweiz, an denen seit 2000 durchgehend gemessen wird.

²Seitler, E., Meier, M., Ehrenmann, Z. (2021): Atmosphärische Stickstoff-Deposition in der Schweiz 2000 bis 2019. FUB-Forschungsstelle für Umweltbeobachtung.

³Rihm, 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: 78p.

⁴Seitler, E. und Meier, M.(2021). Ammoniak-Immissionsmessungen in der Schweiz von 2000 bis 2020. Messbericht. FUB-Forschungsstelle für Umweltbeobachtung.

⁵Bass, A.-A., Guillevic, M., Leuenberger, D., Müller, B., Schenker, S. (2023). Switzerland's informative inventory report 2023 (IIR): Submission under the UNECE Convention on long-range transboundary air pollution. Federal Office for the Environment BAFU. Bern.

1.1 Emissionen und Immissionen

In der Schweiz haben zwei Drittel der Stickstoffeinträge in empfindliche Ökosysteme ihren Ursprung in Ammoniakemissionen aus der Landwirtschaft.⁶ Dieser Sektor trägt 94 % zu den gesamten Ammoniakemissionen bei. Innerhalb der Landwirtschaft macht die Tierproduktion mit 93 % am meisten der Emissionen aus. Diese entstehen hauptsächlich beim Ausbringen von Gülle und Mist (44 %), im Stall und Laufhof (36 %) sowie beim Lagern von Dünger (11 %).⁷

Im Jahr 2021 betragen diese Ammoniakemissionen aus der Landwirtschaft landesweit 41.3 kt NH₃-N bzw. 50.1 kt NH₃ (Abbildung 1).⁷ Von 1990 bis 2003 nahmen die Emissionen zuerst ab, danach bis 2008 leicht zu und sind seither wiederum leicht rückläufig. Diese Schwankungen sind laut dem Inventory Report des BAFU zurückzuführen auf die Reduzierung der Tierbestände, Veränderungen in der Stallbauweise und der Produktionsart (Zunahme von Laufställen und Auslauf bei Schweinen) sowie einer Erhöhung der Produktivität.⁸ Kupper (2022) vermerkt, dass Faktoren, welche zu einer Emissionszunahme bzw. -abnahme führen, sich zwischen 1990 und 2020 weitgehend gegenseitig aufgehoben haben.

Emissionen und Immissionen hängen jedoch nicht linear zusammen, weil verschiedene physikalische und chemische Prozesse mitspielen. Trotz der komplexen Beziehung zwischen Emissionen und Immissionen können Hypothesen aufgestellt werden, z. B. über die Ursachen der typischen Jahresgangkurven (Kapitel 3.2.1).

Auf der Seite der Emissionen gibt es einerseits konstante und andererseits zeitlich variable Quellen. Zu den **konstanten Quellen** gehören u.a. diejenigen aus Stall und Lagerung, welche auch im Winter und in der Nacht emittieren. Diese nächtlichen Emissionen können wegen bodennahen Inversionen geringer Mächtigkeit die Ammoniakkonzentrationen in der Umgebung stärker beeinflussen, als am Tage und in den warmen Monaten emittierte Frachten, die sich durch atmosphärische Turbulenzen rascher verdünnen.

Zur Reduktion von Ammoniakemissionen aus diesen konstanten Quellen gibt es verschiedene mögliche Massnahmen. Grundsätzlich entsteht Ammoniak im Stall durch die sogenannte Harnstoff-Hydrolyse, wenn der Stickstoff aus dem Urin mit Mikroorganismen aus dem Tierkot gemischt wird.⁹ Die zeitliche Dauer und das Ausmass von Verschmutzungen in einem Stall sollten also möglichst minimiert werden, was mit entsprechenden baulichen Massnahmen erreicht werden kann. In einem Kuhstall kann beispielsweise der Fressbereich erhöht und mit Abtrennbügel gestaltet werden. Laufflächen mit einem leichten Quergefälle lassen den Harn schneller abfließen. Ein Entmistungsroboter kann regelmässig den Kot entfernen. Diese Massnahmen wirken sich nicht nur auf die Ammoniakemissionen aus, sondern auch auf das Tierwohl, da Kühe so trockene Klauen haben. Ein solcher Musterstall wurde 2023 in Merlischachen SZ der Öffentlichkeit vorgestellt.^{10 11 12} Bei Schweine- und Geflügelställen kann neben weiteren baulichen Massnahmen eine Abluftreinigungsanlage eingebaut werden.¹³

Um die Ammoniakemissionen aus der Güllelagerung zu reduzieren, müssen die Lager laut Gesetzgebung mit einer Folie, einem Zeltdach oder einer festen Abdeckung aus Beton oder Holz abgedeckt werden (Kapitel 1.4).¹⁴

⁶BAFU (2022). Stickstoffhaltige Luftschadstoffe beeinträchtigen auch die Biodiversität. <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/luft/fachinformationen/luftqualitaet-in-der-schweiz/stickstoffhaltige-luftschadstoffe-beeintraechtigen-auch-die-biod.html>. Letzter Zugriff: 21.04.2023.

⁷Kupper, Th., Häni, Ch., Bretscher, D., Zaucker, F. (2022). Ammoniakemissionen der schweizerischen Landwirtschaft 1990 bis 2020. Berner Fachhochschule. Schweizer Bundesamt für Umwelt.

⁸Bass, A.-A., Kegel, R., Leuenberger, D., Müller, B., Schenker, S. (2021). Switzerland's informative inventory report 2021 (IIR): Submission under the UNECE Convention on long-range transboundary air pollution. Federal Office for the Environment BAFU. Annex 7.4.1. Bern.

⁹Sigurdarson, J.J., Svane, S., Karring, H. (2018). The molecular processes of urea hydrolysis in relation to ammonia emissions from agriculture. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*. 17:241–258. <https://doi.org/10.1007/s11157-018-9466-1>.

¹⁰Umwelt Zentralschweiz (2023). Rindviehstall der Zukunft. <https://www.umwelt-zentralschweiz.ch/was-wir-machen/themen/landwirtschaft/rindviehstall-der-zukunft/>. Letzter Zugriff: 10.05.2023.

¹¹Gerlach, M. (2023). Zentralschweizer Leuchtturmprojekt. Schweizer Bauer. https://www.ammoniak.ch/files/Bilder/Zimmermann/SchweizerBauer_Zimmermann_Merlischachen.pdf. Letzter Zugriff: 04.05.2023.

¹²Scherer, J. (2023). Dünger sparen und Umwelt schonen. Bauernzeitung. https://www.ammoniak.ch/files/Bilder/Zimmermann/Bauernzeitung_Zimmermann_Merlischachen.pdf. Letzter Zugriff: 04.05.2023.

¹³Rentsch, D. (2022). Luft waschen im Schweinestall: Teuer, aber effektiv. <https://www.diegruene.ch/artikel/tierhaltung/luft-waschen-im-schweinestall-teuer-aber-effektiv-435446>. Letzter Zugriff: 04.05.2023.

¹⁴Spuhler, M., Fischler, M., Mettler, R., Stadelmann, F., Bucheli, M. (2022). Abdeckung von Güllelagern zur Reduktion von Emissionen. Merkblatt von KOLAS und KVV. AGRIDEA.

Zu den zeitlich **variablen Quellen** von Ammoniak gehört das Ausbringen von Gülle und Mist. Diese Emissionsquelle ist auf die Vegetationsperiode beschränkt (Kapitel 1.3) und hat - je nach **Wetterbedingungen** - einen unterschiedlichen Einfluss auf die Immissionskonzentration der Umgebung. Optimalerweise wird Gülle mit einem Schleppschauch bei kühlen und feuchten Bedingungen ausgebracht, damit die Nährstoffe in den Wurzelbereich der Pflanzen transportiert werden, was den direkten Luftkontakt und das Ausgasen gemäss Henry-Gesetz reduzieren soll.¹⁵ Dieses sagt voraus, dass eine Erhöhung der Temperatur von 1 °C theoretisch zu einem Ammoniakanstieg von 13 % in der Luft führt. In der Realität ist die Verflüchtigung jedoch komplexer. Es wurde beispielsweise beobachtet, dass sich Ammoniak ab 15 °C nicht vermehrt verflüchtigt, da sich auf der ausgebrachten Gülle Krusten bilden. Dies wiederum hängt vom Gehalt der Trockenmasse in der Gülle ab.¹⁶

Philipp & Locher (2010) und Grange et al. (2023) haben durch Modellierungen herausgefunden, dass die jährliche Variabilität der gemessenen Ammoniakkonzentrationen unter anderem auf Witterungsschwankungen zurückzuführen ist. Die monatliche Abweichung vom 10-jährigen Mittel der Temperatur, Anzahl Trockentage und der Windgeschwindigkeit ist entscheidend für die gemessene NH₃-Immission: "Die NH₃-Immissionen steigen [...] mit steigender Lufttemperatur und Erhöhung der mittleren Anzahl Trockentage und sinken mit zunehmendem Wind".¹⁷ Grange et al. (2023) berechneten, dass bei identischen Ammoniakemissionen der Einfluss des Wetters die gemessene Immission um bis zu einem Drittel verändern kann.¹⁸ Doch auch wenn in der Studie die Ammoniakimmissionen um den Witterungseinfluss bereinigt werden, zeigten sich zwischen 2000 und 2021 an 17 von 32 Messpunkten signifikant zunehmende Trends, unter anderem auch an den Zentralschweizer Messpunkten.

Eine weitere Erklärung für diese Zunahme in wetterbereinigten langjährigen Ammoniakkonzentrationen ist, dass Ammoniak in der Luft weiter mit Salpeter- und Schwefelsäure reagiert, was zur **sekundären Bildung von Feinstaubpartikeln** führt. Diese Säuren werden ihrerseits aus NO_x und Schwefeldioxid (SO₂) gebildet. Sinken die Emissionen der Vorläuferstoffe, verbleibt mehr Ammoniak in der Luft. Diese kontinuierliche Reduktion war in der Schweiz in den letzten drei Jahrzehnten der Fall, was als grosser Erfolg in der Luftreinhaltung angesehen wird. Modellrechnungen zeigen, dass die NH₃-Konzentration in der Schweiz heute im jährlichen Mittel um 0.9 µg m⁻³ tiefer wäre, wenn die Emissionen von NO_x und SO₂ heute noch auf dem Niveau von 2004 wären.⁶⁸ Auf die Interpretation dieser Studie aus Sicht der Zentralschweiz wird in der Diskussion in Kapitel 4 weiter eingegangen.

¹⁵Latsch, A., Richner, W., Anken, Th., Sauter, J. (2017). Ausbringtechnik bei Hof-, Recycling- und Mineraldüngern. Kapitel 5 in: Richner, W., Sinaj, S. (2017). Grundlagen für die Düngung landwirtschaftlicher Kulturen in der Schweiz (GRUD 2017). Agrarforschung Schweiz 8(6).

¹⁶Pedersen, J., Nyord, T., Feilberg, A., Labouriau, R. (2021). Analysis of the effect of air temperature on ammonia emission from band application of slurry. Environmental Pollution. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.117055>

¹⁷Philipp, M., & Locher, R. (2010). Trendanalyse NH₃-Immissionsmessungen in der Schweiz (S. 38). Winterthur: Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften.

¹⁸Grange, S. K., Sintermann, J. & Hueglin, C. (2023). Meteorologically normalised long-term trends of atmospheric ammonia (NH₃) in Switzerland/Liechtenstein and the explanatory role of gas-aerosol partitioning. Science of The Total Environment, 900, 165844. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.165844>

1.2 Auswirkungen von Ammoniak

Ammoniak führt auf lokaler bis globaler Ebene zu Umwelt- und Gesundheitsproblemen. Generell wird beim Ammoniaktransport Stickstoff (N) über die Luft verfrachtet. Die hohen Stickstoffeinträge führen in empfindlichen Ökosystemen zu einem Verlust der Artenvielfalt (Abbildung 3). Zudem resultiert diese Überdüngung in einer beschleunigten Versauerung der Böden sowie einer Auswaschung von Nitrat ins Grundwasser. Nebst dem negativen Einfluss auf Ökosysteme nach der Deposition trägt Ammoniak in der Luft in Reaktion mit Säuren wesentlich zur Bildung von sekundärem Feinstaub bei (Abbildung 3) und hat somit negative Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit.¹⁹ Schliesslich ist Lachgas (N₂O), welches durch chemische Transformation von Ammoniak entstehen kann, ein klimawirksames Gas mit einem Treibhausgaspotential von 273 CO₂-eq.^{20 21}

Damit haben Ammoniakemissionen, welche meist aus der Landwirtschaft stammen, gemäss dem Konzept der planetaren Grenzen gleich auf mehrere natürliche Systeme negative Auswirkungen.²² Dazu gehört der Stickstoffkreislauf, der Klimawandel, die Biodiversität und die atmosphärische Aerosolbelastung. Zusätzlich entstehen durch die Bildung von Ammoniak Geruchsimmissionen, die von der lokalen Bevölkerung oftmals als störend empfunden werden.

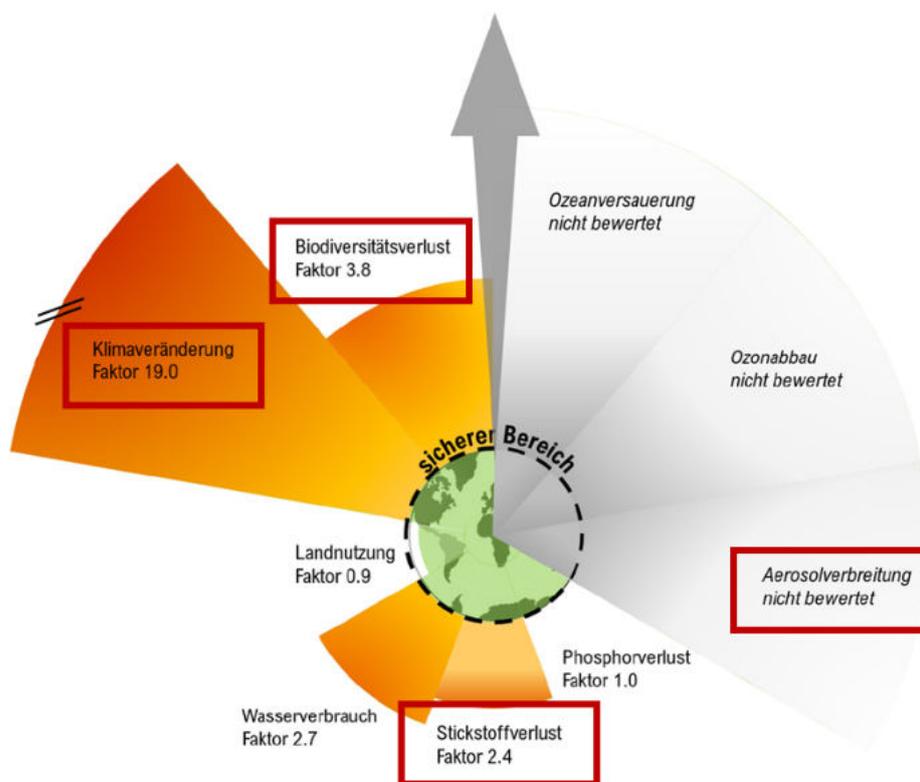


Abbildung 3: Ammoniakemissionen aus der Landwirtschaft haben im Konzept der planetaren Grenzen gleich auf mehrere natürliche Systeme negative Auswirkungen.²³ Dazu gehört der Stickstoffkreislauf, der Klimawandel, die Biodiversität und die atmosphärische Aerosolbelastung.

¹⁹Swiss TPH (2023). Interaktive Grafik zu den Auswirkungen der Luftverschmutzung auf die Gesundheit. <https://www.swisstph.ch/de/projects/ludok/healtheffects/>. Letzter Zugriff: 25.04.2023.

²⁰Das heisst, dass Lachgas (N₂O) bezüglich Treibhauswirkung 273 Mal so schädlich ist wie die gleiche Menge CO₂.

²¹IPCC (2021). The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. Table 7.SM.7

²²Rockstrom, J., Steffen, W., Noone, K., Persson, A., Chapin, F. S., 3rd, Lambin, E. F., Lenton, T. M., Scheffer, M., Folke, C., Schellnhuber, H. J., Nykvist, B., de Wit, C. A., Hughes, T., van der Leeuw, S., Rodhe, H., Sorlin, S., Snyder, P. K., Costanza, R., Svedin, U., Falkenmark, M., Karlberg, L., Corell, R. W., Fabry, V. J., Hansen, J., Walker, B., Liverman, D., Richardson, K., Crutzen, P. & Foley, J. A. (2009). A safe operating space for humanity. Nature 461(7263): 472-475.

²³Greenpeace Schweiz (2023). Transformation zu einem sozialgerechten Leben innerhalb der planetaren Grenzen. econcept.

1.3 Landwirtschaft in der Zentralschweiz

Die topografischen und meteorologischen Bedingungen in der Zentralschweiz führen zu einem vergleichsweise hohen Anteil an Grasland und Weiden in der landwirtschaftlichen Nutzung. Einzig die Kantone Zug und Luzern zeigen bedeutende Anteile an Ackerland (Abbildungen 4 und 5). Auf den Kunst- oder Naturwiesen mit 50–70 % Gräsern, 10–30 % Leguminosen (Stickstofffixierer) und 10–30 % Kräutern wächst qualitativ hochwertiges Futter für das Vieh.

Tierhaltung ist ein essenzieller Bestandteil der Zentralschweizer Landwirtschaft. Flächen in der Bergzone, welche nicht für Ackerbau geeignet sind, können durch die Tierhaltung, insbesondere Rinder und Milchkühe, nutzbar gemacht werden. Der Kanton Luzern fällt ausserdem durch eine hohe Anzahl von Schweinen auf (Abbildung 6).

Die Wiesen werden in der (Zentral-)Schweiz vor allem mit dem anfallenden Hofdünger wie Gülle gedüngt, und zwar nach jedem Schnitt. Die erste Gabe (Andüngung) im Frühling erfolgt ebenfalls mit Gülle oder mit Kunstdünger, welcher einen hohen Anteil an schnell verfügbarem Stickstoff enthält. Je nach Höhenlage und Nutzungsintensität folgen 2–4 Stickstoffgaben zwischen ca. Mai und November.²⁴

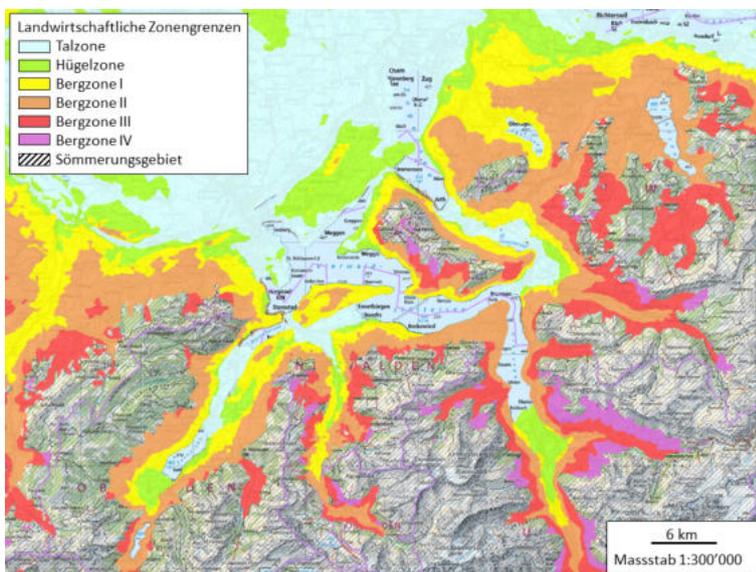


Abbildung 4: Landwirtschaftszonen in der Zentralschweiz. Im Unterschied zum Mittelland ist viel Fläche als Hügel- und Bergzone klassifiziert, welches von grosser Bedeutung für die landwirtschaftliche Nutzung ist.²⁵

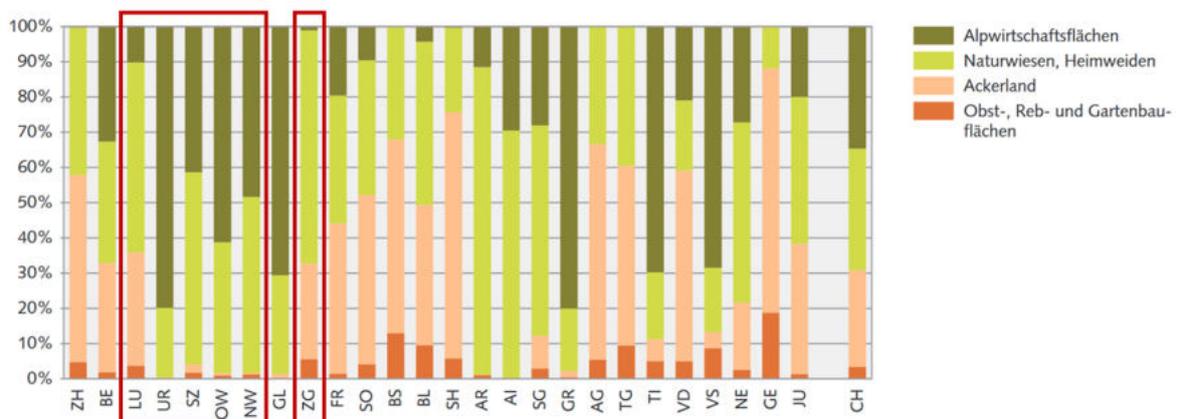


Abbildung 5: Landwirtschaftliche Nutzung in den verschiedenen Kantonen der Schweiz. Rot markiert sind die Kantone der Zentralschweiz, welche in diesem Bericht behandelt werden.²⁶

²⁴Huguenin-Elie, O., Mosimann, E., Schlegel, P., Lüscher, A., Kessler, W., Jeangros, B. (2017). Düngung von Grasland. Kapitel 9 in: Richner, W., Sinaj, S. (2017). Grundlagen für die Düngung landwirtschaftlicher Kulturen in der Schweiz (GRUD 2017). Agrarforschung Schweiz 8(6).

²⁵Swisstopo (2022). Landwirtschaftliche Zonengrenzen. Letzter Zugriff: 11.07.2022.

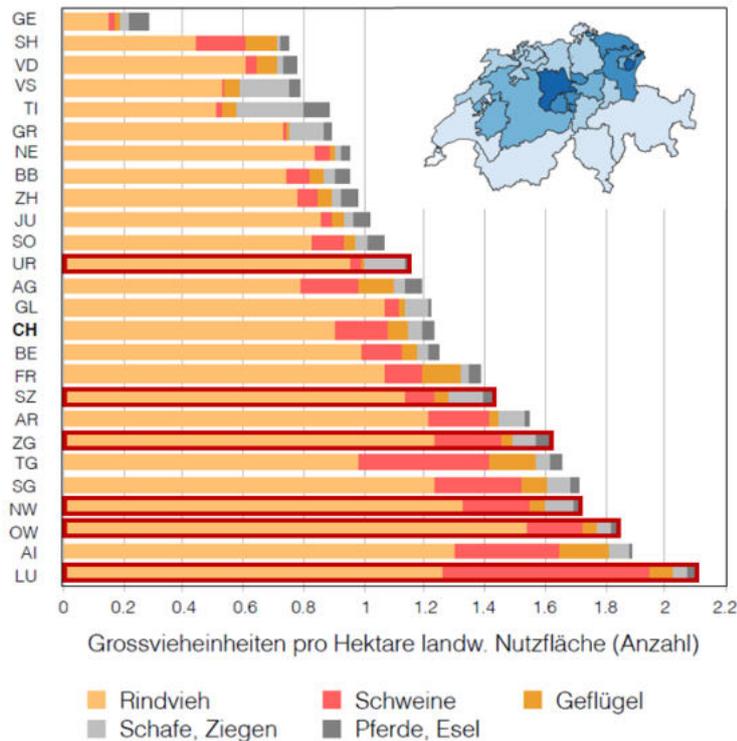


Abbildung 6: Tierzusammensetzung und -bestand in Grossvieheinheiten (GVE) aus dem Jahr 2019 in den verschiedenen Kantonen der Schweiz. Rot markiert sind die Kantone der Zentralschweiz, welche in diesem Bericht behandelt werden. Eine Milchkuh wird mit einer GVE angerechnet, eine Zuchtsau mit 0.55 GVE.²⁷

1.4 Politische Einbettung und Massnahmen

Seit 2008 kann der Bund Massnahmen zur Senkung von Ammoniakemissionen in den Kantonen finanziell unterstützen (Ressourcenprogramme bzw. auf sechs Jahre beschränkte Anreizprogramme nach Art. 77a und 77b Landwirtschaftsgesetz). In diversen Kantonen sind Projekte zur Reduktion der Ammoniakemissionen und dem effizienteren Einsatz von Stickstoff lanciert worden. Jedes dieser Projekte enthält verschiedene Massnahmen zur Reduktion der Ammoniakverluste in der Landwirtschaft. Eine grafische Übersicht über alle Programme ist im Anhang sichtbar (Abbildung 28).

Im Kanton Luzern wurde 2007 der erste Massnahmenplan zur Reduktion der Ammoniakbelastung von der Regierung verabschiedet. Das Reduktionsziel für 2020 von 20 % (Referenzjahr 2000) wurde jedoch verfehlt, weil die Zielkonflikte mit dem Tierwohl nicht gelöst werden konnten. Beispielsweise verlangen die beiden Programme des Bundesamtes für Landwirtschaft für "besonders tierfreundliche Haltung"(BTS) und "regelmässiger Auslauf im Freien"(RAUS), dass die Tiere in Laufställen und -höfen gehalten werden, wo sie sich frei bewegen können. Damit kommt es aber zu mehr verschmutzten Flächen und dadurch zu mehr Ammoniakverlusten als in einem herkömmlichen Anbindestall (Kapitel 1.1). Mit dem zweiten Massnahmenplan aus dem Jahr 2020 sollen die Ammoniakemissionen aus der Luzerner Landwirtschaft bis 2030 gegenüber dem Basisjahr 2014 um 20 % reduziert werden.²⁸ Zusätzlich zum Massnahmenplan wurde im Kanton Luzern zwischen 2009 und 2014 das Ressourcenprojekt «Stickstoff zur Reduktion der Ammoniakverluste und Erhöhung der einzelbetrieblichen Stickstoff-Effizienz» umgesetzt.

Die Kantone Uri, Schwyz, Nidwalden, Obwalden und Zug führten zwischen 2010 und 2015 gemeinsam das Ressourcenprojekt «Ammoniak Zentralschweiz» durch. Im Kanton Zug wurde in der Folge der Massnahmenplan «Am-

²⁶Bundesamt für Statistik (2015). Die Bodennutzung in der Schweiz. Auswertungen und Analysen. 02 Raum und Umwelt, 002-0905. Neuchâtel.

²⁷Vision Landwirtschaft (2021). Landwirtschaft und Umwelt in den Kantonen. https://www.visionlandwirtschaft.ch/de/themen/agrarpolitik-und-direktzahlungen/landwirtschaft_und_umwelt_in_den_kantonen/. Letzter Zugriff: 05.05.2023.

²⁸uwe Luzern (2023). Ammoniak und Massnahmenplan II. <https://uwe.lu.ch/themen/luft/ammoniak>. Letzter Zugriff: 04.05.2023.

moniak 2016 bis 2030» erarbeitet und verabschiedet.²⁹ Seit 2021 läuft in der ganzen Zentralschweiz ein neues Ressourcenprojekt zur Reduktion der Ammoniak- und Geruchsemissionen.³⁰ Das Projekt hat zum Ziel, den Konflikt um Geruchsemissionen zu lösen. Dabei ist Hohenrain LU die erste Gemeinde, die am Projekt teilnimmt. Weiter sollen Lösungen zur Reduktion der Ammoniakemissionen in der Landwirtschaft gefunden werden.

Im Dezember 2015 publizierte das BAFU den Statusbericht der «Umweltziele Landwirtschaft». Darin werden die landesweiten Entwicklungen der Umweltziele seit 2008 erörtert und aufgezeigt, welcher Handlungsbedarf weiterhin besteht. Im Bereich Ammoniak wurde folgendes nationale Umweltziel festgelegt: „Die Ammoniakemissionen aus der Landwirtschaft betragen maximal 25 kt N/Jahr.“ Die Agrarpolitik 2014–2017 hatte als nationales Etappenziel 2017 eine Einschränkung der Ammoniakemissionen auf 41 kt vorgesehen. Dieses Ziel wurde deutlich verfehlt (Abbildung 1). Drei Massnahmenpakete der allgemeinen Agrarpolitik 2014–2017 sollten zum Erfolg dieses Projektziels beitragen: Die Aufhebung der allgemeinen Tierbeiträge, die Einführung von HODUFLU³¹ und die Einführung von Ressourceneffizienzbeiträge für emissionsarme Ausbringtechniken³².

Am 18.10.2017 verabschiedete der Bundesrat ein vielfältiges landwirtschaftliches Verordnungspaket für die neue Zahlungsrahmenperiode 2018–2021. Im neuen Verordnungspaket wird für die stickstoffreduzierte Phasenfütterung bei Schweinen ein weiterer Ressourceneffizienzbeitrag eingeführt.

In der Strategie der Agrarpolitik 22+ (AP22+) sind Massnahmen gegen Nährstoffverluste enthalten, so zum Beispiel ein effizienter Stickstoff-Einsatz inkl. Reduktion der Ammoniakemissionen. Im Frühling 2021 sistierten jedoch sowohl Stände- als auch der Nationalrat die Verhandlungen zur AP22+. Die Beratungen werden frühestens im Frühling 2023 wiederaufgenommen.³³ Jedoch wurde kurz darauf ein Absenkpfad für Stickstoffverluste aus der Landwirtschaft von 20 % bis 2030 festgelegt.³⁴ Dazu müssen emissionsarme Ausbringtechniken vermehrt angewendet werden. Mit Inkrafttreten der revidierten Luftreinhalte-Verordnung wollte der Bundesrat ab 2022 ein Schleppschlauch-Obligatorium einführen. Dieses wurde unter anderem wegen Lieferengpässen der entsprechenden Maschinen auf 2024 verschoben.³⁵ Um die Ammoniakemissionen aus der Güllelagerung zu reduzieren, müssen die Lager laut Gesetzgebung mit einer Folie, einem Zeltdach oder einer festen Abdeckung aus Beton oder Holz abgedeckt werden.³⁶

Weiter wurde von den beiden Räten beschlossen, dass in der Suisse-Bilanz der erlaubte Fehlerbereich von (plus) 10 % ab 2024 aufgehoben wird. Das heisst, dass eine betriebliche Nährstoffbilanz neu höchstens bei 100 % liegen darf, um die entsprechenden Direktzahlungen zu bekommen.³⁷ Auch die Offenlegungspflicht der Futter- und Düngemittellieferungen soll dem gesetzten Reduktionsziel beitragen. Durch diese Mitteilungspflicht für Abgeber von Mineraldünger und Kraftfutter, analog zu Gülledaten im HODUFLU, werden Nährstoffflüsse transparent und digital ausgewiesen, womit die Bilanzrechnungen genauer werden.³⁸

Grundsätzlich wird von politischer und wissenschaftlicher Seite gefordert, dass die Suisse-Bilanz und deren Grundlagen überarbeitet werden. Neu soll der Standort, der Futterverzehr und das Ertragspotential der Kulturen besser berücksichtigt werden. Letzteres ist in den vergangenen Jahren deutlich gestiegen, z. B. durch deutlich verlängerte Vegetationsperioden, Fortschritte in der Sortenzucht und neuen Qualitätsanforderungen beim Proteingehalt des Brotgetreides. Deshalb kommt es zu grossen Unterschieden zwischen den geltenden Grundlagen und heutiger

²⁹(2016). Massnahmenplan Ammoniak 2016 - 2030 Kanton Zug. <https://zg.ch/dam/jcr:ed081744-fec4-4dfb-8d67-cbae92af2507/Massnahmenplan%20Ammoniak%20Kanton%20Zug%202009-04-2016.pdf>. Letzter Zugriff: 04.05.2023.

³⁰Umwelt Zentralschweiz (2023). Ammoniak und Gerüche in der Landwirtschaft reduzieren. <https://www.umwelt-zentralschweiz.ch/was-wir-machen/news/ammoniak-und-gerueche-in-der-landwirtschaft-reduzieren/>. Letzter Zugriff: 04.05.2023.

³¹HODUFLU ist ein Internetprogramm zur einheitlichen Verwaltung von Hof- und Recyclingdüngerverschiebungen in der Landwirtschaft.

³²BAFU und BLW (2016): Umweltziele Landwirtschaft. Statusbericht 2016. Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt-Wissen Nr. 1633: 114 S.

³³Bundesamt für Landwirtschaft (2022). AP 22+. <https://www.blw.admin.ch/blw/de/home/politik/agrarpolitik/ap22plus.html>. Letzter Zugriff: 25.04.2023.

³⁴Agripedia (2023). Massnahmen Nährstoffe. <https://agripedia.ch/focus-ap-pa/de/massnahmen-naehrstoffe/>. Letzter Zugriff: 25.04.2023.

³⁵Schweizer Bauer (2021). Schleppschlauchpflicht auf 2024 verschoben. <https://www.schweizerbauer.ch/politik-wirtschaft/agrarpolitik/schleppschlauchpflicht-auf-2024-verschoben/>. Letzter Zugriff: 25.04.2023.

³⁶Spuhler, M., Fischler, M., Mettler, R., Stadelmann, F., Bucheli, M. (2022). Abdeckung von Güllelagern zur Reduktion von Emissionen. Merkblatt von KOLAS und KVV. AGRIDEA.

³⁷Agripedia (2022). Was gilt neu im OLN? Massnahmenpaket für eine nachhaltigere Landwirtschaft.

³⁸Amadruz, C., Hegglin, P., Levrat, Ch., Müller, L. (2021). Anpassung der Suisse-Bilanz und deren Grundlagen an die effektiven Verhältnisse. Motion im Schweizer Ständerat 21.3004 vom 18.01.2021, Kommission für Wirtschaft und Abgaben SR. <https://www.parlament.ch/de/ratsbetrieb/amtliches-bulletin/amtliches-bulletin-die-verhandlungen?SubjectId=56606>. Letzter Zugriff: 25.04.2023.

Praxis.³⁹ ⁴⁰ Auch wurde aus Forschungskreisen bemängelt, dass organischer Stickstoff, z. B. in Form von Gülle, nur teilweise angerechnet wird. Vom gesamten Anfall von Stickstoff fliesst nur ca. die Hälfte (45 % für Ackerbau und 55 % für Futterbau) in die Bilanz mit ein. Es wird angenommen, dass dieser verfügbare Stickstoff im Jahr der Ausbringung von den Pflanzen aufgenommen wird. Der Rest wird als Verlust betrachtet oder zu einem späteren Zeitpunkt im Boden mineralisiert. Allerdings taucht der Anteil an mineralisiertem Stickstoff in den Folgejahren nicht mehr in der Bilanz auf.⁴¹ Weiter richten sich die in der Suisse-Bilanz verwendeten Richtwerte nur nach dem Pflanzenbedarf und dem betrieblichen Bewirtschaftungspotential. Überlegungen zu bereits genannten negativen Umweltauswirkungen fliessen nicht in die Berechnungen mit ein.⁴²

³⁹Amaudruz, C., Hegglin, P., Levrat, Ch., Müller, L. (2021). Anpassung der Suisse-Bilanz und deren Grundlagen an die effektiven Verhältnisse. Motion im Schweizer Ständerat 21.3004 vom 18.01.2021, Kommission für Wirtschaft und Abgaben SR. <https://www.parlament.ch/de/ratsbetrieb/suche-curia-vista/geschaeft?AffairId=20213004>.

⁴⁰Schweizer Bauer (2022). Suisse-Bilanz: Anpassung und keine Toleranzgrenze. <https://www.schweizerbauer.ch/politik-wirtschaft/agrarpolitik/suisse-bilanz-anpassung-und-keine-toleranzgrenze/>. Letzter Zugriff: 25.04.2023.

⁴¹Richner, W., Flisch, R., Mayer, J., Schlegel, P., Zähner, M., Manzi, H. (2017). Eigenschaften und Anwendung von Düngern. Kapitel 4, Tabellen 6 und 7 in: Richner, W., Sinaj, S. (2017). Grundlagen für die Düngung landwirtschaftlicher Kulturen in der Schweiz (GRUD 2017). Agrarforschung Schweiz 8(6).

⁴²Wey, H. (2022). Nitrate leaching under arable land: monitoring, mitigation measures and memory effects. Dissertation. Universität Neuchâtel.

2 Methodik

In allen Messnetzen sind jeweils an jedem Messpunkt zwei oder drei Passivsammlerröhrchen in einem Wetterschutzgehäuse montiert (Abbildung 7).

Die Messung der Ammoniakkonzentration erfolgte in früheren Berichten über Radiello-Sammler, seit dem Jahreswechsel 2018/2019 mittels Ferm-Passivsammlern. Die Vergleichsmessungen zeigen, dass die beiden Methoden sehr gut übereinstimmen.⁴³

Pro Messpunkt wird jeweils doppelt (heute) bis dreifach (frühere Messungen) gemessen, um die Messunsicherheit zu verringern.⁴⁴ Alle Messpunkte sind im Anhang im Detail charakterisiert. Die Sammler werden alle vier Wochen gewechselt und von der Forschungsstelle für Umweltbeobachtung (FUB) analysiert. In der Datenaufbereitung werden zuerst ungültige Messwerte entfernt (z. B. durch Beschädigung der Messvorrichtung). Für die Berechnung der Monatsmittelwerte pro Standort werden die Messperioden zeitgewichtet verrechnet. Ein Jahresmittelwert wird nur berücksichtigt, wenn mindestens 11 Monate mit Messungen vorhanden sind.

Ein Vergleich von parallel messenden Radiello-Passivsammlerröhrchen und zwei Wochen Expositionszeit hat gezeigt, dass 90 % der Datenpaare weniger als $0.9 \mu\text{g m}^{-3}$ auseinanderliegen.⁴⁵ Daraus kann eine Unsicherheit (90 %-Bereich) von $0.17 \mu\text{g m}^{-3}$ für einen Jahresmittelwert abgeleitet werden.



Abbildung 7: Ein Ferm-Passivsammler im Einsatz.⁴⁶ Pro Messpunkt werden immer mindestens zwei Messungen durchgeführt und gemittelt, um die Messgenauigkeit zu erhöhen.

⁴³Seitler, E. und Meier, M. (2020). Ammoniak-Immissionsmessungen in der Schweiz von 2000 bis 2019. Messbericht. Abbildung 48, Seite 61.

⁴⁴Dämmgen, U., Thöni, L., Lumpp, R., Gilke, K., Seitler, E., Bullinger, M. (2010). Feldexperiment zum Methodenvergleich von Ammoniak- und Ammonium-Konzentrationsmessungen in der Umgebungsluft, 2005 bis 2008 in Braunschweig. Landbauforschung, Sonderheft 337.

⁴⁵Bucher, P. (2010). Ammoniak-Messbericht. Ammoniak-Messnetz Kanton Luzern, Ergebnisse 2000 bis 2009, uwe Luzern.

⁴⁶Fotos von E. Seitler, FUB

2.1 Übersicht der Messungen in der Zentralschweiz

Seit dem Jahr 2012 erfolgt die Berichterstattung über die Ammoniakmessungen durch die Firma inNET Monitoring AG mit Hauptsitz in Altdorf. Der Ammoniak-Messbericht 2012 wurde im Auftrag der Dienststelle Umwelt und Energie des Kantons Luzern erstellt.⁴⁷ In den Folgejahren wurden gemeinsame Ammoniak-Messberichte für die Zentralschweiz verfasst.^{48 49 50 51 52 53 54 55 56}

Im vorliegenden Bericht werden im Auftrag von Umwelt Zentralschweiz (UZ, vorgängig ZENTRUM bzw. ZUDK) die Ammoniak-Messdaten der gesamten Zentralschweiz bis Ende 2022 im Rahmen des Basisleistungsauftrags (BLA) in-luft ausgewertet.

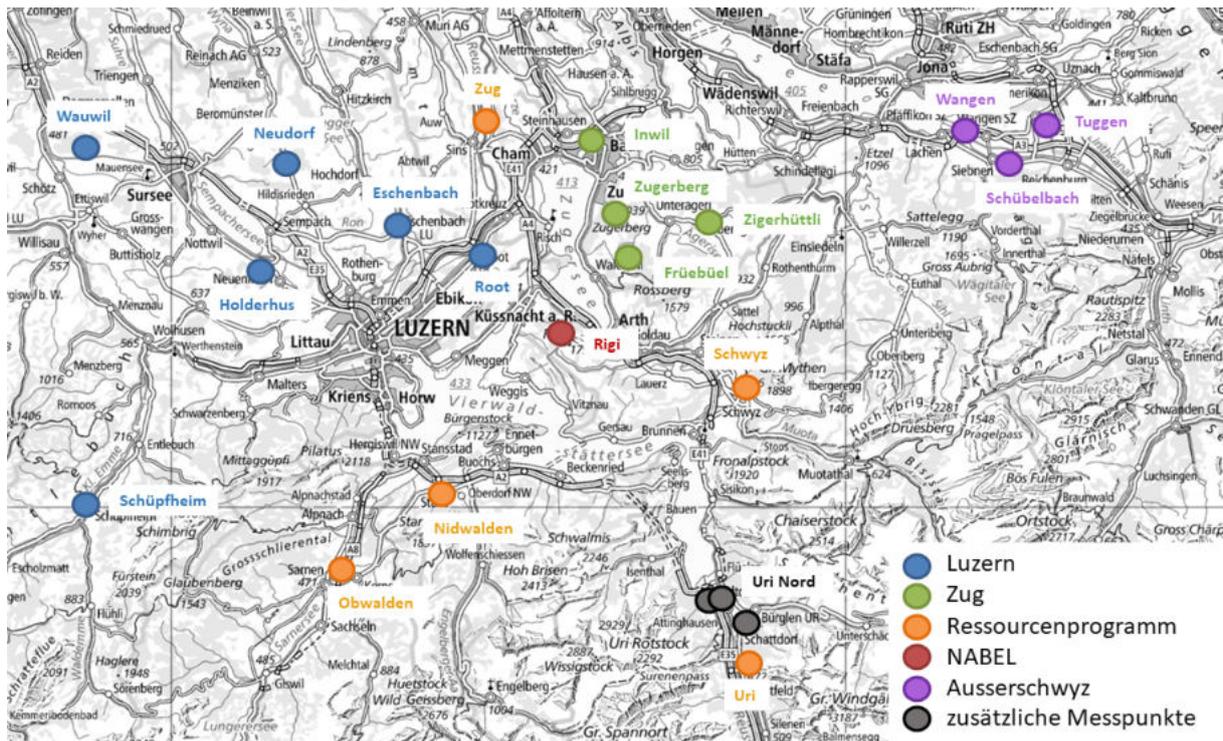


Abbildung 8: Gesamtübersicht der Ammoniakmessungen in der Zentralschweiz: Die Punkte stehen entweder für Messgebiete, in welchen in der Regel mehrere Messpunkte vorhanden sind, oder für einzelne Messpunkte.

⁴⁷Bieri, S., Ruckstuhl, C. (2012). Ammoniak-Messbericht, Ammoniakmessungen Kanton Luzern 2000 bis 2011. inNET Monitoring AG.

⁴⁸Bieri, S., Ruckstuhl, C. (2013). Ammoniak-Messbericht, Ammoniakmessungen in der Zentralschweiz von 2000 bis 2012. inNET Monitoring AG.

⁴⁹Bieri, S., Ruckstuhl, C. (2014). Ammoniak-Messbericht, Ammoniakmessungen in der Zentralschweiz von 2000 bis 2013. inNET Monitoring AG.

⁵⁰Bieri, S., Ruckstuhl, C. (2016). Ammoniak-Messbericht, Ammoniakmessungen in der Zentralschweiz von 2000 bis 2015. inNET Monitoring AG.

⁵¹Bieri, S., Ruckstuhl, C. (2017). Ammoniak-Messbericht, Ammoniakmessungen in der Zentralschweiz von 2000 bis 2016. inNET Monitoring AG.

⁵²Bieri, S., Ruckstuhl, C. (2018). Ammoniak-Messbericht, Ammoniakmessungen in der Zentralschweiz von 2000 bis 2017. inNET Monitoring AG.

⁵³Wey, H., Bieri, S., Ruckstuhl, C. (2019). Ammoniak-Messbericht, Ammoniakmessungen in der Zentralschweiz von 2000 bis 2018. inNET Monitoring AG.

⁵⁴Wey, H., Bieri, S., Ruckstuhl, C. (2020). Ammoniak-Messbericht, Ammoniakmessungen in der Zentralschweiz von 2000 bis 2019. inNET Monitoring AG.

⁵⁵Wey, H., Ruckstuhl, C. (2021). Ammoniak-Messbericht, Ammoniakmessungen in der Zentralschweiz von 2000 bis 2020. inNET Monitoring AG.

⁵⁶Wey, H., Ruckstuhl, C. (2022). Ammoniak-Messbericht, Ammoniakmessungen in der Zentralschweiz von 2000 bis 2021. inNET Monitoring AG.

Im Kanton Luzern sind insgesamt sechs Messgebiete vorhanden. In jedem Messgebiet gibt es mehrere Messpunkte (Abbildung 8). Nachfolgend werden die Messgebiete entsprechend ihrer Örtlichkeit (z. B. Messgebiet Wauwil) benannt.

In den Zentralschweizer Kantonen Nidwalden, Obwalden, Schwyz, Uri und Zug wird die Ammoniakkonzentration pro Kanton meist in einer Geländekammer (definiert als Messgebiet) an drei bzw. zwei (Schwyz ab 2020) Messpunkten gemessen. Nachfolgend werden diese Messgebiete entsprechend ihrer Kantonzugehörigkeit benannt (z. B. Messgebiet Nidwalden). Teilweise wird auf das «Ressourcenprojekt Ammoniak Zentralschweiz» verwiesen, welches von 2010 bis 2015 lief.

Zusätzlich betreibt der Kanton Zug seit 2007 ein kantonales Ammoniakmessnetz mit vier Messgebieten (Abbildung 8). Nachfolgend werden diese Messgebiete entsprechend ihrer Örtlichkeit benannt (z. B. Messgebiet/Messpunkt Zugerberg), meist wird auf «kantonale Passivsammler im Kanton Zug» hingewiesen.

Der Kanton Uri betreibt neben dem Messgebiet bei Erstfeld mit drei Messpunkten seit 2022 ein weiteres Messgebiet mit drei zusätzlichen Messpunkten; nämlich bei der Gartenmatt, beim Schloss Apro und in der Ebene zwischen Bürglen und Schattdorf. Die Messgebiete werden Uri (ursprüngliches Messgebiet) und Uri Nord (neuere Messpunkte) genannt.

Der Kanton Schwyz betreibt, zusätzlich zu den Messpunkten des Messgebietes (Inner-)Schwyz, drei weitere in der Region Ausserschwyz. Dabei sind die Messpunkte bei Tuggen und Schübelbach seit 2019 in Betrieb. Bei Wangen wird seit 2014 mit Unterbruch im Jahre 2018 gemessen. 2021 gibt es für WAN01 und SCHUB01 keine gültigen Jahresmittelwerte, da die Stationen verschoben werden mussten (Unterkapitel 2.2).

Sowohl das nationale als auch das Zentralschweizer Ammoniak-Immissionsmessnetz entwickelte sich in den letzten Jahren dynamisch. Die Begleitgruppe Ammoniakimmissionsmessungen hat im Jahr 2016 jedoch ein schweizweites Messkonzept entwickelt. Dieses sieht vor, dass an bestimmten Standorten langfristig gemessen werden soll. In der Zentralschweiz sind dies die Messpunkte RIG, ZB01, SZ01, WAU16.4, NEU02, NW03, UR01, ESC07 und ESC14.⁵⁷

2.2 Messperioden aller Messpunkte

Abbildung 9 zeigt eine graphische Darstellung der Messperioden für alle Messpunkte in der Zentralschweiz, inklusive der NABEL-Station Rigi-Seebodenalp. Die ersten Messungen begannen 1999 in den Gebieten Wauwil, Holderhus, Schüpfheim sowie auf dem Zugerberg und der Rigi-Seebodenalp. Ab 2004 wurden im Kanton Luzern verschiedene Messkampagnen durchgeführt (z. B. Ost-West-Transekt, Höhenprofile), weshalb für diese Zeit viele Messergebnisse vorliegen. Ende 2016 bestanden im Kanton Luzern noch 22 Ammoniakmesspunkte, aufgeteilt auf die sechs Messgebiete. Im Kanton Zug wurde die Ammoniakkonzentration ab dem Jahr 2007 an vier kantonalen Messpunkten in der Nähe von empfindlichen Ökosystemen gemessen. Im Jahr 2010 startete das Ressourcenprojekt in den Zentralschweizer Kantonen Nidwalden, Obwalden, Schwyz, Uri und Zug. Im Folgenden wird noch auf Besonderheiten und Änderungen an einzelnen Messpunkten oder in einzelnen Messgebieten eingegangen.

SCHÜ00-03: Verschiebungen

Wie in Abbildung 9 dargestellt, wurde der Messpunkt SCHÜ00 während der Messphase verschoben. Dieser Messpunkt wurde mit der Zeit von Gebüsch überwachsen und deshalb wieder auf freies Feld umplatziert. Da die räumliche Verschiebung nur einige Meter betrug, wurden keine Parallelmessungen durchgeführt. Folglich können und müssen die Messwerte vor der Verschiebung nicht korrigiert werden. Der Messpunkt SCHÜ01 wurde im Juni 2016 demontiert und dafür der Messpunkt SCHÜ03 in Betrieb genommen.

WAU05: Datenlücken

Bis ins Jahr 2004 gab es am Messpunkt WAU05 Datenlücken, daher müssen die Daten vor 2004 mit Vorsicht betrachtet werden.

HOL: Verschiebungen

Der Messpunkt HOL01 wurde im Mai 2007 am gleichen Ort wie HOL00 installiert, aber auf einer Höhe von 4 m über Grund. Vom 23.05.2007 bis am 08.01.2009 wurde die Konzentration auf beiden Höhen gemessen und eine

⁵⁷Seitler, E. und Meier, M. (2023). Ammoniak-Immissionsmessungen in der Schweiz 2000 bis 2022. Messbericht.

Umrechnungsformel ermittelt. Die Werte von HOL01 vom November 1999 bis Mai 2007 wurden aus den HOL00-Daten und der Umrechnungsformel berechnet.

ZB: Verschiebungen

Vom 02.11.1999 bis zum 10.01.2008 war am Messpunkt ZB00 nur ein Passivsammler, auf 1.3 m über Grund exponiert, in Betrieb. Vom 28.02.2008 bis zum 11.03.2009 mass der Passivsammler ZB01, aufgehängt auf 2.2 m über Grund und um wenige Meter verschoben, parallel zu ZB00. Danach wurde nur noch der Passivsammler ZB01 betrieben. Die Werte vor 2008 wurden mittels der Parallelmessung rückwirkend korrigiert.⁵⁸

ZG01: Datenqualität

Der Passivsammler beim Messpunkt ZG01 wurde ab September 2013 mehrmals von Vandalen beschädigt: Der Probebehälter mit Stange und auch die Passivsammler wurden entwendet. Deshalb steht für diesen Messpunkt für das Jahr 2013 kein gültiger Jahresmittelwert zur Verfügung. Auch im Jahr 2014 gingen die Vandalenangriffe weiter, worauf der Kanton Zug diverse Massnahmen ergriff (Anzeigeerstattung, leichte Versetzung der Stange, teilweise Überwachung, Information an Landwirte im Gebiet). Im Jahr 2014 standen im Februar und von Juli bis Dezember gültige Monatsmittelwerte zur Verfügung. Der Jahresmittelwert 2014 ist aufgrund der Lücken nach wie vor ungültig und wurde in der vorliegenden Auswertung nicht verwendet. Ab 2015 sind wieder gültige Messwerte vorhanden.

SZ innen: Verschiebungen

Anfang 2020 wurde der Messpunkt SZ02 aufgegeben und SZ03 wegen wiederholtem Vandalismus verschoben (SZ03a). Der Mittelwert dieses Messgebiets ab 2020 besteht deshalb aus den Messwerten von SZ01 und SZ03a.

SZ aussen: neues Messgebiet

Die zusätzlichen Messpunkte im Kanton Schwyz bei Tuggen und Schübelbach sind seit 2019 in Betrieb. Bei Wangen wird seit 2014 gemessen, mit Unterbruch im Jahre 2018. WAN01 und SCHUB01 wurden im Frühjahr 2021 verschoben (WAN01a und SCHUB01a), da die Wechsellperson durch weidende Kühe und Stiere gefährdet war. Für diese Stationen existieren daher im Jahr 2021 keine gültigen Jahresmittelwerte. Die bisherigen Messwerte werden trotzdem unter dem Messgebiet Ausserschwyz gezeigt.

UR Nord: neues Messgebiet

In Ergänzung zum bisherigen Messgebiet Uri, wird weiter nördlich die Ammoniakkonzentration seit Anfang 2022 zusätzlich beim Schloss Apro (APRO), bei der Messstation Gartenmatt (GRT) und zwischen Schattdorf und Bürglen (SCB) gemessen.

⁵⁸Seitler, E., Thöni, L., Schnyder, R., Rihm, B. (2013): Ammoniak-Immissionsmessungen in der Schweiz, Beschreibung der Standorte und Daten. FUB.

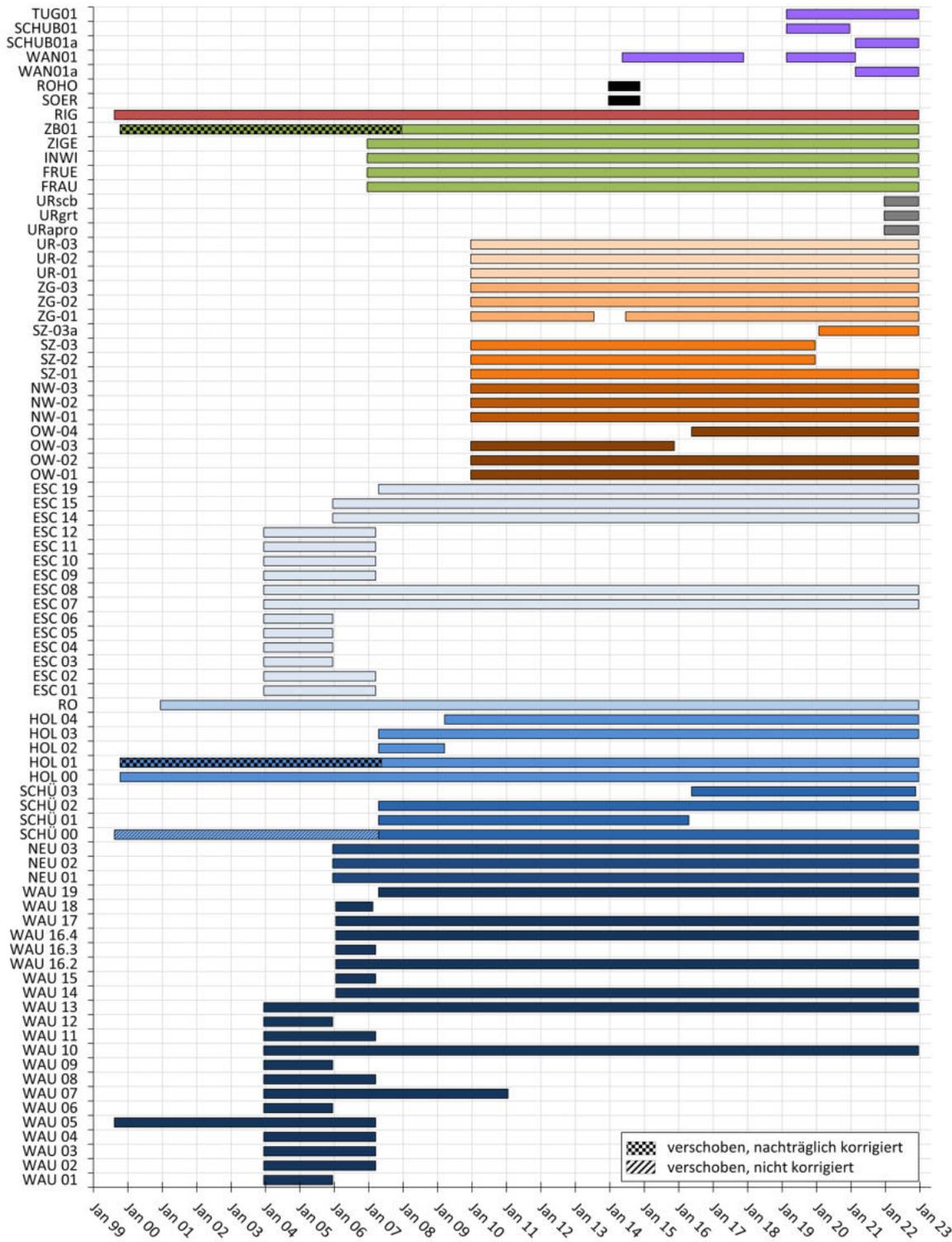


Abbildung 9: Zeitliche Übersichtstafel aller Messpunkte in der Zentralschweiz, farblich unterteilt in die verschiedenen Messgebiete. ⁵⁹

⁵⁹Die Umrechnung für die H0L01-Werte vor 2007 wurde durch eine Parallelmessung mit H0L00 ermittelt: $H0L01 = H0L00 \cdot 0.98 + 0.90$ ($R^2 = 0.95$). Die Umrechnung für die ZB01-Werte vor 2008 wurde durch eine Parallelmessung mit ZB00 ermittelt: $ZB01 = ZB00 \cdot 1.05$ ($R^2 = 0.97$)

2.3 Richtwerte und Beurteilung

Zur Beurteilung der Stickstoffeinträge stehen Critical Loads und Critical Levels der United Nations Economic Commission for Europe (UNECE) zur Verfügung.⁶⁰ Critical Loads bezeichnen die Deposition bzw. Gesamtstickstoff-Frachten, welche ein Ökosystem verkraften kann, ohne dass nachhaltige Veränderungen zu erwarten sind.

Folgende Critical Loads wurden festgelegt:

- 5 – 10 kg N ha⁻¹ a⁻¹ für Hochmoore
- 10 – 15 kg N ha⁻¹ a⁻¹ für montane/subalpine Naturwiesen
- 10 – 20 kg N ha⁻¹ a⁻¹ für Waldökosysteme

Bis 2021 wurden im Rahmen der Zentralschweizer Auswertungen der Ammoniakmessungen auch Frachten berechnet und das Konzept der Critical Loads angewandt. Ab dem vorliegenden Bericht 2022 wird allerdings nur noch das Konzept der Critical Levels weiterverfolgt. Critical Levels (CL) beziehen sich auf die Konzentration von Ammoniak in der Atmosphäre (Immission). Als verkraftbare Langzeitbelastungen wurden folgende Critical Levels für Ammoniak festgelegt:

- 1 µg NH₃ m⁻³ für empfindliche Moose und Flechten sowie die damit assoziierten Ökosysteme
- 3 µg NH₃ m⁻³ für höhere Pflanzen mit einem Unsicherheitsbereich von 2 – 4 µg m⁻³

Die Eidgenössische Kommission für Lufthygiene (EKL) ist der Frage nachgegangen, ob es Sinn macht, einen Immissionsgrenzwert für Ammoniak in Anhang 7 der Luftreinhalte-Verordnung (LRV) festzulegen.⁶¹ Folgende Schlussfolgerungen wurden dabei gezogen:

- Die Beurteilungsgrundlage hinsichtlich der Belastung empfindlicher Ökosysteme ist besser, wenn die Critical Loads für Stickstoffeinträge statt der Critical Levels für Ammoniak zur Bewertung der Übermässigkeit von Immissionen verwendet werden.
- Die tatsächliche N-Belastung liegt deutlich höher, als sie sich aus der alleinigen Betrachtung anhand der Ammoniakkonzentrationen ergibt.
- „Lokale“ Ammoniakemissionen, d. h. Quellen im Abstand von 0 bis 1 km zu den untersuchten Ökosystemstandorten, tragen im gesamt-schweizerischen Mittel knapp ein Viertel zur gesamten Ammoniakkonzentration bei. „Regionale“ Quellen, d. h. Quellen im Abstand von 1 bis 4 km zu den untersuchten Ökosystemstandorten, machen etwa die Hälfte der Immissionen aus.

Als Empfehlungen wurden folgende Punkte formuliert:

- Es soll kein Immissionsgrenzwert für Ammoniak in Anhang 7 der LRV festgelegt werden. Der Stellenwert der Critical Loads für Stickstoff soll dagegen gestärkt werden. Zur Beurteilung der Übermässigkeit von Immissionen sollen aber im Bedarfsfall auch die Critical Levels für Ammoniak herangezogen werden. Die Einhaltung des Critical Levels für Ammoniak allein löst das Problem der zu hohen Stickstoffeinträge allerdings noch nicht.
- Entscheidend für die Ammoniakminderung sind vorsorgliche Massnahmen zur Emissionsbegrenzung in der Landwirtschaft. Da die übermässigen Immissionen kaum je durch eine einzelne Anlage, sondern durch eine Vielzahl von Quellen verursacht werden, ist das Instrument des Massnahmenplans das geeignete Mittel zur Reduktion der übermässigen Stickstoffbelastung.
- Die Ammoniakkonzentration in der Luft soll weiterhin lokal, regional und überregional erhoben werden. Die Ammoniakkonzentrationen (und ergänzende N-Depositionsmessungen) sind sehr gute Indikatoren, um die zeitliche Entwicklung der Belastung zu dokumentieren. Die Messungen sollen an Standorten von empfindlichen Ökosystemen erfolgen, also dort, wo die Critical Levels und Critical Loads ihre Gültigkeit haben.

⁶⁰UNECE (2007). Report on the Workshop on Atmospheric Ammonia: Detecting Emission Changes and Environmental Impacts. ECE/EB.Air/WG.5/2007/3

⁶¹Eidgenössische Kommission für Lufthygiene (2014). Ammoniak-Immissionen und Stickstoffeinträge. Bern

3 Resultate

3.1 Meteorologie 2022

Das Jahr 2022 war aus landesweiter Sicht das wärmste seit Messbeginn 1864. Die Jahresmitteltemperatur lag +1.6 °C über der Norm 1991–2020. Der Jahresverlauf war neben diesen überdurchschnittlichen Temperaturen auch durch Niederschlagsmangel geprägt. Der Februar war besonders mild mit +1.8 °C gegenüber der Norm 1991–2020.

Der Sommer brachte drei Hitzewellen, eine erste Mitte Juni, eine lange Mitte Juli und eine weitere Anfangs August. Es war mit +2.3 °C gegenüber der langjährigen Norm nach 2003 der zweitheisseste Sommer seit Messbeginn. Auch im Oktober gab es ein massives Wärmeereignis, welches statistisch hervorsteicht: Die Temperaturen lagen bis zu 1 °C über dem bisherigen höchsten Oktobermesswert.⁶²

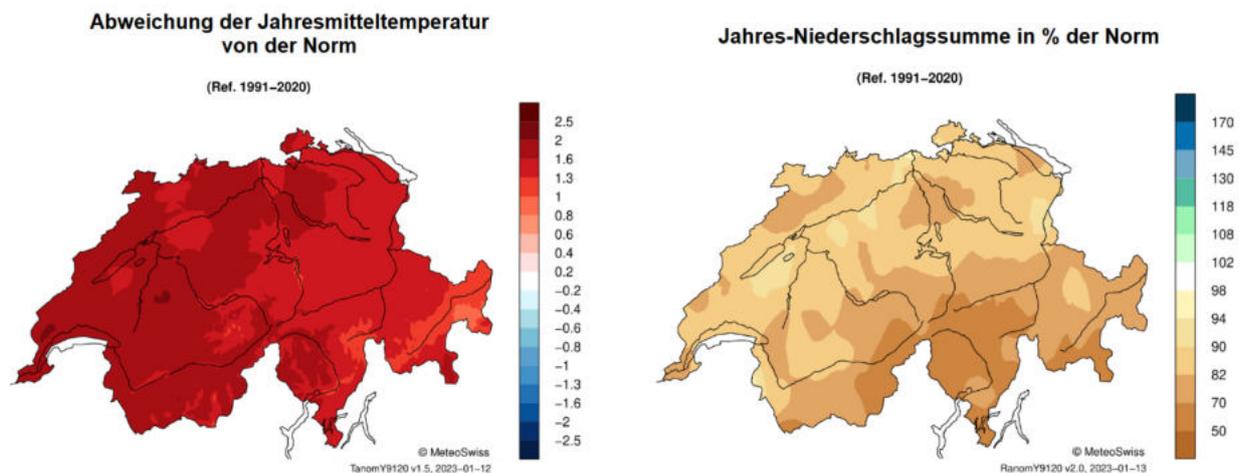


Abbildung 10: Links: Abweichung der Jahresmitteltemperatur 2022 von der Norm (1991-2020) in °C. Rechts: Jahres-Niederschlagssumme in Prozent der Norm (1991-2020).⁶³

⁶²MeteoSchweiz (2022). Klimabulletin Jahr 2022.

⁶³MeteoSchweiz (2022). Klimabulletin Jahr 2022.

3.2 NH₃-Belastung

3.2.1 Mittlerer Jahresgang

Der mittlere Jahresgang der gemessenen Ammoniakkonzentrationen wird hier beispielhaft anhand der Messpunkte von Obwalden und der kantonalen Messpunkte von Zug dargestellt (Abbildung 11). Die Grafiken der Jahresgänge der übrigen Messpunkte sind im Anhang aufgeführt. Bis zum Bericht des Jahres 2020 wurden jeweils die Jahresgänge seit Messbeginn präsentiert. Ab 2021 werden die Monatsmittel der letzten fünf Jahre gezeigt (2018-2022). Daher sind die Abbildungen nicht mehr direkt mit vorherigen Dokumenten vergleichbar. Weiter ist es für die Interpretation der Daten wichtig anzumerken, dass Emissionen und Immissionen nicht linear zusammenhängen (Kapitel 1.1). Trotz der komplexen Beziehung zwischen Emissionen und Immissionen können Vermutungen über die Ursachen der typischen Jahresgangkurven aufgestellt werden.

Die Messungen in Gebieten mit intensiver Tierhaltung wie Obwalden (Abbildung 11), aber auch Nidwalden, Wauwil, Zug, Eschenbach, Neudorf und Schüpfheim, zeigen einen ersten Höchstwert im März. Dieser «Peak» ist vermutlich darauf zurückzuführen, dass es eine gewisse Synchronisation beim Ausbringen von Gülle gibt. In den ersten warmen Tagen zu Beginn der Vegetation wird rund um die Messpunkte gleichzeitig Gülle ausgebracht, wobei «gleichzeitig» hier als «innerhalb der monatlichen Messperiode» zu verstehen ist. Zugleich ist zu dieser Jahreszeit die Atmosphäre noch relativ stabil und die Mischungsschicht zur Verdünnung der Emissionen noch nicht so hoch wie im Sommer.

Im Sommer wird weniger simultan gegüllt und die Turbulenz der Atmosphäre erlaubt tagsüber eine bessere Durchmischung der Luftschichten (Kapitel 1.1). Gleichzeitig waren aber in den letzten fünf Jahren, welche in die Abbildungen des mittleren Jahresganges einfließen, die Sommertemperaturen hoch, was bei gleichbleibendem Gülle-Management wahrscheinlich zu mehr atmosphärischen Verlusten geführt hat als in kühleren Vorjahren. Deshalb sinken die Ammoniakkonzentrationen an einigen Messpunkten nach dem ersten Peak im Frühling nur unwesentlich oder steigen nochmals an.

Bei einigen Messpunkten sind, wenn auch in geringerer Masse, nochmals erhöhte Werte im November zu beobachten. Dieser «Peak» im Herbst kann so erklärt werden, dass einerseits wieder synchron an vielen Orten gegüllt wird, um die Lager vor Wintereinbruch noch zu leeren. Andererseits ist die Atmosphäre schon wieder deutlich stabiler und Inversionen können auch tagsüber bestehen bleiben, was die lokalen Ammoniakkonzentrationen erhöht.

Die Messpunkte des Kantons Zug in den Messgebieten mit extensiver Weidebewirtschaftung zeigen keinen bis nur einen sehr schwach ausgeprägten Frühjahres- und Herbstpeak, was die oben ausgeführten Hypothesen unterstützt (Abbildung 11).

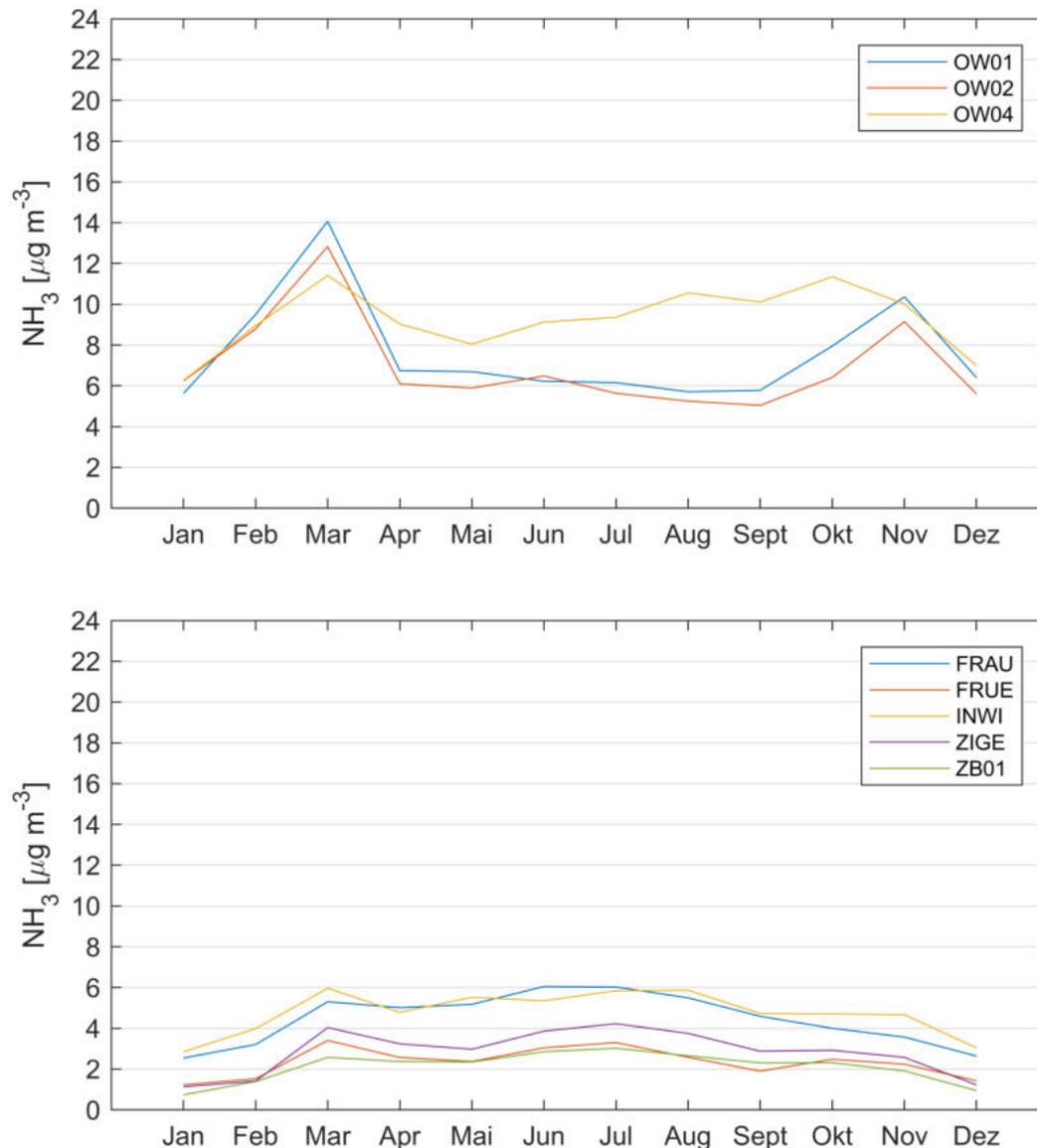


Abbildung 11: Vergleich des Jahresgangs unterschiedlicher Messpunkte mit unterschiedlicher Bewirtschaftung bzw. unterschiedlich intensiver Tierhaltung. Mittelung der letzten fünf Jahre (2018–2022). Oben: Messpunkte von Obwalden. Unten: Messpunkte des Kantons Zug.

3.2.2 Mehrjahresmittelwerte

Tabelle 1 und Abbildung 12 zeigen die mehrjährigen Jahresmittel inkl. Standardabweichung der Ammoniakkonzentration der verschiedenen Messgebiete. Zusätzlich zu dem Mittelwert seit Messbeginn wird seit dem Bericht 2021 in Tabelle 1 auch noch derjenige der letzten fünf Jahre dargestellt. Die Jahresmittel der Ammoniakkonzentrationen ausgewählter Messpunkte über die jeweilige Messperiode sind auch im Anhang eingefügt.

Der Critical Level von 3 µg m⁻³ (für höhere Pflanzen) wurde in den meisten Messgebieten in den letzten Jahren überschritten. Dabei sind massive Überschreitungen des Critical Levels um den Faktor 2 bis 3 üblich.

Tabelle 1: Mehrjahresmittelwerte inkl. Standardabweichung der Ammoniakkonzentration seit Messbeginn bzw. der letzten fünf Jahre und pro Messgebiet.

Messgebiet	Mittelwert seit Messbeginn	Mittelwert der letzten 5 Jahre
Wauwil (WAU10, WAU13, WAU14, WAU16.4, WAU17, WAU19)	8.0 ± 0.7	8.1 ± 0.7
Eschenbach (ESC07, ESC08, ESC14, ESC15, ESC19)	9.4 ± 1.5	10.6 ± 1.7
Holderhus (HOL01, HOL03, HOL04) ⁵	7.8 ± 0.9	8.6 ± 0.7
Schüpfheim (SCHÜ00, SCHÜ02, SCHÜ03) ¹	6.9 ± 0.9	7.5 ± 1.1
Root, Michaelskreuz (RO)	3.3 ± 0.5	3.7 ± 0.6
Neudorf (NEU01, NEU02, NEU03)	5.8 ± 0.7	6.4 ± 0.7
Nidwalden (NW01, NW02, NW03)	6.7 ± 0.6	6.9 ± 0.8
Obwalden (OW01, OW02, (OW03), OW04) ²	7.0 ± 1.0	7.9 ± 0.6
Innerschwyz (SZ01, SZ02, SZ03, SZ03a) ³	5.0 ± 0.9	5.0 ± 0.4
Ausserschwyz (WAN01, WAN01a, SCHUB01, SCHUB01a, TUG01) ⁶	8.5 ± 1.4	8.9 ± 1.9
Uri (UR01, UR02, UR03)	6.4 ± 0.7	6.8 ± 0.5
Uri Nord (UR-GRT, UR-SCB, UR-APRO) ⁷	-	5.1
Zug (ZG01, ZG02, ZG03) ⁴	8.6 ± 1.2	9.1 ± 0.9
Kloster Frauental (FRAU)	4.1 ± 0.4	4.5 ± 0.4
Früebüel (FRÜE)	1.9 ± 0.5	2.4 ± 0.3
Inwil (INWI)	4.3 ± 0.6	4.8 ± 0.5
Zigerhüttli (ZIGE)	2.4 ± 0.4	2.8 ± 0.4
Zugerberg 1 (ZB01)	1.8 ± 0.3	2.1 ± 0.2
Rigi-Seebodenalp (RIGI)	1.6 ± 0.2	1.8 ± 0.1

(1) Ab 2016 war beim Messgebiet Schüpfheim ein Messpunkt weniger in die Berechnung eingeflossen (SCHÜ01), da dieser Messpunkt aufgehoben wurde.

(2) Ab 2016 war beim Messgebiet Obwalden ein Messpunkt weniger in die Berechnung eingeflossen (OW03), da dieser Messpunkt aufgehoben wurden. Seit 2021 war dafür OW04 dabei, wo seit 2016 gemessen wurde.

(3) Ab 2020 wurde die mittlere Konzentration des Messgebiets Innerschwyz aus SZ01 und neu SZ03a gebildet, weil die Messpunkte SZ-02 und SZ-03 aufgegeben wurden.

(4) Der Messpunkt ZG01 wurde in früheren Berichten ausgenommen, ist seit 2021 aber wieder in alle Berechnungen und Darstellungen integriert.

(5) Der Messpunkt HOL04 wurde in früheren Berichten ausgenommen, ist seit 2021 aber wieder in alle Berechnungen und Darstellungen integriert.

(6) In Ausserschwyz ist die Datenlage für eine zuverlässige Berechnung momentan noch ungenügend. Die angegebenen Werte wurden aus Messungen der Jahre 2014-2017 und 2021 (je 1 Messpunkt), 2019, 2020 sowie 2022 (je 3 Messpunkte) gemacht.

(7) Im Messgebiet Uri Nord ist die Datenlage für eine zuverlässige Berechnung momentan noch ungenügend. Die Messungen starteten 2022.

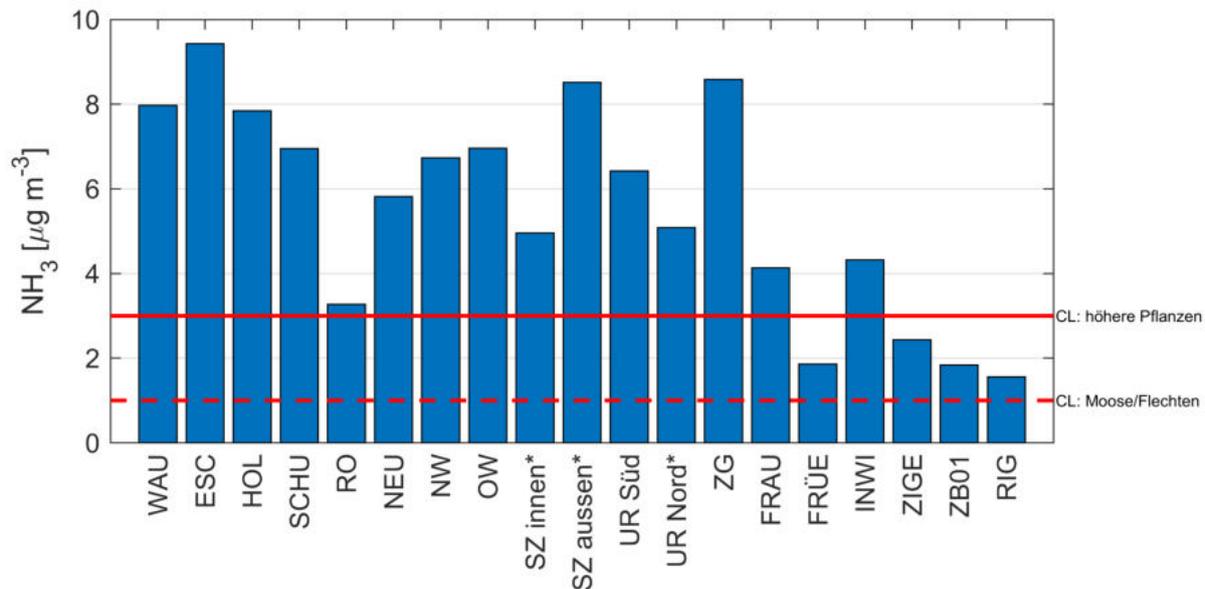


Abbildung 12: Mehrjähriges Mittel (2010–2022) der Ammoniakkonzentration in den einzelnen Messgebieten. Die rote ausgezogene Linie kennzeichnet den Critical Level (CL) für höhere Pflanzen, die rote gestrichelte Linie denjenigen für empfindliche Moose und Flechten.

3.2.3 Verlauf der Ammoniakkonzentration

Werden die Jahresmittel aller Ammoniakmesspunkte seit 2007 im Kanton Zug dargestellt, so wird deutlich, dass der Critical Level für höhere Pflanzen in allen Messjahren überschritten wird (Abbildung 13). Die drei kantonalen Messpunkte Frübüel, Zugerberg und Zigerhüttli (FRÜE, ZB01 und ZIGE) liegen in der Nähe von empfindlichen Ökosystemen, weshalb dort der strengere Critical Level-Wert für Moose und Flechten von $1 \mu\text{g NH}_3 \text{ m}^{-3}$ angewendet wird. Auch dieser strengere Grenzwert wird an all diesen drei Messpunkten in allen Jahren überschritten.

Im Jahr 2021 wurden an allen Zuger Messpunkten tiefere Ammoniakkonzentrationen als in den drei Vorjahren gemessen, was sehr wahrscheinlich auf die kühlen und nassen Wetterbedingungen zurückzuführen ist. Bei ZG01 wurde der tiefste Messwert seit Messbeginn registriert, bei ZG02 der zweittiefste. Im Gegensatz dazu waren die Jahre 2018, 2019 und 2020 geprägt von langen, trockenen Sommern mit mehreren Hitzewellen. Dieser Umstand kann die allgemein erhöhten Ammoniakimmissionswerte in diesen Jahren erklären (Kapitel 1.1). Im Jahr 2022, welches erneut von Trockenheit und überdurchschnittlichen Temperaturen geprägt war, stiegen die Ammoniakimmissionen wieder an. Die einzige Ausnahme war der Messpunkt ZG03, an welchem 2021 eine relativ hohe Ammoniakimmission gemessen wurde, die nicht abschliessend erklärt werden kann.

Obwohl die Messpunkte des Ressourcenprojekts (ZG01, ZG02 und ZG03) nahe beieinander liegen, weisen sie eine hohe Variabilität auf. ZG02 zeigt in allen Jahren die tiefsten Messwerte, welche allerdings – wie bereits schon erwähnt – das entsprechende Critical Level immer noch massiv überschreiten. Dieser Messpunkt liegt leicht erhöht und ist südlich von einem Waldstück abgeschirmt, was die geringere Exposition im Vergleich zu ZG01 und ZG03 erklären könnte.

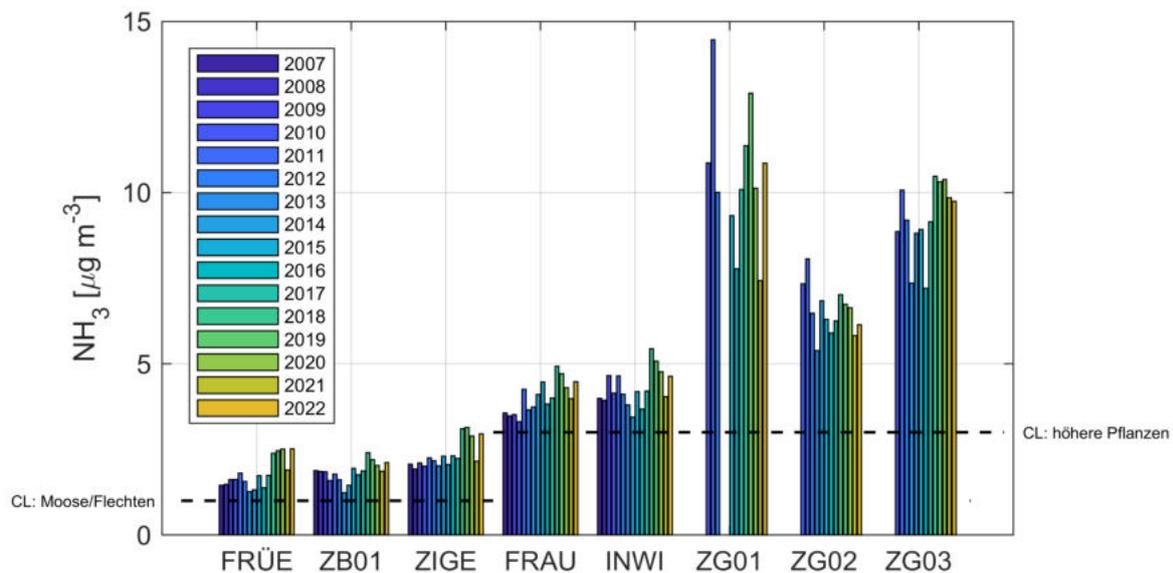


Abbildung 13: Jahresmittel (2007 bis 2022) der Ammoniakkonzentration an den einzelnen Messpunkten im Kanton Zug. Dies beinhaltet sowohl die kantonalen Messpunkte (FRÜE, ZB01, ZIGE, FRAU, INWI), wie auch diejenigen des Ressourcenprojekts (ZG01, ZG02, ZG03). Für ZG01 konnten aufgrund von Datenlücken keine gültigen Jahresmittel für 2013 und 2014 berechnet werden. Die an den Standorten jeweils gültigen Critical Levels (CL) für höhere Pflanzen bzw. empfindliche Moose und Flechten sind als schwarze, gestrichelte Linie eingezeichnet.

Abbildung 14 zeigt den Verlauf der Ammoniakkonzentration seit Januar 2010 in den Messgebieten des Ressourcenprojekts der Zentralschweizer Kantone (ohne Messgebiete des Kantons Luzern). Die Messgebiete Ausserschwyz und Uri Nord sind nicht dargestellt. In die Mittelung flossen dieselben Messpunkte wie in Tabelle 1 ein.⁶⁴

Wie in Kapitel 3.2.1 schon diskutiert wurde, sind generell alljährlich zwei Peaks, nämlich je im März und Oktober, zu erkennen. Die Jahre 2016–2018 zeigen eine etwas geringere Ausprägung dieser Peaks, was nicht abschliessend erklärt werden kann. Jedoch ist das Konzentrationsniveau über das ganze Jahr hinweg angehoben.

In den Jahren 2019, 2020 und 2022 sind die Frühjahrspeaks an allen Standorten deutlich ausgeprägt. Im Zuger Messgebiet wird dieser erste Peak massgeblich von ZG01 bestimmt. Auch in Nid- und Obwalden ist der Frühjahrspeak besonders ausgeprägt, wobei hier aber jeweils alle Messpunkte ähnliche Werte zeigen. Im Vergleich zu 2021, als der Frühlingspeak in Nid- und Obwalden bereits im Februar sichtbar wurde, taucht er 2022 wieder einen Monat später auf.

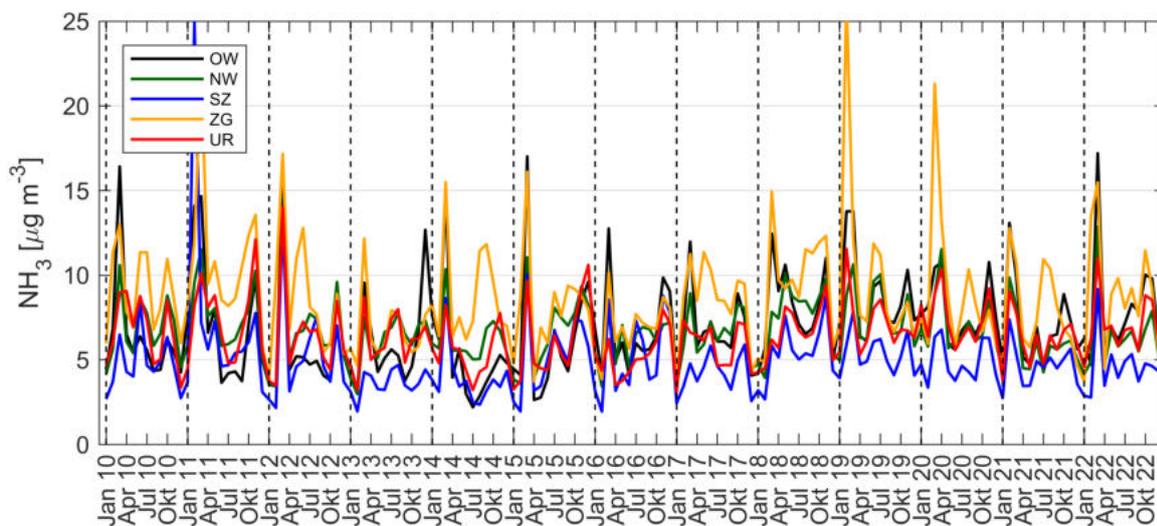


Abbildung 14: Verlauf der Ammoniakkonzentration seit Januar 2010 an den Ressourcenprojekt-Standorten der Zentralschweizer Kantone ohne Luzern.

⁶⁴Der Messpunkt ZG01 wurde in früheren Berichten aus unbekanntem Gründen ausgelassen, seit 2021 aber wieder in alle Berechnungen und Darstellungen integriert.

Der Verlauf der Ammoniakkonzentration im Kanton Zug seit 2010 ist in Abbildung 15 dargestellt. Wie bereits in den Vorjahren können die Messstandorte in drei Gruppen eingeteilt werden:

- Hohe Belastung: Passivsammler des Ressourcenprojekts (ZG01, ZG02, ZG03). Das Verlaufsmuster der Ammoniakkonzentration ist mit denjenigen der übrigen Ressourcenprojekt-Standorte der Zentralschweiz in Abbildung 14 vergleichbar, jedoch auf teilweise deutlich höherem Niveau. All diese Standorte liegen in Landwirtschaftsgebieten. Die Frühlingspeaks 2019, 2020 und 2022 sind extrem ausgeprägt sichtbar. Danach sinkt die Belastung im Gegensatz zu 2017/2018 aber kurzzeitig wieder. Es folgt ein Peak im Sommer. Der deutliche Herbstpeak tritt im Jahr 2022 erstmals seit 2018 wieder auf.
- Mittlere Belastung: Die Messungen in Inwil (INWI) und Frauental (FRAU) weisen eine mittlere Ammoniakbelastung auf. Beide Standorte zeigen 2022 ebenfalls einen ausgeprägten Peak im Frühling, gefolgt von einem Sommerpeak.
- Tiefe Belastung: Die Messungen in Frübüel (FRÜE), Zigerhüttli (ZIGE) und Zugerberg (ZB01) wurden bewusst in der Nähe von empfindlichen Ökosystemen und Gegenden mit geringer Belastung durchgeführt. Im Jahr 2022 fielen diese Standorte durch einen aussergewöhnlich deutlichen Konzentrationsanstieg im Frühling auf.

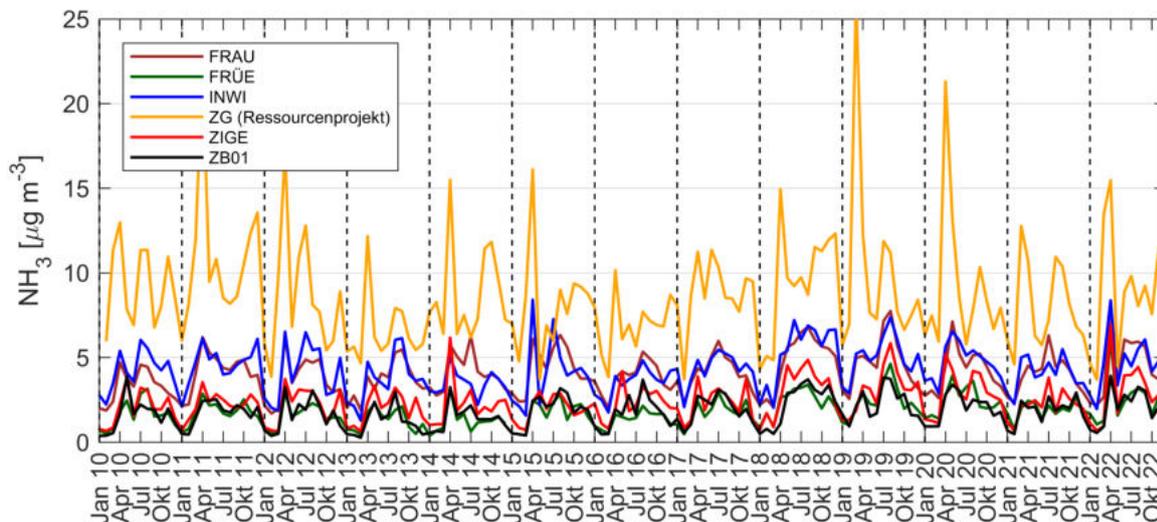


Abbildung 15: Verlauf der Ammoniakkonzentration seit Januar 2010 an den verschiedenen kantonalen Passivsammler-Standorten in Zug sowie den Zuger Ressourcenprojekt-Standorten (ZG).

Abbildung 16 zeigt schliesslich den Verlauf der Ammoniakkonzentrationen seit Januar 2010 für die Luzerner Messgebiete. In die Mittelung sind dieselben Messpunkte wie in Tabelle 1 eingeflossen.

Im Verlauf der Ammoniakkonzentration 2022 ist der Frühlingspeak ausgesprochen deutlich zu erkennen. Danach verbleiben die Ammoniakkonzentrationen entweder auf hohem Niveau oder sinken kurzfristig, bevor ein unterschiedlich ausgeprägter Sommerpeak sichtbar wird. Der Herbstpeak ist schwach bis gar nicht sichtbar.

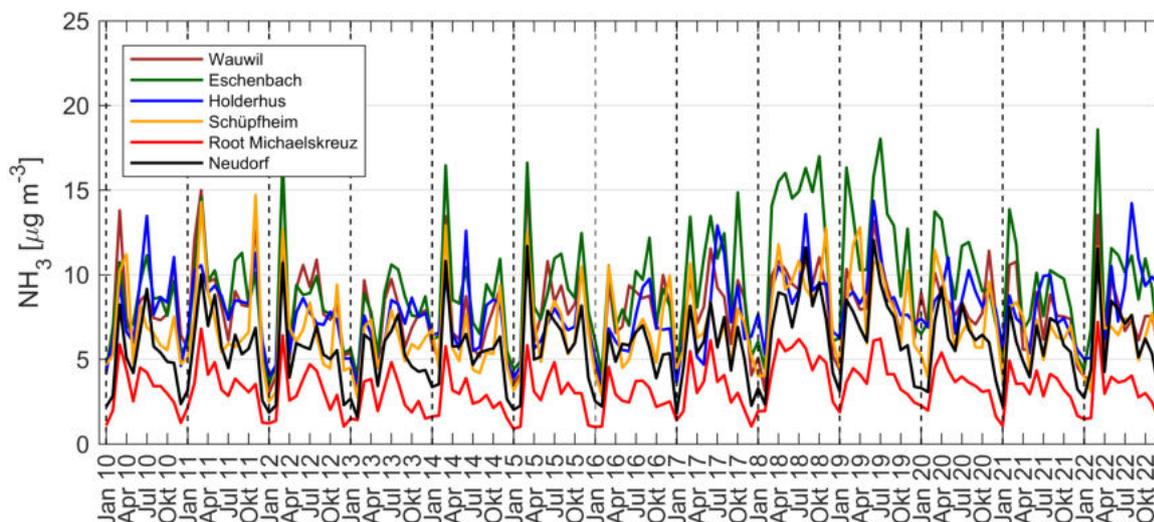


Abbildung 16: Verlauf der Ammoniakkonzentration seit Januar 2010, gemittelt für jedes Messgebiet im Kanton Luzern.

Zusammenfassend können folgende Schlussfolgerungen der Verläufe der Ammoniakkonzentrationen im Jahr 2022 festgehalten werden:

- Die Ammoniakkonzentrationen 2022 sind vergleichbar mit den Vorjahren 2018–2020 und befinden sich auf hohem Gesamtniveau.
- Der Frühjahrespeak ist ausgesprochen deutlich sichtbar. Danach verbleiben die Ammoniakkonzentrationen entweder auf hohem Niveau oder sinken kurzfristig, bevor ein unterschiedlich ausgeprägter Sommerpeak sichtbar wird. Der Peak im Herbst ist, je nach Messpunkt, unterschiedlich ausgeprägt.
- Insbesondere Messpunkte in stark landwirtschaftlich genutzten Gebieten zeigen mindestens einen Peak im März, teilweise einen zweiten während der Sommermonate, und einen dritten Anstieg im Oktober. Auch an Standorten in der Nähe von empfindlichen Ökosystemen sind teilweise deutliche Konzentrationsanstiege im Frühjahr zu sehen.

3.2.4 Monatsbeiträge zur Gesamtbelastung

In einem Netzdiagramm, welches im Uhrzeigersinn die Monate darstellt und auf der Netzstruktur die Ammoniakkonzentration abbildet, wird ersichtlich, welche Zeitperioden im Jahr durchschnittlich wie viel zur jährlichen Ammoniakbelastung am Standort beitragen. Wie bereits in den Vorjahresberichten sind hier exemplarisch zwei Messgebiete abgebildet: Das Messgebiet Zug (Mittelung über die Messpunkte gemäss Tabelle 1) und der Messpunkt Zugerberg. Um einen Eindruck der Variabilität zu bekommen, werden jeweils die Jahre 2013, 2018, 2020, 2021 und 2022 dargestellt (Abbildung 17). Diese Jahre zeigten unterschiedliche Witterungsverhältnisse.

Im Messgebiet Zug sind die von Jahr zu Jahr variierenden Ammoniakbelastungen deutlich erkennbar (Abbildung 17 links). Ein ausgeprägter erster Peak der Ammoniakkonzentration wird jeweils im Februar (z. B. 2021) bis März (z. B. 2020) gemessen, wobei im Jahr 2022 die Messwerte in beiden Monaten hoch sind. Danach verbleibt die Ammoniakkonzentration entweder auf hohem Niveau oder, wie 2022, steigt nach einer zwischenzeitlichen Abnahme erneut an. Im Jahr 2022 ist im Messgebiet Zug nur ein Herbstpeak zu sehen. Die Konzentrationen nehmen schliesslich mit Einbruch des Winters ab. Die unterschiedlichen Jahresverläufe können qualitativ unter anderem mit den jeweiligen meteorologischen Gegebenheiten erklärt werden.

Als Vergleich zu diesem Messgebiet mit intensiver landwirtschaftlicher Bewirtschaftung ist in Abbildung 17 (rechts) die Ammoniakkonzentration auf Monatsbasis am Messpunkt Zugerberg dargestellt. Hier werden deutlich geringere Ammoniakkonzentrationen gemessen.

Die Erklärung über die komplexe Beziehung zwischen Emissionen und Immissionen und Vermutungen über die Ursachen der typischen Jahresgangkurven, bzw. Monatsbeiträge zur Gesamtbelastung, sind in den Kapiteln 3.2.1 und 3.1 festgehalten.

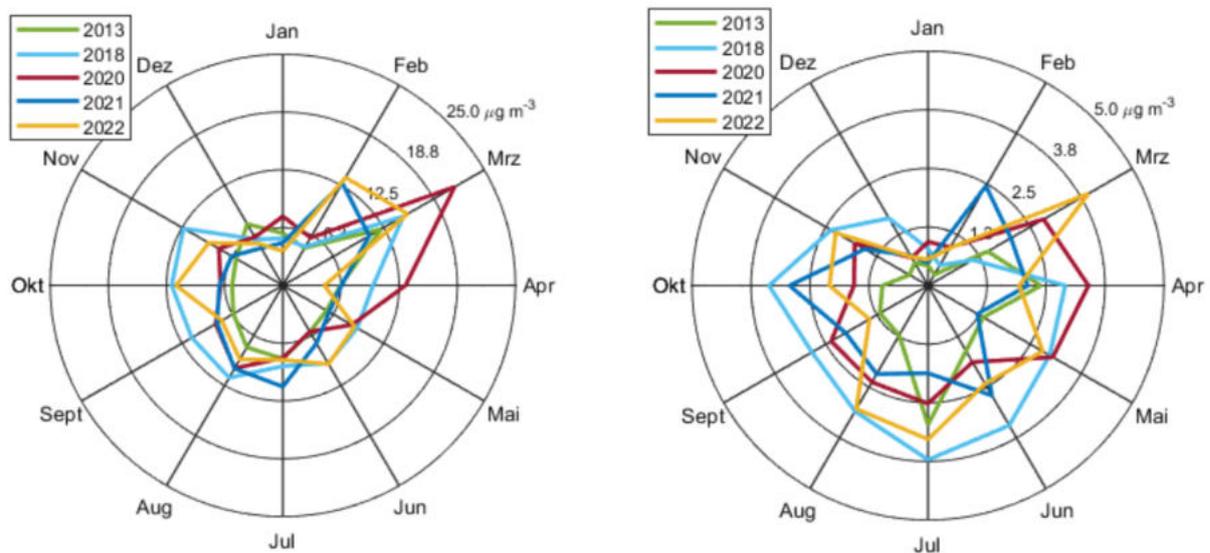


Abbildung 17: Darstellung der Monatsmittelwerte in Netzdiagrammen für das Messgebiet Zug (links) und den Messpunkt Zugerberg (rechts) für die Jahre 2013, 2018, 2020, 2021 und 2022. Die Radien der beiden Rosen entsprechen dabei nicht der gleichen Immission (25 bzw. $5 \mu\text{g NH}_3 \text{ m}^{-3}$). Das Netzdiagramm für das Messgebiet Zug weicht von früheren Versionen ab, da neu auch der Messpunkt ZG01 miteinberechnet wurde, an welchem 2013/2014 Vandalenakte die Messung verunmöglicht hatten.

3.3 Trendanalyse

3.3.1 Jahresmittel-Trends nach Messgebieten

Für die folgenden Grafiken (Abbildungen 18 bis 22) wurden ab dem Jahr 2007 die Jahresmittelwerte der verschiedenen Messpunkte gemittelt. Dabei flossen nur Messstationen mit ein, welche zwischen Messbeginn (2007 oder 2010) und 2022 höchstens drei Lücken in den Jahresmittelwerten aufweisen. Die verwendeten Stationen sind jeweils in der Bildlegende aufgeführt. Anschliessend wurden je drei lineare Trends für das jeweilige Messgebiet berechnet, und zwar für die ganze Messperiode ("Trend", langfristig), für die letzten 10 Jahre ("Trend_10", mittelfristig) und zusätzlich für die letzten fünf Jahre ("Trend_5", kurzfristig).

Die Trends sind als Änderung in $\mu\text{g m}^{-3}$ pro Jahr angegeben. Deren 95%-Vertrauensintervalle werden in eckigen Klammern aufgelistet. Das Intervall gibt an, innerhalb welcher Grenzen sich die Parameter wahrscheinlich bewegen. Daraus lässt sich direkt die Signifikanz ablesen: Haben beide Zahlen im Vertrauensintervall das gleiche Vorzeichen, ist das Resultat aus der Trendberechnung statistisch signifikant. Dabei ist das Signifikanzniveau (α) in diesem Bericht 5 %. Weitere Erklärungen zur statistischen Auswertung sind im Anhang angefügt.

Exemplarisch sind hier, wie in den Vorjahresberichten, vier Messgebiete abgebildet. Die Grafiken der restlichen Messgebiete sind im Anhang einzusehen.

Nach einem sprunghaften Anstieg der Konzentrationen zwischen 2017 und 2019, vor allem in Neudorf, Eschenbach und Schüpfheim, war das Ammoniak-Jahresmittel 2020 in allen Messgebieten ausser Uri wieder niedriger als in den vorhergehenden Jahren. Im Jahr 2021 wurden wiederum tiefere Werte gemessen, diesmal auch im Kanton Uri. Damit entsprechen die Messwerte 2022 in allen Messgebieten wieder dem Niveau von vor 2018. Diese Entwicklung hat zur Folge, dass sich der lang- bzw. mittelfristige und der kurzfristige Trend in den meisten Fällen unterscheiden.

- Das Messgebiet Wauwil zeigt über die mehrjährige Messperiode schwankende Ammoniakkonzentrationen mit einem neutralen, nicht-signifikanten langfristigen Trend (Abbildung 18). Nach einem Rückgang zwischen 2011 und 2013 stiegen die Werte bis 2018 wieder deutlich und verharrte bis 2020 auf diesem Niveau. Die Messwerte von 2021 und 2022 sind deutlich tiefer als in den Vorjahren und damit vergleichbar mit 2013/14. Diese beiden letzten Messwerte führen zu einem negativen und statistisch signifikanten kurzfristigen Trend.
- In den Messgebieten Neudorf (Abbildung 19) und Eschenbach (Abbildung 20) zeichnen sich ähnliche Konzentrationsverläufe ab, wobei der langfristige positive Trend jeweils signifikant ist. Die kurzfristigen Trends sind hingegen negativ, wozu das verregnete Jahr 2021 stark beiträgt. Im Jahr 2022 waren die gemessenen Konzentrationen ähnlich hoch wie zwei Jahre zuvor.
- Das Messgebiet Nidwalden zeigt mit einem neutralen langfristigen Trend keine Zu- oder Abnahme der Ammoniakkonzentration (Abbildung 21). Auch hier liegt der Messwert 2021 deutlich tiefer als im Vorjahr.
- Die im Messgebiet Uri gemessene Ammoniakkonzentration sank bis 2016 mit statistischer Signifikanz⁶⁵, stieg dann aber in den folgenden Jahren wieder an (Abbildung 22). Es resultiert ein neutraler, langfristiger Trend. Auch der kurzfristige Trend ist neutral. Die im Jahr 2020 gemessene Konzentration war, im Gegensatz zu allen anderen Messgebieten, nochmals etwas höher als in den zwei vorhergehenden Jahren und damit auf ähnlichem Höchniveau wie 2011. Im Jahr 2021 ist der Messwert aber, wie bei den anderen Messgebieten, tiefer.

⁶⁵Bieri, S., Ruckstuhl, C. (2017). Ammoniak-Messbericht, Ammoniakmessungen in der Zentralschweiz von 2000 bis 2016. inNET Monitoring AG.

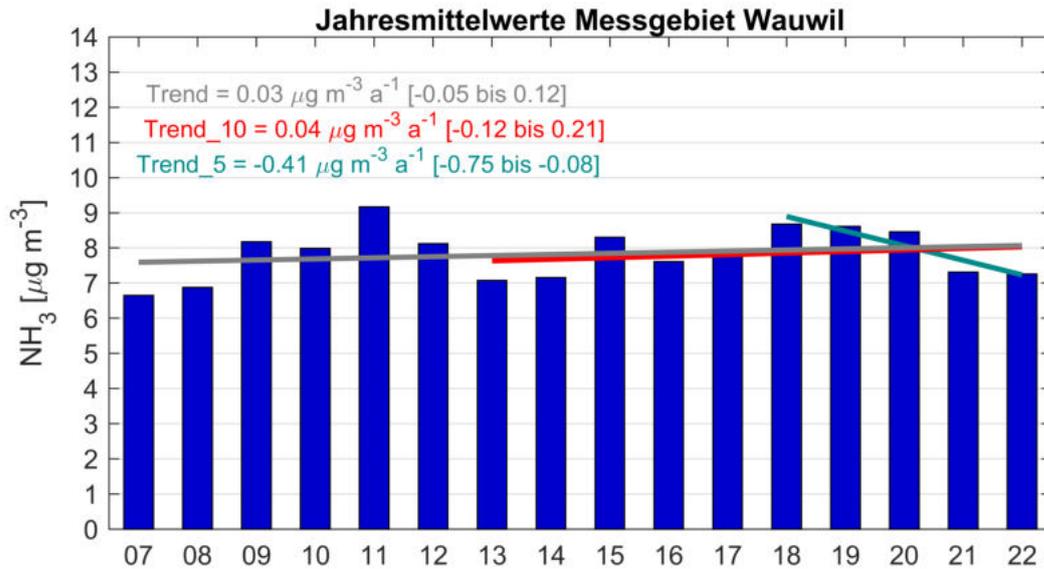


Abbildung 18: Trendberechnungen für die gemittelten Jahresmittelwerte des Messgebiets Wauwil seit Messbeginn 2007. Die verwendeten Stationen zur Trendberechnung sind WAU10, WAU13, WAU14, WAU16.4, WAU17 und WAU19 (ohne WAU16.2). Der graue Trend bezieht sich auf die ganze Messperiode, der rote und türkise Trend auf die letzten zehn bzw. fünf Jahre.

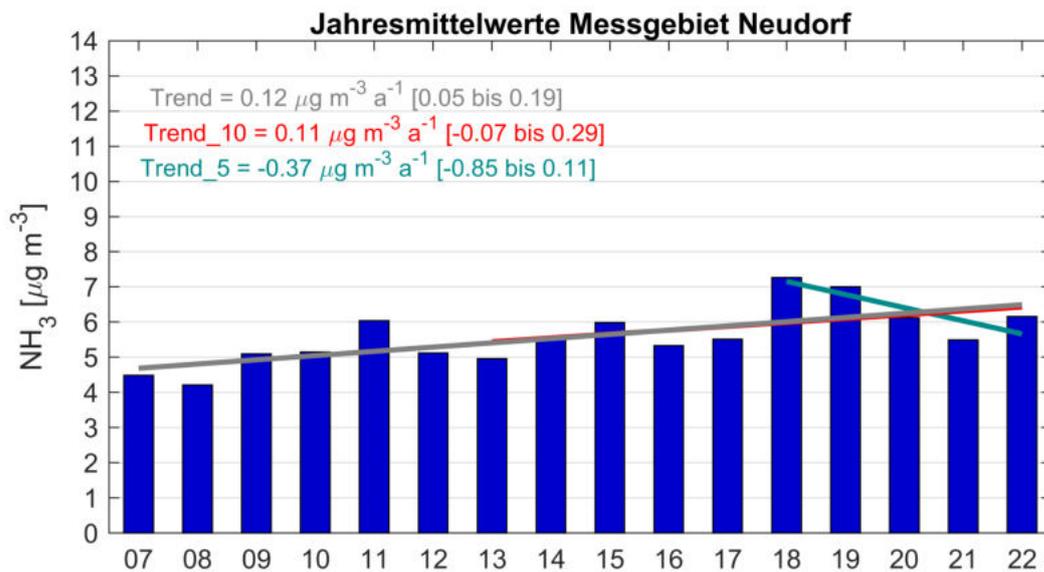


Abbildung 19: Trendberechnung für die gemittelten Jahresmittelwerte des Messgebiets Neudorf seit Messbeginn 2007. Die verwendeten Stationen zur Trendberechnung sind NEU01, NEU02 und NEU03. Der graue Trend bezieht sich auf die ganze Messperiode, der rote und türkise Trend auf die letzten zehn bzw. fünf Jahre.

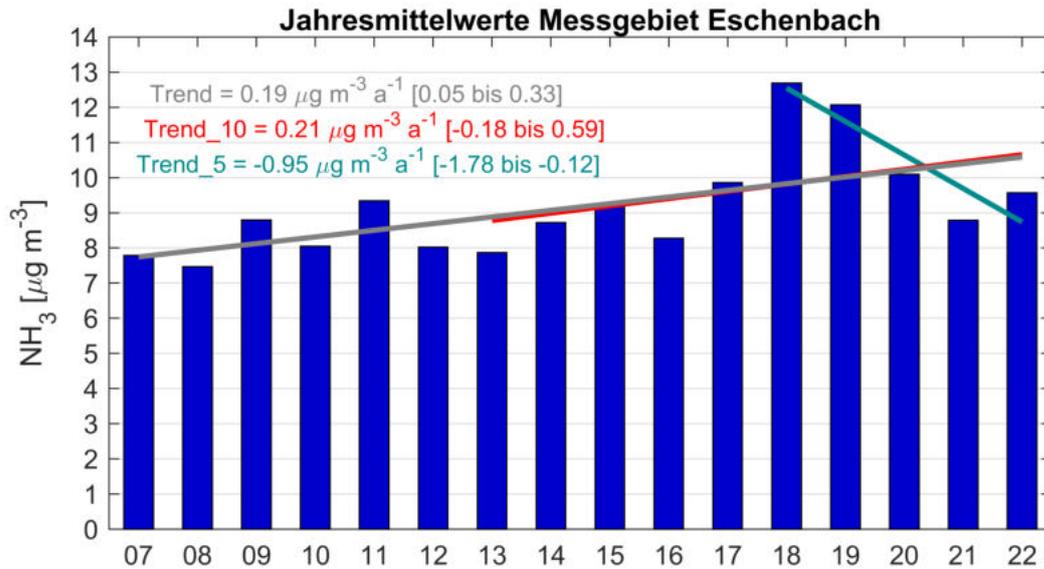


Abbildung 20: Trendberechnung für die gemittelten Jahresmittelwerte des Messgebiets Eschenbach seit Messbeginn 2007. Die verwendeten Stationen zur Trendberechnung sind ESC07, ESC8, ESC14, ESC15 und ESC19. Der graue Trend bezieht sich auf die ganze Messperiode, der rote und türkise Trend auf die letzten zehn bzw. fünf Jahre.

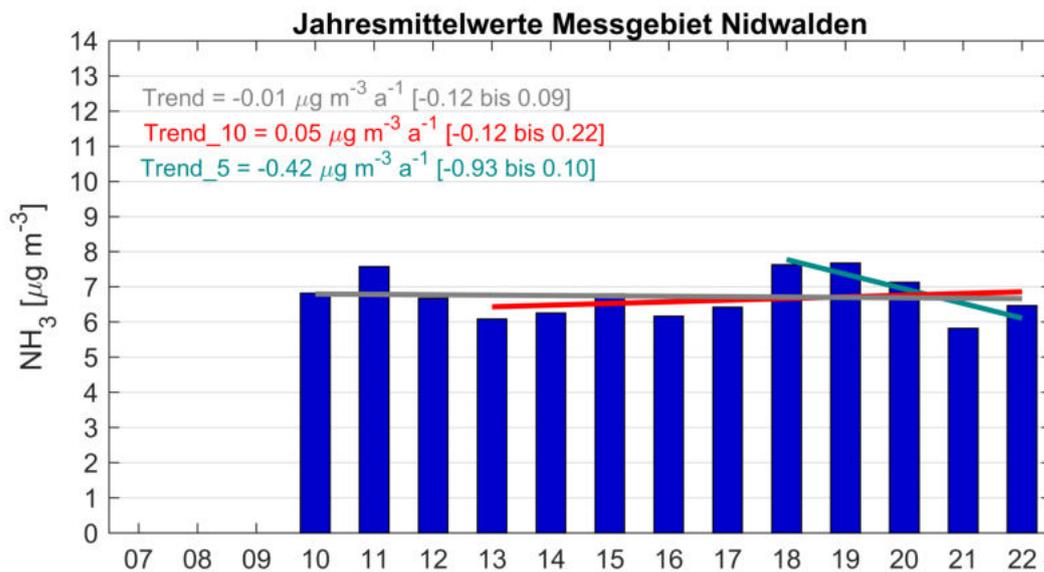


Abbildung 21: Trendberechnung für die gemittelten Jahresmittelwerte des Messgebiets Nidwalden seit Messbeginn 2010. Die verwendeten Stationen zur Trendberechnung sind NW01, NW02 und NW03. Der graue Trend bezieht sich auf die ganze Messperiode, der rote und türkise Trend auf die letzten zehn bzw. fünf Jahre.

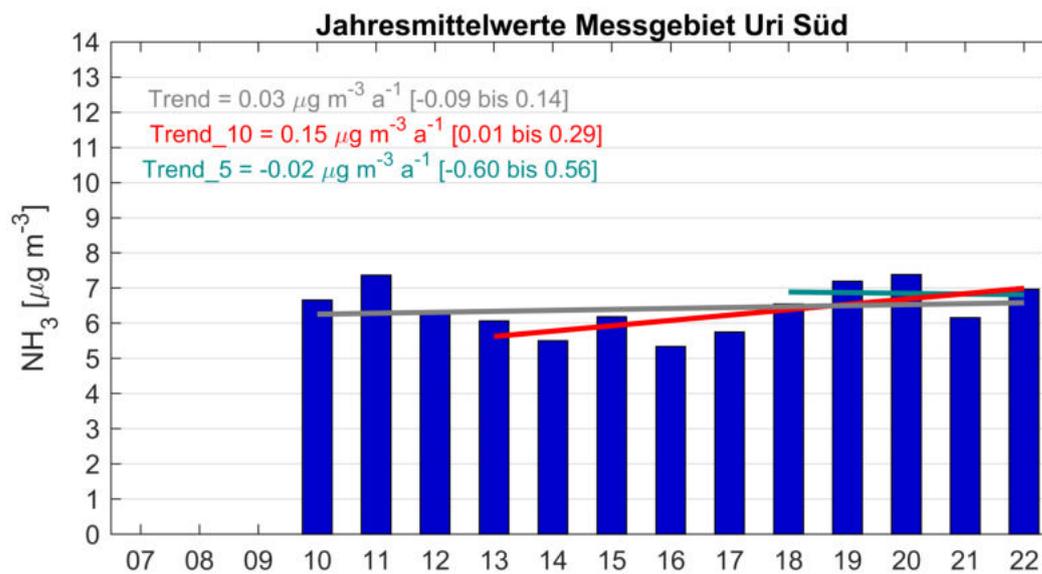


Abbildung 22: Trendberechnung für die gemittelten Jahresmittelwerte des Messgebiets Uri seit Messbeginn 2010. Die verwendeten Stationen zur Trendberechnung sind UR01, UR02 und UR03. Der graue Trend bezieht sich auf die ganze Messperiode, der rote und türkise Trend auf die letzten zehn bzw. fünf Jahre.

3.3.2 Jahresmittel-Trends nach Messpunkten

Während das vorherige Kapitel den Trend pro Messgebiet analysierte, stehen nun Trendrechnungen einzelner Messpunkte im Vordergrund. Wie in den vorhergehenden Abbildungen umfasst die langfristige Trendberechnung die gesamte Messperiode («Trend», graue Linie). Zusätzlich ist ein mittelfristiger, sprich zehnjähriger ("Trend_10", rote Linie) und ein kurzfristiger, fünfjähriger Trend ("Trend_5", türkise Linie) angegeben.

In diesem Unterkapitel werden die Berechnungen der Jahresmittelrends an vier ausgewählten Messpunkten aufgezeigt (Abbildungen 23 bis 26). Die Trendberechnung für alle Messpunkte ist im Anhang zu finden. Bei den vier ausgewählten Messpunkten handelt es sich um folgende landwirtschaftliche Nutzungsgebiete:

- SCHU00: Futterbau, Rinder werden z. T. gesömmert
- ESC08: mehrheitlich Futterbau, teilweise Ackerbau ⁶⁶
- UR02: Futterbau
- ZB01: Futterbau; repräsentiert einen wenig belasteten Standort

Generell ist festzustellen, dass an vielen Messpunkten höhere Ammoniakkonzentrationen als im verregneten Vorjahr 2021 und eine tiefere Belastung als in den Jahren 2018 bis 2020 gemessen wurde. Absolut gesehen ist das Niveau noch immer hoch.

- SCHU00: Seit Messbeginn (2000) zeigt sich eine statistisch signifikant zunehmende Ammoniakkonzentration ($+0.08 \mu\text{g m}^{-3}$ pro Jahr). Nach einem leichten Rückgang zwischen 2015 und 2017 nimmt der Messwert in den Jahren 2018 und 2019 sprunghaft zu. Die Messung liegt seit 2020 wieder im Bereich vor 2015.
- ESC08: Seit Messbeginn (2004) zeigt sich eine statistisch signifikante, zunehmende Ammoniakkonzentration ($+0.13 \mu\text{g m}^{-3}$ pro Jahr). Die Werte aus den Jahren 2021 und 2022 sind, nach sehr hohen Messwerten in den Jahren 2018 bis 2020, wieder auf ähnlichem Niveau wie vor 2018.
- UR02: Der langjährige Trend seit 2010 zeigt eine leicht abnehmende Ammoniakkonzentration ($-0.02 \mu\text{g m}^{-3}$ pro Jahr). Dieser ist aber nicht statistisch signifikant, da zwischen 2016 und 2020 stetig steigende Konzentrationen verzeichnet wurden. Auch hier ist der Messwert 2022 wieder leicht höher als im Vorjahr.
- ZB01: Der langfristige Trend ist gleichbleibend ($+0.00 \mu\text{g m}^{-3}$ pro Jahr). Die Konzentrationen sind insgesamt auf einem tieferen Niveau als bei den vorherig gezeigten Messpunkten.

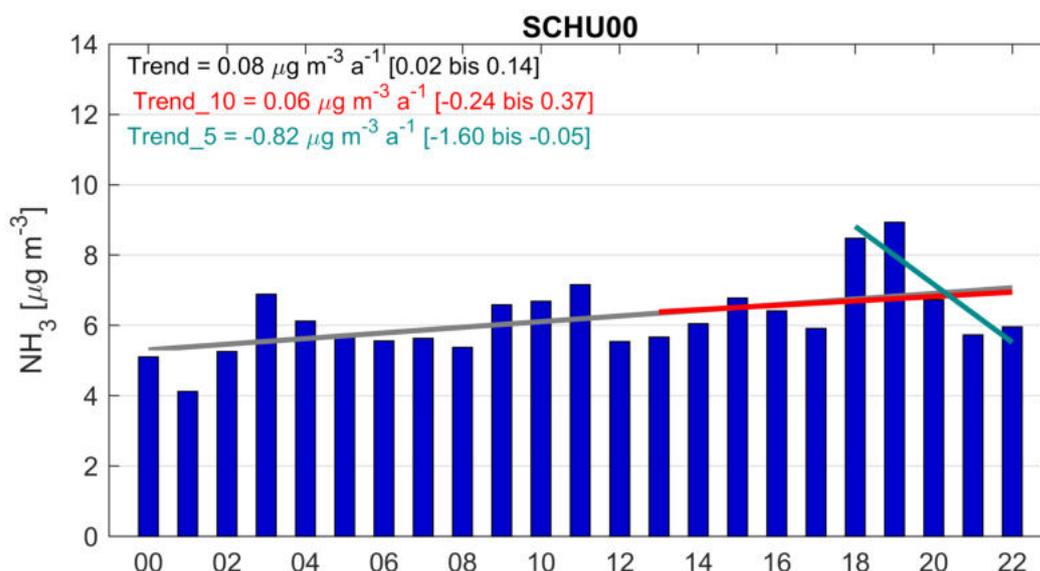


Abbildung 23: Trendberechnung der Jahresmittel am Messpunkt SCHU00. Der graue Trend bezieht sich auf die ganze Messperiode, der rote und türkise Trend auf die letzten zehn bzw. fünf Jahre.

⁶⁶Bis zum Bericht 2022 wurde hier der Messpunkt ESC14 gezeigt. Dieser zeigt aber für das Messgebiet aussergewöhnlich hohe Messwerte und ist daher nicht repräsentativ.

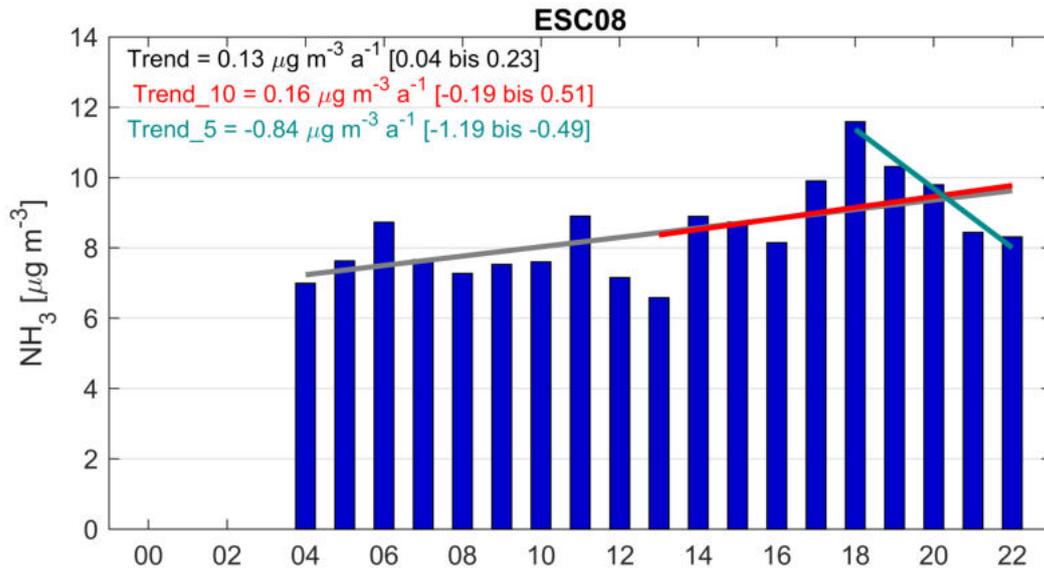


Abbildung 24: Trendberechnung der Jahresmittel am Messpunkt ESC14. Der graue Trend bezieht sich auf die ganze Messperiode, der rote und türkise Trend auf die letzten zehn bzw. fünf Jahre.

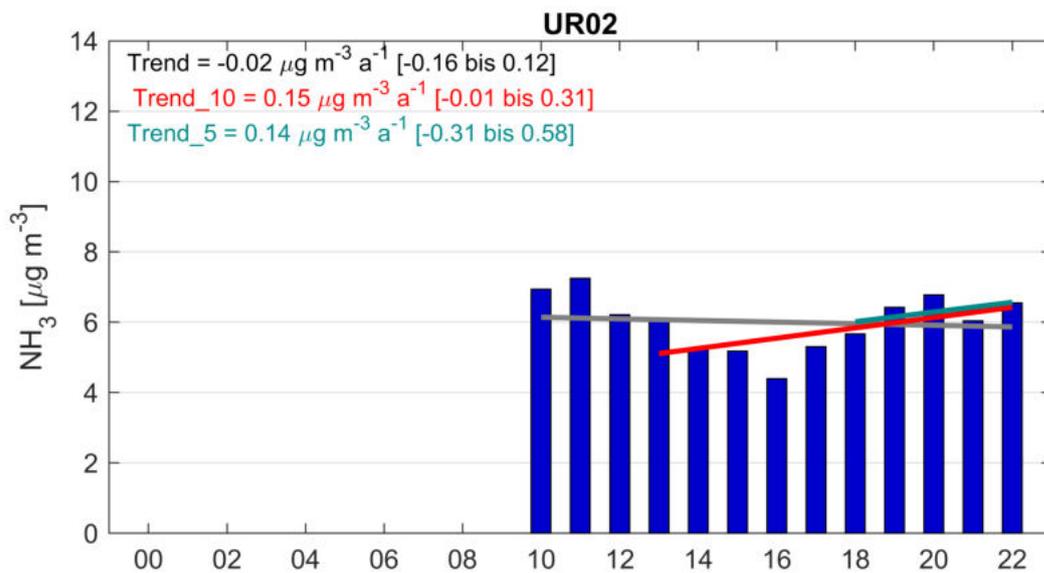


Abbildung 25: Trendberechnung der Jahresmittel am Messpunkt UR02. Der graue Trend bezieht sich auf die ganze Messperiode, der rote und türkise Trend auf die letzten zehn bzw. fünf Jahre.

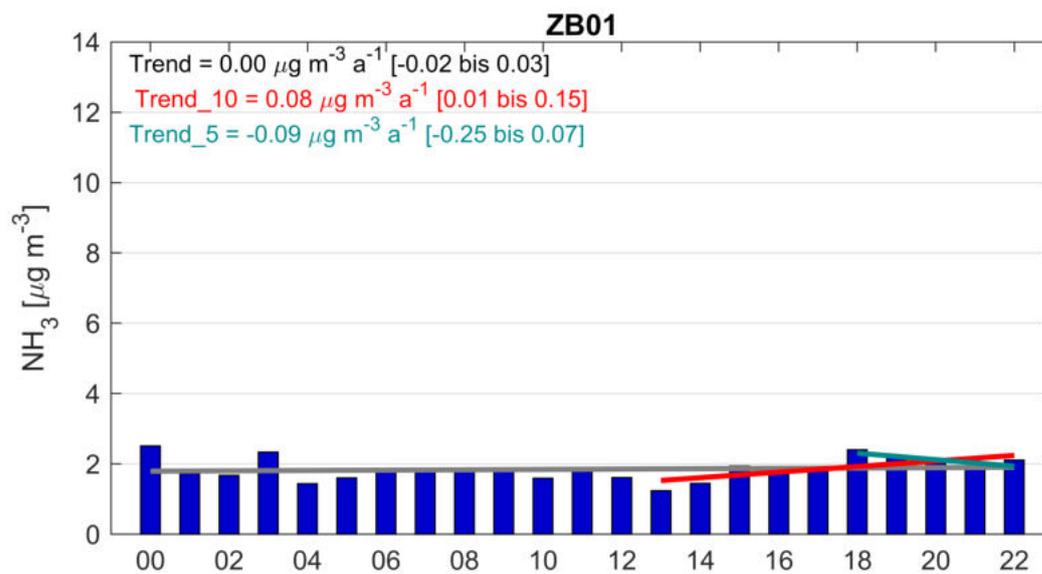


Abbildung 26: Trendberechnung der Jahresmittel am Messpunkt ZB01. Der graue Trend bezieht sich auf die ganze Messperiode, der rote und türkise Trend auf die letzten zehn bzw. fünf Jahre.

4 Diskussion und Schlussfolgerungen

Die Ammoniakkonzentrationen in der Zentralschweiz bewegten sich im Jahr 2022 in den meisten Messungen auf dem Niveau der Werte von vor 2018 oder leicht darüber. Die Immissionswerte waren damit tiefer als in den Hitzejahren 2018–2020, jedoch höher als im von Starkniederschlägen geprägten Jahr 2021. Der **Frühlingspeak im März war an den meisten Messpunkten aussergewöhnlich deutlich ausgeprägt und fiel zeitlich mit dem synchronen Ausbringen von Gülle zusammen**. Je nach Messpunkt verblieben die Konzentrationen danach auf erhöhtem Niveau oder stiegen nach einem kurzfristigen Rückgang in den Sommermonaten erneut an. Der Herbstpeak war – je nach Messpunkt – deutlich bis gar nicht sichtbar.

Die **kurzfristigen Trends** (2018–2022) sind durch die Wetterextreme der letzten Jahre geprägt und in allen Messgebieten negativ, jedoch nicht überall statistisch signifikant. Während den heissen und trockenen Jahren 2018–2020 entwich wohl viel Stickstoff in Form von Ammoniak aus der Gülle und verweilte anschliessend in der Atmosphäre. Im Gegensatz dazu zeigte das Jahr 2021 einen kühlen Frühling mit verregnetem Sommer, wodurch die Ammoniakverluste durch die Luft wahrscheinlich zurückgingen und die gemessenen Konzentrationen tiefer waren. Dies heisst jedoch nicht, dass der Stickstoffverlust aus der Landwirtschaft insgesamt kleiner wurde. Für eine ganzheitliche Analyse diesbezüglich müsste die Nitratauswaschung aus dem Boden in tiefere Bodenschichten und das Grundwasser quantifiziert werden.⁶⁷

Im Gegensatz zu den kurzfristigen Trends zeigen die **langfristigen Berechnungen seit Messbeginn neutrale bis positive Entwicklungen** der Ammoniakimmissionen. Dies erstaunt angesichts einer Emissionsreduktion von 6.4 % auf nationaler Ebene (Abbildung 1). Die spezifischen Emissionsreduktionen rund um die Zentralschweizer Messpunkte sind unbekannt.

Ein Grund für diese positiven langfristigen Trends sind - wie bereits erwähnt - sicherlich die extrem heissen und trockenen **Witterungsbedingungen** der Jahre 2018–2020. Doch auch wenn die Ammoniakimmissionen um den Witterungseinfluss bereinigt werden, zeigten sich zwischen 2000 und 2021 an 17 von 32 untersuchten Schweizer Messpunkten signifikant zunehmende langfristige Trends (Abbildung 27).⁶⁸ Dazu gehören auch die Zentralschweizer Messpunkte RIG, FRAU, ZIGE, FRUE, HOL01, NEU02, ESCH08 und SCHU00. Der positive Trend bei WAU13, WAU16, INWI, RO und ZB01 ist nicht signifikant (Kapitel 3.3).

Eine weitere mögliche Erklärung für die Zunahme in wetterbereinigten langjährigen Ammoniakkonzentrationen ist, dass Ammoniak in der Luft weiter mit Säuren reagiert, was zur **sekundären Bildung von Feinstaubpartikeln** führt (Kapitel 1.1). Die Säurekonzentration in der Luft in der Schweiz hat durch diverse erfolgreiche lufthygienische Massnahmen in den letzten Jahren jedoch abgenommen. Modellrechnungen zeigen, dass die NH_3 -Konzentration in der Schweiz heute im jährlichen Mittel um $0.9 \mu\text{g m}^{-3}$ tiefer wäre, wenn die Emissionen von NO_x und SO_2 heute noch auf ähnlich hohem Niveau wie 2004 wären.

⁶⁷Wey, H. (2022). Nitrate leaching under arable land: monitoring, mitigation measures and memory effects. Dissertation. Universität Neuchâtel.

⁶⁸Grange, S. K., Sintermann, J. & Hueglin, C. (2023). Meteorologically normalised long-term trends of atmospheric ammonia (NH_3) in Switzerland/Liechtenstein and the explanatory role of gas-aerosol partitioning. Science of The Total Environment, 900, 165844. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.165844>

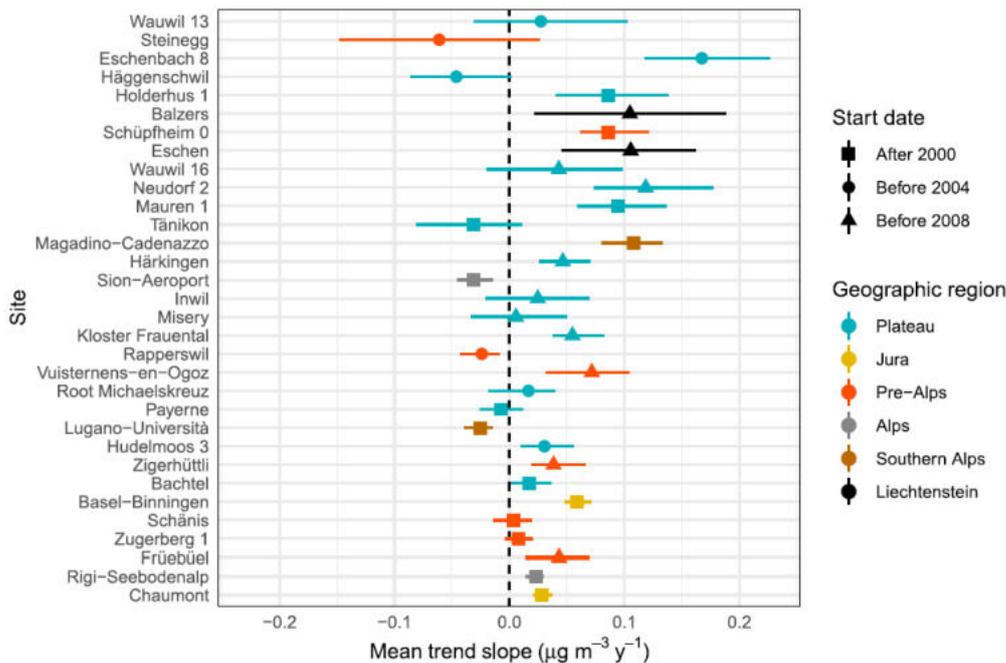


Abbildung 27: Mittlere witterungsbereinigte NH_3 -Trends zwischen 2000 und 2021 für 32 Messpunkte in der Schweiz und Liechtenstein. Die Standorte sind von oben nach unten nach abnehmender mittlerer NH_3 -Konzentration geordnet. Beinhaltet der Fehlerbalken die 0 nicht, so ist der Trend signifikant. Abbildung übernommen aus Grange et al. (2023).⁶⁸

Sowohl Witterungsschwankungen als auch die Feinstaubbildung können die langfristigen positiven Trends jedoch nur teilweise erklären. Bei den Messpunkten ESC08, HOL01 und NEU02 resultiert auch nach der Bereinigung von Witterung und Feinstaubbildung ein signifikant positiver Trend. Gemäss der aktuellen Datenlage muss daher davon ausgegangen werden, dass die Verringerung der Ammoniakemissionen rund um die Messpunkte zu gering ist, um die Immissionen ganzjährig und langfristig zu senken. Zu gleichen Ergebnissen kommt auch der schweizweite Bericht zu Ammoniak-Immissionsmessungen.⁶⁹ Es ist daher angebracht, die Tierzahlen im Umkreis der Messpunkte zu untersuchen und bei Stallrenovierungen auf emissionsmindernde Massnahmen zu achten, wie dies beim Musterstall in Merlischachen SZ bereits umgesetzt wurde (Kapitel 1.1).^{70 71 72}

Um die Ziele der verschiedenen Massnahmenpläne und Ressourcenprojekte (Kapitel 1.4 und Abbildung 28) zu prüfen ist es dringend notwendig, in den nächsten Jahren die Messungen an möglichst vielen Standorten weiterzuführen. Das Monitoring sollte weiterhin nicht nur an landwirtschaftlich exponierten Standorten erfolgen, sondern auch ökologisch sensitive Standorte mit einschliessen. Untersuchungen haben gezeigt, dass wegen der Umwandlung von Ammoniak (NH_3) zu Ammonium (NH_4^+) auch der gesamte reduzierte Stickstoff (NH_x) eine wichtige Messgrösse ist. Allerdings ist, im Gegensatz zum gasförmigen Ammoniak, die Konzentration von Ammonium im Feinstaub räumlich homogen. Daher sind weniger Messpunkte notwendig. Den Kantonen wird geraten, weiterhin an den Messungen der Stickstoff-Deposition teilzunehmen, welche alle 5 Jahre durchgeführt werden sowie das Messnetz eventuell auszubauen.⁷³

⁶⁹Seitler, E. & Meier, M. (2022). Ammoniak-Immissionsmessungen in der Schweiz 2000 bis 2021. FUB.

⁷⁰Umwelt Zentralschweiz (2023). Rindviehstall der Zukunft. <https://www.umwelt-zentralschweiz.ch/was-wir-machen/themen/landwirtschaft/rindviehstall-der-zukunft/>. Letzter Zugriff: 04.05.2023.

⁷¹Gerlach, M. (2023). Zentralschweizer Leuchtturmprojekt. Schweizer Bauer. https://www.ammoniak.ch/files/Bilder/Zimmermann/SchweizerBauer_Zimmermann_Merlischachen.pdf. Letzter Zugriff: 04.05.2023.

⁷²Scherer, J. (2023). Dünger sparen und Umwelt schonen. Bauernzeitung. https://www.ammoniak.ch/files/Bilder/Zimmermann/Bauernzeitung_Zimmermann_Merlischachen.pdf. Letzter Zugriff: 04.05.2023.

⁷³Seitler, E., Meier, M., Ehrenmann, Z. (2021): Atmosphärische Stickstoff-Deposition in der Schweiz 2000 bis 2019. FUB-Forschungsstelle für Umweltbeobachtung.

5 Anhang

5.1 Detaillierte Standortbeschreibungen

In der Folge sind die Standorte der Messpunkte einzeln aufgezeigt. Dabei stehen rote Punkte für momentan aktive und rosa Punkte für inaktive Messpunkte. Das Kartenmaterial stammt von Swisstopo. Der Ausschnitt wurde jeweils so gewählt, dass die lokale Raumnutzung sichtbar wird.

5.1.1 Wauwil, Luzern

Im Messgebiet Wauwil wurde schon im Jahr 2000 mit Ammoniakmessungen begonnen. In den weiteren Jahren kamen ein Nord-Süd- und ein Ost-West-Transekt hinzu, um die lokal-räumliche Verteilung der Ammoniakkonzentration zu durchleuchten. Zusätzlich wurden rund um das Naturschutzgebiet Wauwiler Moos Ammoniakmessungen durchgeführt.

Die Flächen um die Messpunkte werden acker- wie auch futterbaulich genutzt. Davon ausgenommen sind die Naturschutzflächen, welche extensiv bewirtschaftet werden. Die flache Ebene wird durch Baumreihen durchkreuzt, welche als Senke für Ammoniak wirken. Durch die topographische Lage des Messgebietes bilden sich oft bodennahe Inversionen aus.



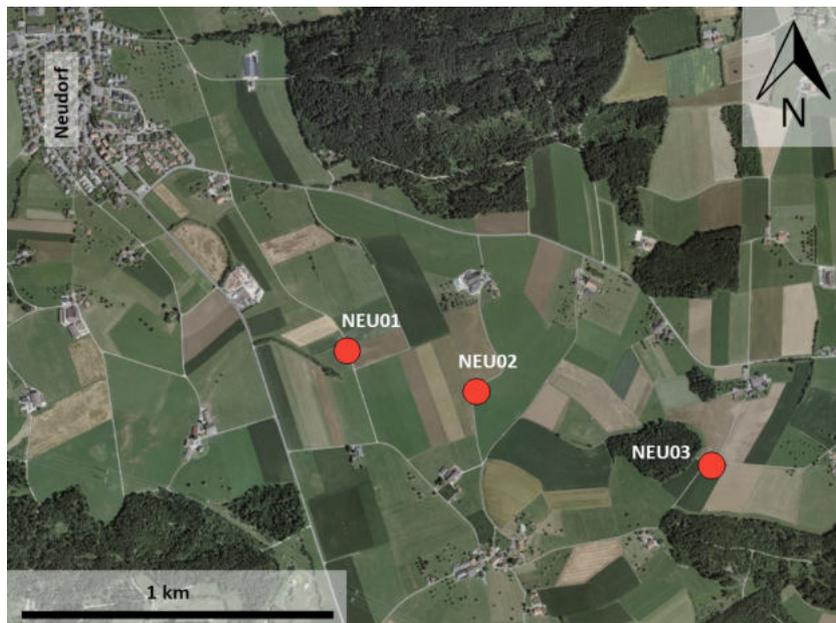
5.1.2 Eschenbach, Luzern

Im Messgebiet Eschenbach startete die Ammoniakmessung an diversen Standorten im Jahr 2004. Zum jetzigen Zeitpunkt sind noch fünf Messpunkte in Betrieb (dunkelrot eingezeichnet). Die Flächen um die Messpunkte werden mehrheitlich futterbaulich und teilweise ackerbaulich genutzt. Trotz des leicht hügeligen Geländes bildet sich auch hier oft bodennahe Kaltluft aus, die jedoch in Richtung Baldeggersee abfließt.



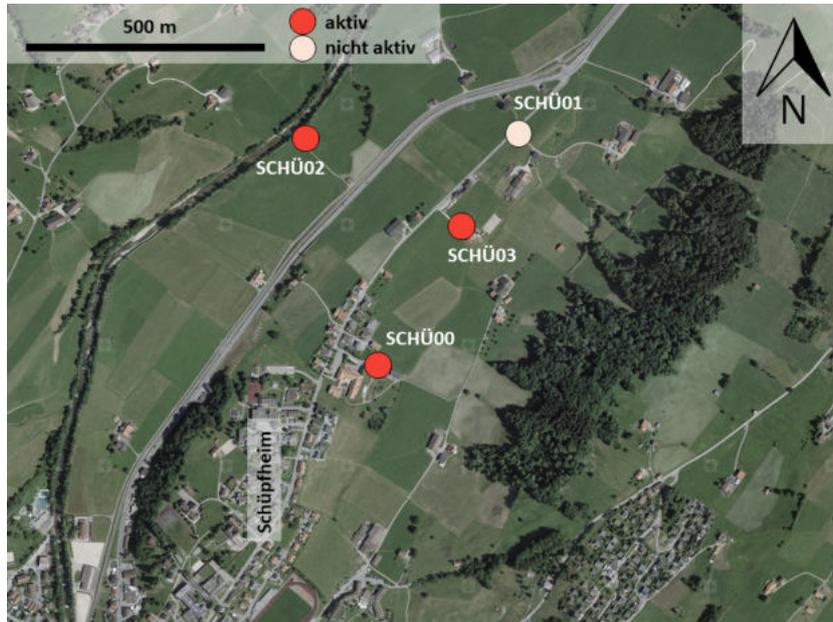
5.1.3 Neudorf, Luzern

An den drei Messpunkten im Gebiet Neudorf werden seit 2006 Ammoniakmessungen durchgeführt. Die Flächen um die Messpunkte werden mehrheitlich futterbaulich und teilweise ackerbaulich genutzt. Durch die erhöhte Lage (740 m. ü. M.) ist das gesamte Messgebiet gut durchlüftet und liegt häufig über Inversionen im Talgrund.



5.1.4 Schüpfheim, Luzern

Das Messgebiet Schüpfheim besteht heute aus drei Messpunkten. Am Messpunkt SCHÜ00 werden seit 1999 Ammoniakmessungen durchgeführt. Im Jahr 2007 kamen dann die zwei Messpunkte SCHÜ01 und SCHÜ02 hinzu. Im Sommer 2016 musste der Messpunkt SCHÜ01 verschoben werden und wird als SCHÜ03 am neuen Standort weitergeführt. Die Flächen um die Messpunkte werden futterbaulich genutzt. Teilweise werden Rinder gesömmert, welche somit während der Vegetation nicht auf den Betrieben sind. Der Messpunkt SCHÜ01 lag nördlich eines Stalles, SCHÜ02 liegt am Ufer der Kleinen Emme, der Messpunkt SCHÜ03 knapp 300 m südwestlich von SCHÜ01. Diese unterschiedlichen Lagen machen sich direkt in den Ammoniakkonzentrationen bemerkbar.



5.1.5 Holderhus, Luzern

Im Jahr 2000 starteten die Ammoniakmessungen im Gebiet Holderhus. Die Flächen um die Messpunkte werden durch einen Betrieb mehrheitlich futterbaulich und teilweise ackerbaulich genutzt. Die Landschaft ist kleinräumlich sehr unterschiedlich. Deshalb ist es schwierig, in diesem Messgebiet einen repräsentativen Standort zu finden.



5.1.6 Root Michaelskreuz, Luzern

Im Messgebiet Root Michaelskreuz wird die Ammoniakkonzentration seit 2011 an einem Messpunkt erfasst. Die Flächen um die Messpunkte werden futterbaulich genutzt. Das Messgebiet liegt zeitweise über den Inversionen im Mittelland und weist mikroklimatisch eine leichte Aufwindthermik während des Tages auf.



5.1.7 Nidwalden

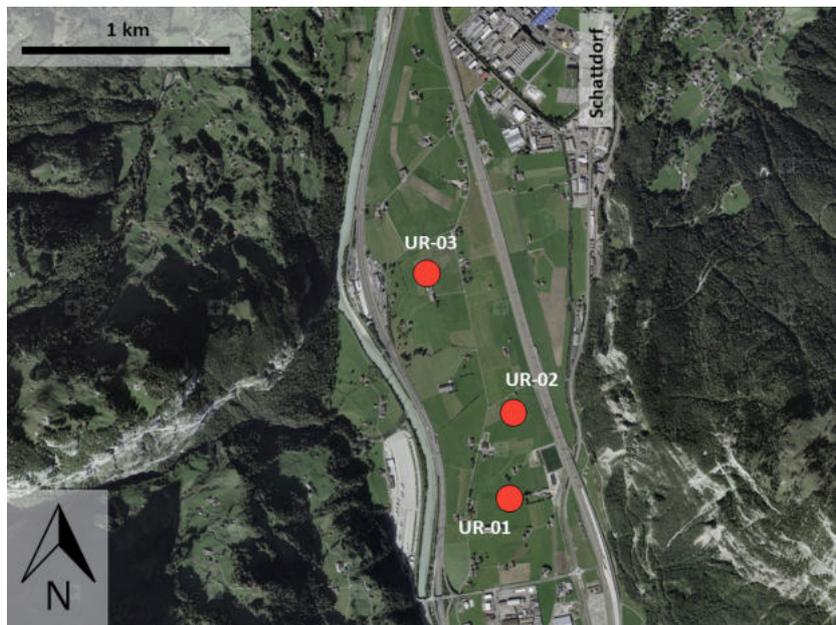
Im Rahmen des Ressourcenprojekts Ammoniak Zentralschweiz wurden im Kanton Nidwalden drei Messpunkte installiert. Die Messungen starteten im Jahr 2010. Zwei Messpunkte liegen westlich von Stans, einer in Oberdorf. Die Flächen um die Messpunkte werden futterbaulich genutzt. Die beiden Messpunkte bei Stans befinden sich in der Stanser Ebene. Der Messpunkt in Oberdorf befindet sich nahe der Engelberger Aa, Richtung Engelbergertal.



5.1.8 Uri

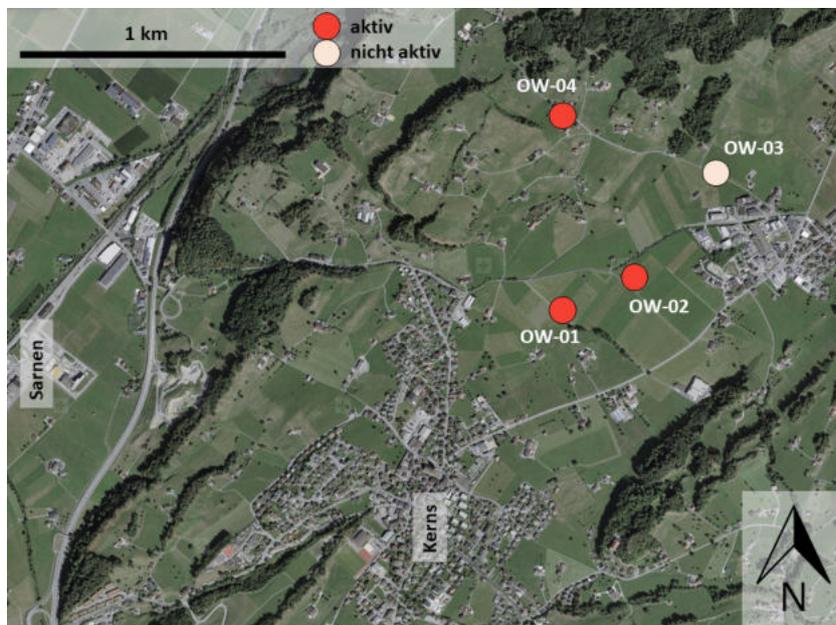
Die drei Ammoniak-Messpunkte des Kantons Uri, welche ebenfalls im Rahmen des Ressourcenprojekts Ammoniak Zentralschweiz installiert wurden, liegen in der Ebene zwischen Schattdorf und Erstfeld im Urner Reusstal. Die Flächen um die Messpunkte werden futterbaulich genutzt.

In Ergänzung zum bisherigen Messgebiet Uri, wird weiter nördlich die Ammoniakkonzentration seit Anfang 2022 zusätzlich beim Schloss Apro (APRO), bei der Messstation Gartenmatt (GRT) und zwischen Schattdorf und Bürglen (SCB) gemessen. Das neue Messgebiet wird Uri Nord genannt.



5.1.9 Obwalden

Im Kanton Obwalden wurden im Rahmen des Ressourcenprojekts Ammoniak Zentralschweiz drei Messpunkte installiert. Die Messpunkte stehen in Kerns in einer Ebene nordöstlich des Ortsteils Sand. Die Flächen um die Messpunkte werden futterbaulich genutzt. Der Standort OW-03 musste im Jahr 2016 aufgegeben werden, da der Strommast zurückgebaut wurde. Als Ersatz wurde ab Juni 2016 der Standort OW-04 in Betrieb genommen.



5.1.10 Schwyz

Im Talkessel von Schwyz in der Nähe von Ibach liegen die Ammoniak-Messpunkte des Kantons Schwyz, von welchen momentan zwei aktiv sind. Diese drei Messpunkte SZ-01, SZ-02 und SZ-03 wurden ebenfalls im Rahmen des Ressourcenprojekts Ammoniak Zentralschweiz installiert. Im Februar 2020 wurden die Messpunkte SZ-02 und SZ-03 durch SZ-03a ersetzt. Die Flächen um die Messpunkte werden futterbaulich genutzt.



Zusätzlich wurde im Kanton Schwyz von 2014–2017 und wiederum ab Frühjahr 2019 in Wangen die Ammoniakkonzentration gemessen. Der Messpunkt (WAN01) liegt in der Linthebene zwischen Wangen und Lachen und wurde aufgrund der Flechtenkartierung 2013 bzw. aufgrund der Messperiode 2014–2017 so gewählt.

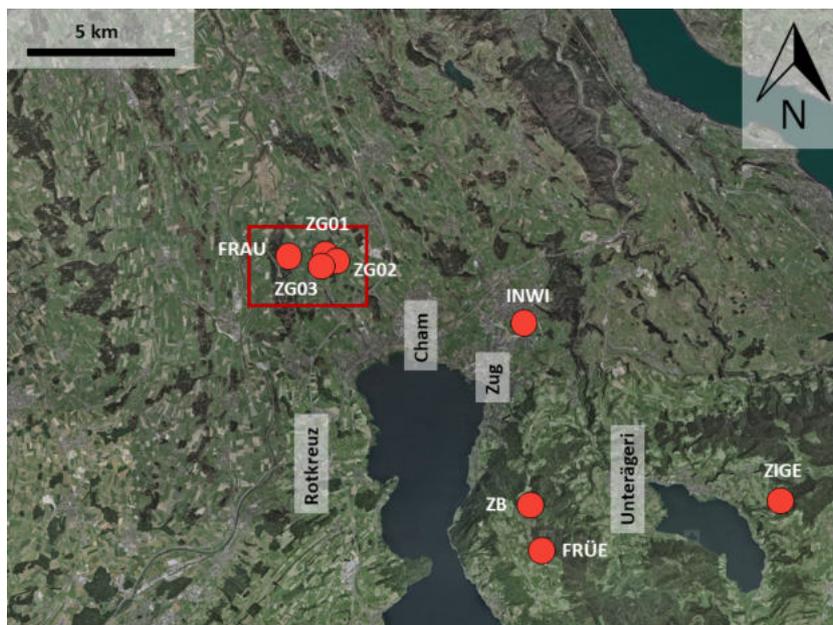
Ebenfalls seit Frühjahr 2019 werden Messungen in Schübelbach (SCHUB01) und Tuggen (TUG01) durchgeführt.



5.1.11 Zug

Die fünf kantonalen Messgebiete mit je einem Messpunkt verteilen sich über das gesamte Kantonsgebiet, wobei die Station Zugerberg (ZB) durch das Institut für angewandte Pflanzenbiologie (IAP) betrieben wird. Bei der Auswahl der Messgebiete interessierte vor allem, wie die Ammoniakbelastung in sensiblen Ökosystemen, für die sowohl Critical Loads als auch Critical Levels definiert sind, aussieht (Messgebiete Zigerhüttli, Fruebüel und Frauental). Zusätzlich wurde ein typischer Agglomerations-Hintergrundstandort gewählt, um den Einfluss von Strassen und der Stadtnähe zu bestimmen (Messgebiet Inwil).

- Inwil (INWI): Das Messgebiet steht im Baarer Talboden in einer Landwirtschaftszone mit mehrheitlich futterbaulicher und teilweise ackerbaulicher Nutzung.
- Zigerhüttli (ZIGE): Der Messpunkt befindet sich am Hochmoor-Naturschutzgebiet Zigerhüttli bei Oberägeri. Nebst den angrenzenden Streuflächen werden die umliegenden Flächen futterbaulich und eher extensiv bewirtschaftet.
- Fruebüel (FRÜE): Das Messgebiet steht im landwirtschaftlichen Versuchsbetrieb der ETH Zürich, nahe von Mooregebieten. Die Flächen um den Messpunkt werden futterbaulich genutzt.
- Kloster Frauental (FRAU): Der Messpunkt steht in der Nähe des Naturschutzgebietes Lorze, inmitten von ökologischen Ausgleichsflächen. Das Kloster betreibt in der Nähe eine grosse Tierhaltungsanlage, die Gülle wird mit dem Schleppschlauch ausgebracht.
- Zugerberg 1 (ZB01): Der Messpunkt befindet sich auf der Kuppe eines Hügels inmitten einer Kuhweide und auf dem Dach eines Messcontainers. Die Flächen um den Messpunkt werden futterbaulich genutzt.



Neben fünf kantonalen Messstationen hat der Kanton Zug im Rahmen des Ressourcenprojekts Ammoniak Zentralschweiz zusätzlich drei Messpunkte installiert (ZG01, ZG02 und ZG03). Diese liegen im Gebiet nördlich von Hagedorn (Gemeinde Cham). Die Flächen um die Messpunkte werden acker- wie auch futterbaulich genutzt. Die Topographie ist leicht hügelig, offen und gut durchlüftet.



5.1.12 Rigi-Seebodenalp (NABEL)

Bei der NABEL-Station Rigi-Seebodenalp befindet sich ebenfalls eine Ammoniak-Messstation. Der Messpunkt befindet sich auf der Kante der Mülmannsegg, 600 m über dem Vierwaldstättersee auf gut 1'000 m ü. M.



5.2 Charakterisierung der Messpunkte

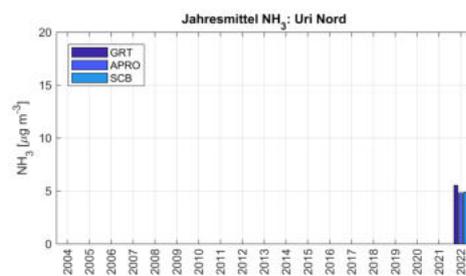
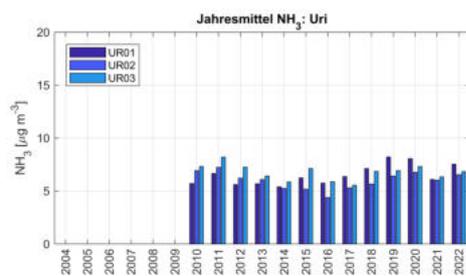
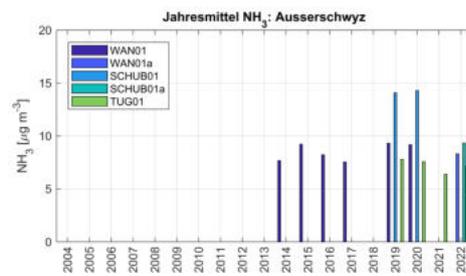
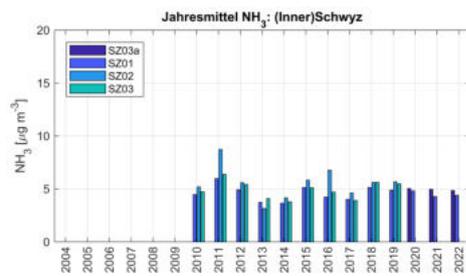
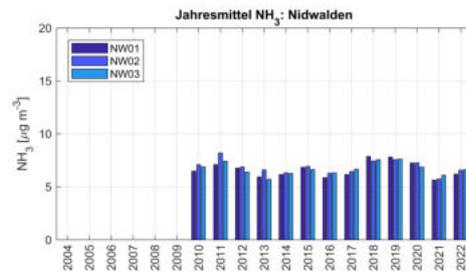
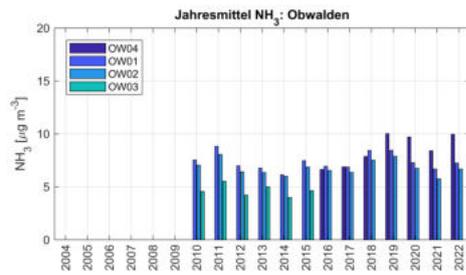
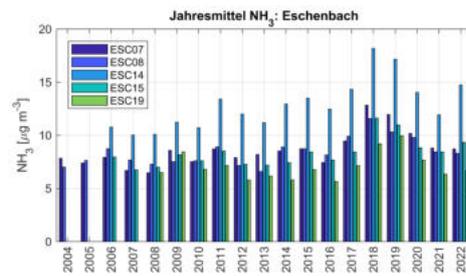
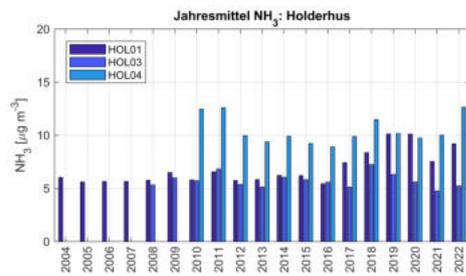
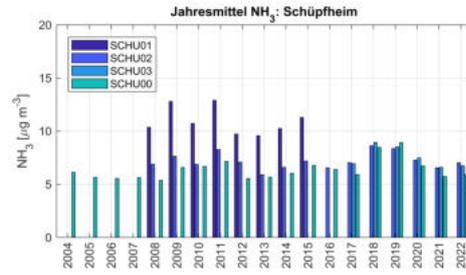
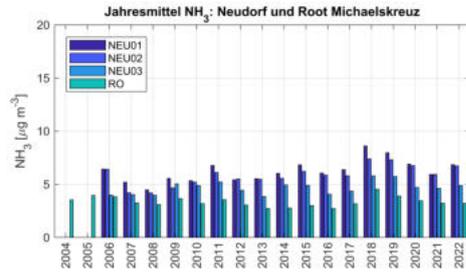
Tabelle 2: Charakterisierung der Ammoniak-Messpunkte, Teil 1. Die angegebenen Jahreswerte sind Jahresmittel in $\mu\text{g m}^{-3}$.

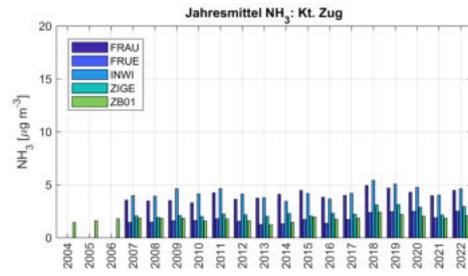
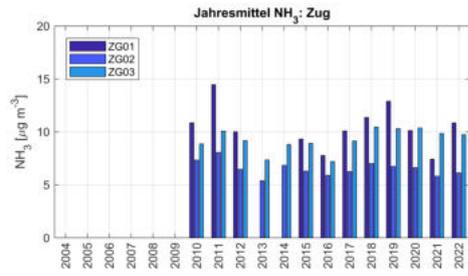
Standort		Messnetz	E-Koord.	N-Koord.	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
WAU10	Wauwil 10	Luzern	2 644 735	1 224 950	9.2	8.3	7.4	7.3	8.9	7.5	8.4	9.4	9.0	8.7	8.1	9.1
WAU13	Wauwil 13	Luzern	2 644 694	1224173	10.9	10.3	9.2	9.0	10.0	9.5	9.8	10.9	11.1	12.3	10.0	9.0
WAU14	Wauwil 14	Luzern	2 643 364	1 224 124	10.0	9.0	7.5	7.6	9.5	8.4	8.8	8.1	8.9	8.9	7.5	7.3
WAU16.2	Wauwil 16.2	Luzern	2 643 707	1 224 651	6.7	5.7	4.6	4.8	5.3	4.8	5.1	6.2	6.3	5.4	4.6	4.8
WAU16.4	Wauwil 16.4	Luzern	2 643 707	1 224 651	7.3	6.2	5.1	5.5	6.0	5.5	5.6	6.9	6.9	6.0	5.2	5.5
WAU17	Wauwil 17	Luzern	2 643 451	1 225 590	9.0	7.8	7.1	6.5	7.3	6.7	7.3	8.5	8.3	7.9	6.6	6.6
WAU19	Wauwil 19	Luzern	2 644 113	1 224 324	8.6	7.2	6.2	7.1	8.0	8.0	7.1	8.2	7.6	7.1	6.4	6.1
NEU01	Neudorf 1	Luzern	2 659 290	1 224 550	6.8	5.4	5.5	6.0	6.8	6.1	6.4	8.6	8.0	6.9	5.9	6.8
NEU02	Neudorf 2	Luzern	2 659 706	1 224 499	6.1	5.5	5.5	5.6	6.2	5.9	5.8	7.4	7.3	6.8	5.9	6.7
NEU03	Neudorf 3	Luzern	2 660 470	1 224 246	5.2	4.4	3.9	5.0	4.9	4.1	4.4	5.8	5.7	4.7	4.6	4.9
SCHÜ00	Schüpfheim 0	Luzern	2 644 727	1 201 091	7.1	5.5	5.7	6.1	6.8	6.4	5.9	8.5	8.9	6.7	5.7	6.0
SCHÜ01	Schüpfheim 1	Luzern	2 645 021	1 201 587	12.9	9.7	9.6	10.2	11.3	-	-	-	-	-	-	-
SCHÜ02	Schüpfheim 2	Luzern	2 644 537	1 201 575	8.3	7.1	5.9	6.6	7.2	6.6	7.0	8.6	8.4	7.3	6.6	7.0
SCHÜ03	Schüpfheim 3	Luzern	2 644 883	1 201 384	-	-	-	-	-	-	7.0	8.9	8.5	7.5	6.6	6.7
HOL01	Holderhus 1	Luzern	2 657 129	1 216 962	6.6	5.8	5.8	6.2	6.2	5.5	7.4	8.3	10.1	10.1	7.5	9.2
HOL03	Holderhus 3	Luzern	2 657 229	1 216 724	6.8	5.4	5.1	6.1	5.8	5.6	5.1	7.2	6.3	5.6	4.8	5.2
HOL04	Holderhus 4	Luzern	2 657 256	1 216 902	12.6	10.0	9.4	9.9	9.2	8.9	9.9	11.5	10.2	9.8	10.0	12.7
RO	Root Michaelskreuz	Luzern	2 673 847	1 218 489	3.6	3.0	2.7	2.8	3.0	2.7	3.2	4.5	3.9	3.4	3.2	3.2
ESC07	Eschenbach 7	Luzern	2 665 253	1 221 074	8.7	7.9	8.2	8.5	8.7	7.5	9.5	12.8	12.0	10.2	8.8	8.7
ESC08	Eschenbach 8	Luzern	2 665 208	1 221 946	8.9	7.2	6.6	8.9	8.7	8.2	9.9	11.6	10.3	9.8	8.4	8.3
ESC14	Eschenbach 14	Luzern	2 663 387	1 220 976	13.4	12.0	11.2	12.9	13.5	12.5	14.3	18.2	17.2	14.0	11.9	14.7
ESC15	Eschenbach 15	Luzern	2 664 039	1 220 788	8.5	7.3	7.2	7.4	8.5	7.7	8.4	11.6	11.0	8.8	8.4	9.3
ESC19	Eschenbach 19	Luzern	2 664 795	1 221 169	7.2	5.8	6.2	5.8	6.8	5.7	7.2	9.2	10.0	7.7	6.3	6.7
NW01	Stans Galgenried Nord	RP A-ZS	2 669 232	1 202 160	7.1	6.8	5.9	6.2	6.8	5.9	6.2	7.9	7.8	7.3	5.6	6.2
NW02	Stans Galgenried Süd	RP A-ZS	2 669 272	1 201 761	8.2	6.9	6.6	6.3	6.9	6.3	6.4	7.4	7.6	7.3	5.7	6.6
NW03	Oberdorf Schiessstand	RP A-ZS	2 672 375	1 200 273	7.5	6.4	5.7	6.3	6.6	6.3	6.7	7.6	7.6	6.9	6.1	6.6
OW01	Obwalden 1	RP A-ZS	2 664 271	1 195 471	8.8	7.0	6.8	6.1	7.5	7.0	6.9	8.4	8.5	7.3	6.7	7.2
OW02	Obwalden 2	RP A-ZS	2 664 518	1 195 592	7.8	6.4	6.4	6.0	6.9	6.6	6.4	7.5	7.9	6.8	5.8	6.7
OW03	Obwalden 3	RP A-ZS	2 664 798	1 195 978	5.5	4.2	5.0	4.0	4.7	-	-	-	-	-	-	-
OW04	Obwalden 4	RP A-ZS	2 664 301	1 196 174	-	-	-	-	-	-	6.9	7.8	10.0	9.7	8.4	10.0

Tabelle 3: Charakterisierung der Ammoniak-Messpunkte, Teil 2. Die angegebenen Jahreswerte sind Jahresmittel in $\mu\text{g m}^{-3}$.

Standort		Messnetz	E-Koord.	N-Koord.	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
SZ01	Bauschli	RP A-ZS	2 692 420	1 207 555	6.0	4.9	3.7	3.6	5.1	4.2	4.0	5.1	4.9	4.8	4.3	4.4
SZ02	Tändlen	RP A-ZS	2 692 890	1 207 272	9.0	5.6	3.2	4.2	5.8	6.8	4.6	5.6	5.7	-	-	-
SZ03	Rossmattli	RP A-ZS	2 692 550	1 207 040	6.4	5.4	4.1	3.8	5.1	4.7	3.9	5.6	5.5	-	-	-
SZ03a		RP A-ZS	2 692 452	1 207 210	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5.1	5.0	4.8
UR01	Uri 1	RP A-ZS	2 691 655	1 188 171	6.7	5.6	5.7	5.4	6.2	5.6	6.4	7.1	8.2	8.1	6.1	7.5
UR02	Uri 2	RP A-ZS	2 691 718	1 188 555	7.2	6.2	6.1	5.3	5.2	4.4	5.3	5.7	6.4	6.8	6.0	6.5
UR03	Uri 3	RP A-ZS	2 691 372	1 189 215	8.2	7.3	6.4	5.9	7.1	5.9	5.6	6.9	6.9	7.3	6.3	6.8
UR-APRO	Schloss A Pro	-	2 689 265	1 193 430	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4.8
UR-GRT	Gartenmatt	-	2 690 175	1 193 550	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5.5
UR-SCB	Schattdorf-Bürglen	-	2 693 000	1 191 608	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4.9
ZG01	Niederwil 1	RP A-ZS	2 676 343	1 229 868	14.5	10.0	-	-	9.3	7.8	10.1	11.4	12.9	10.1	7.4	10.9
ZG02	Niederwil 2	RP A-ZS	2 676 164	1 229 277	8.1	6.5	5.4	6.8	6.3	5.9	6.3	7.0	6.7	6.6	5.8	6.1
ZG03	Niederwil 3	RP A-ZS	2 675 708	1 229 387	10.1	9.2	7.4	8.8	8.9	7.2	9.2	10.5	10.3	10.4	9.8	9.7
FRAU	Kloster Frauental	Kt. Zug	2 674 546	1 229 562	4.3	3.7	3.7	4.1	4.5	3.8	4.0	4.9	4.7	4.3	4.0	4.5
FRUE	Frübüel	Kt. Zug	2 683 423	1 218 884	1.8	1.6	1.3	1.3	1.7	1.4	1.7	2.4	2.5	2.5	1.9	2.5
INWI	Inwil	Kt. Zug	2 682 567	1 226 900	4.6	4.1	3.8	3.4	4.2	3.7	4.2	5.4	5.1	4.8	4.0	4.6
ZIGE	Zigerhüttli	Kt. Zug	2 691 689	1 220 849	2.3	2.2	2.0	2.3	2.1	2.3	2.2	3.1	3.1	2.9	2.2	3.0
ZB01	Zugerberg 1	Kt. Zug	2 683 000	1 220 500	1.8	1.6	1.2	1.4	1.9	1.8	1.9	2.4	2.2	2.0	1.9	2.1
RIG	Rigi Seebodenalp	NABEL	2 677 845	1 213 462	1.5	1.3	1.3	1.3	1.6	1.2	1.5	1.9	1.8	1.9	1.6	1.8
WAN01	Wangen 01	Kt. Schwyz	2 709 749	1 227 700	-	-	-	7.7	9.2	8.2	7.6	-	9.3	9.2	-	-
WAN01a	Wangen 01a	Kt. Schwyz	2 709 332	1 227 470	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	8.3
SCHUB01	Schübelbach	Kt. Schwyz	2 712 631	1 226 837	-	-	-	-	-	-	-	-	14.1	14.3	-	-
SCHUB01a	Schübelbach	Kt. Schwyz	2 712 488	1 226 762	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	9.3
TUG01	Tuggen	Kt. Schwyz	2 714 630	1 228 761	-	-	-	-	-	-	-	-	7.8	7.6	6.4	7.2

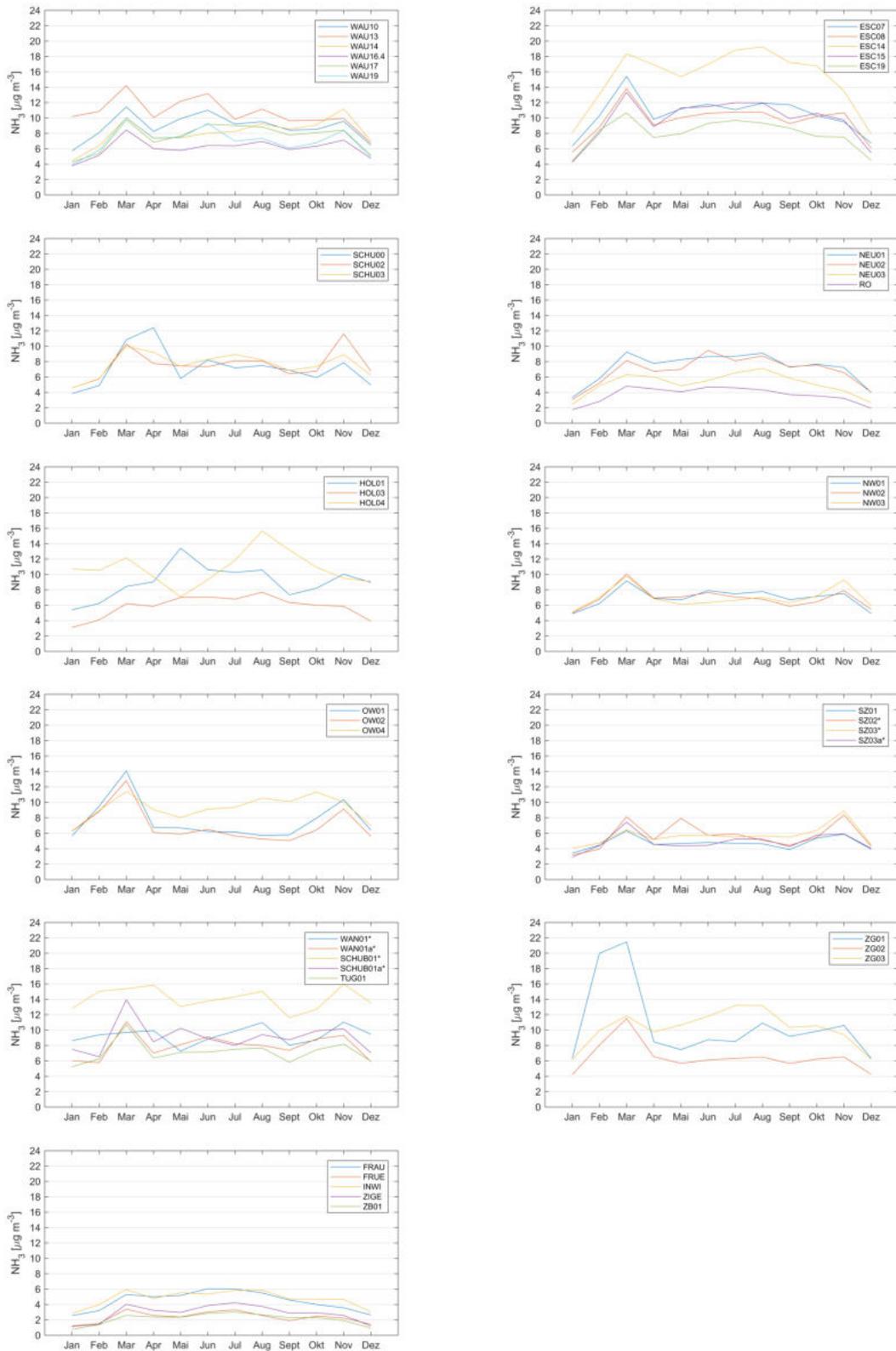
5.3 Jahresmittel nach Messgebieten

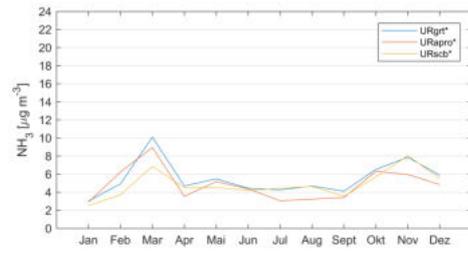
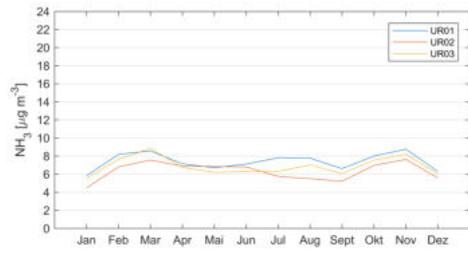




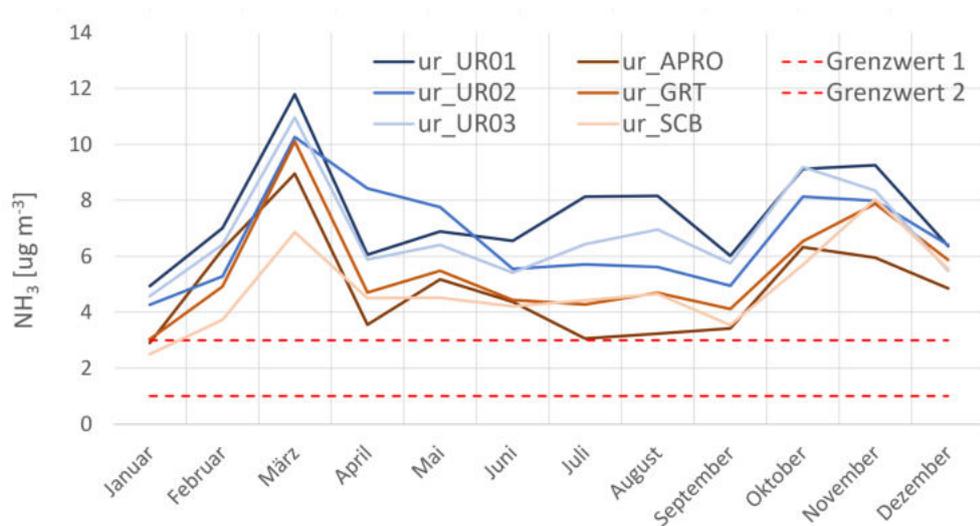
5.4 Jahresgang nach Messgebieten (Mittelung 2018–2022)

Die mit * markierten Messpunkte weisen in den letzten fünf Jahren eine unvollständige Messreihe auf.





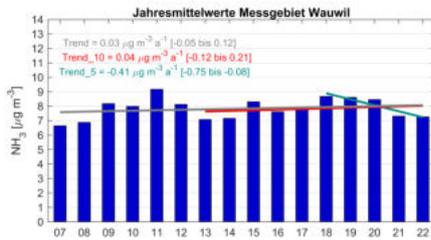
5.5 Jahrgang im Kanton Uri im Jahr 2022



5.6 Trendberechnungen

5.6.1 Jahresmittel-Trends nach Messgebieten

Unter den Grafiken sind jeweils die verwendeten Stationen für die Berechnung des Mittelwerts und der Trendwerte angegeben. Für Uri Nord und Ausserschwyz existieren noch keine Trendberechnungen.



WAU10, WAU13, WAU14, WAU16.4, WAU17, WAU19



SCHU00, SCHU02



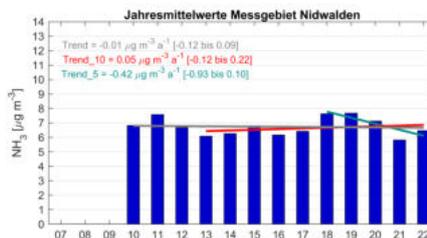
ESC01-12, ESC14, ESC15, ESC19



NEU01, NEU02, NEU03



HOL01, HOL03



NW01, NW02, NW03



OW01, OW02

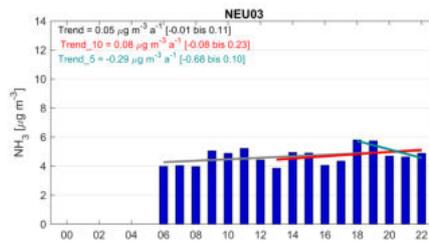
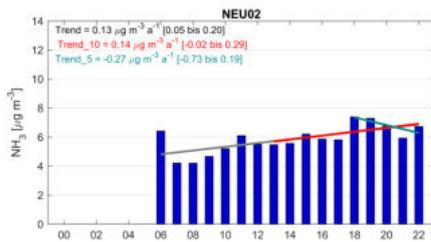
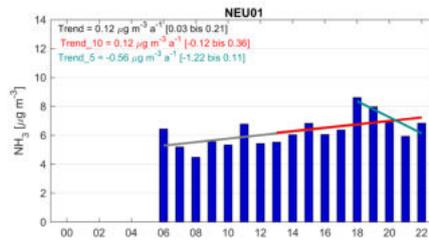
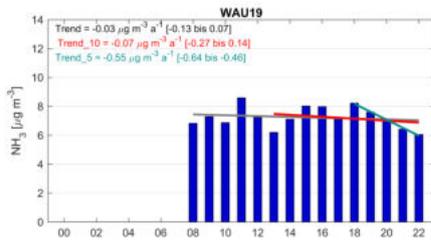
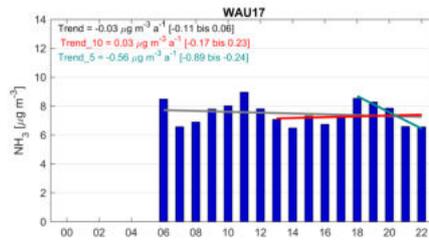
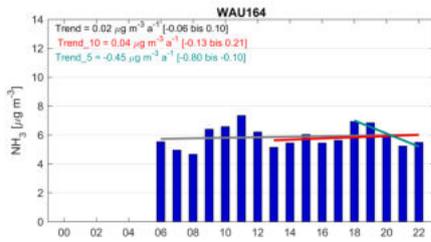
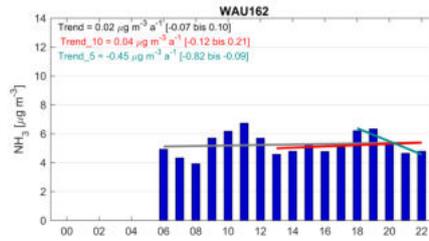
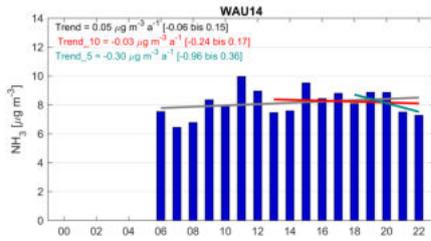
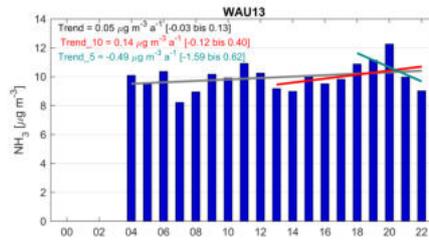
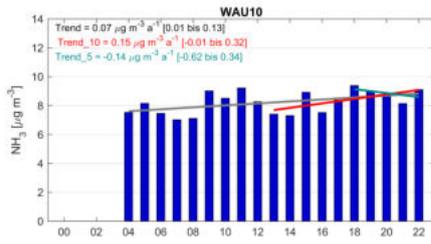


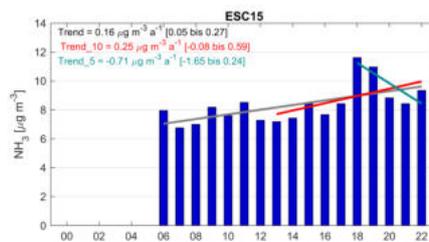
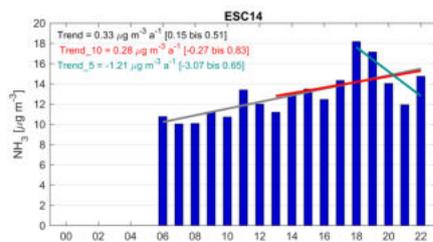
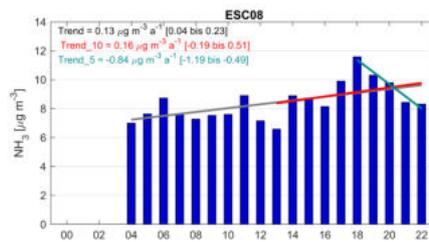
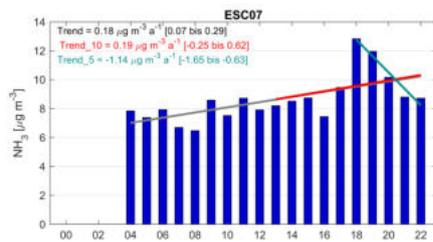
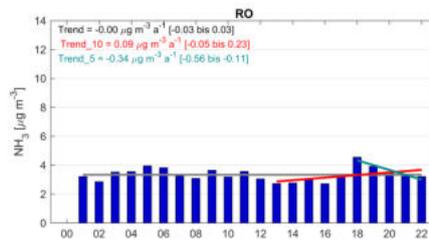
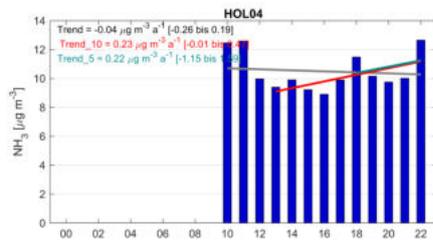
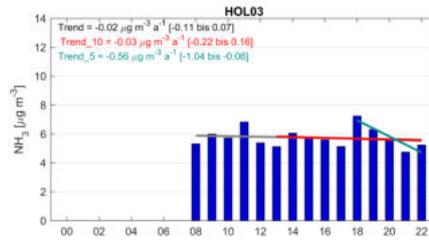
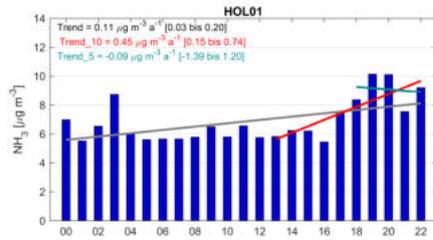
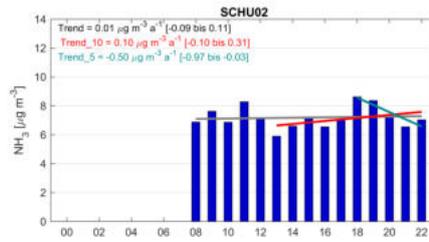
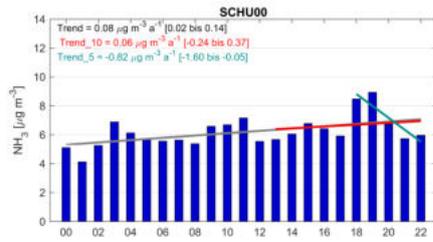
UR01, UR02, UR03

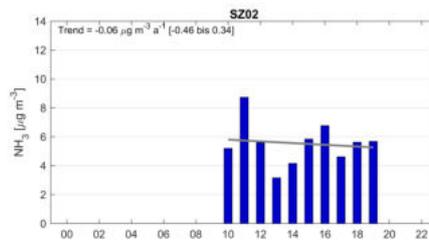
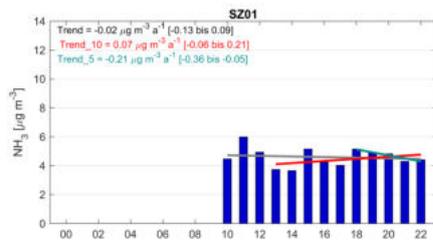
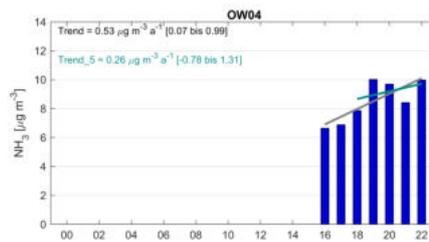
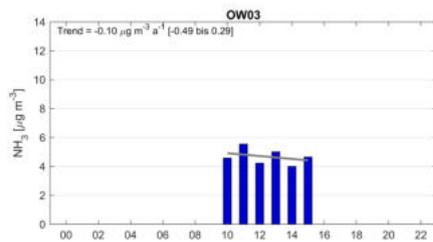
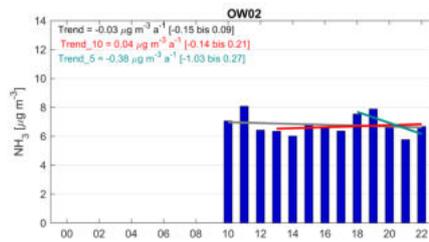
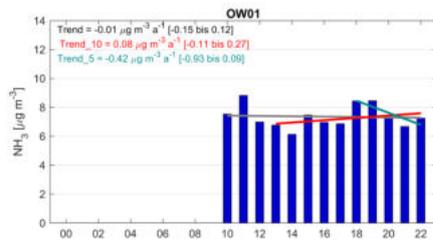
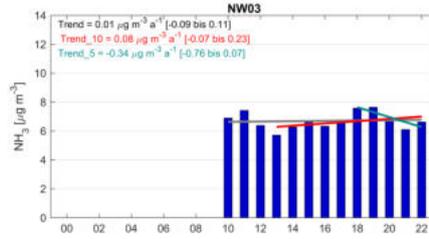
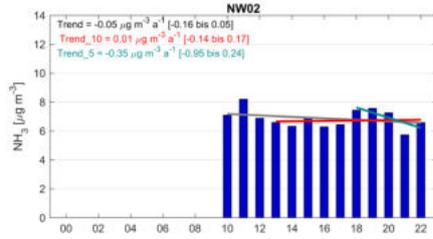
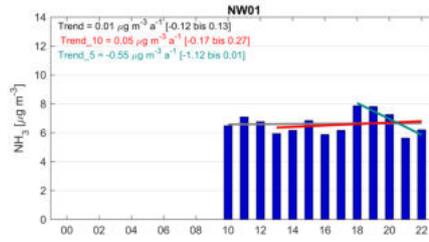
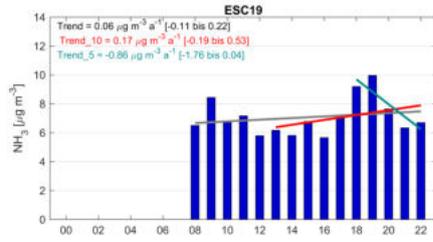


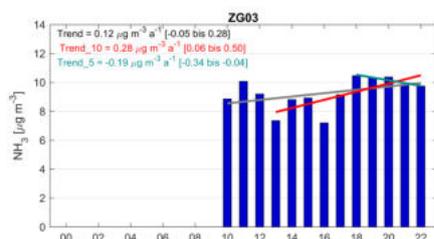
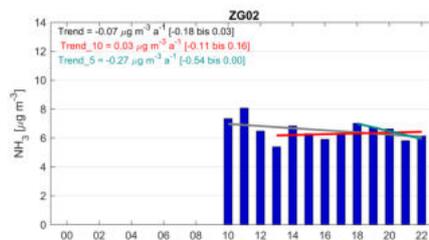
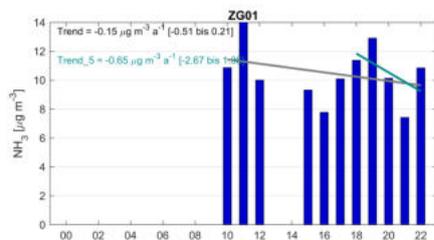
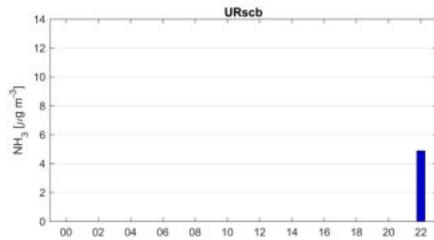
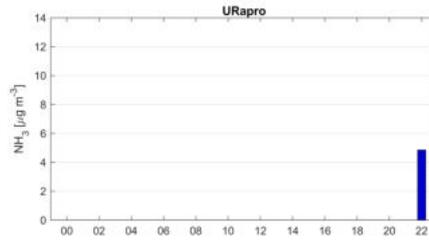
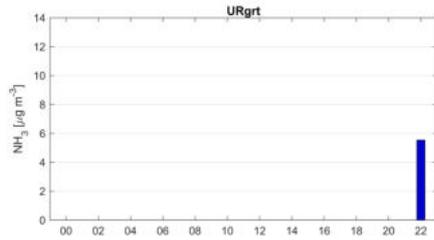
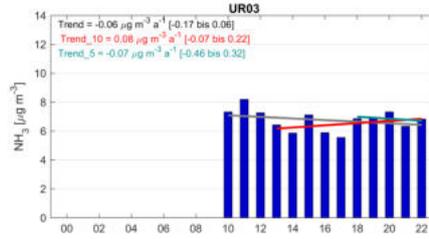
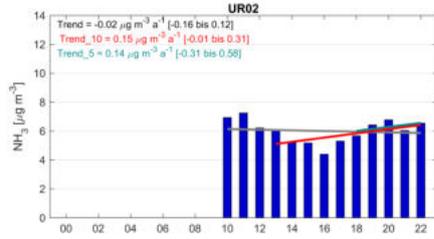
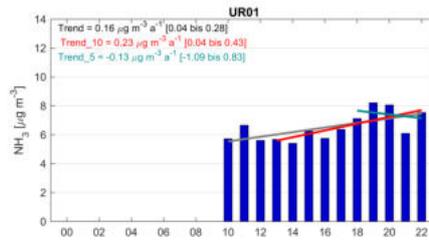
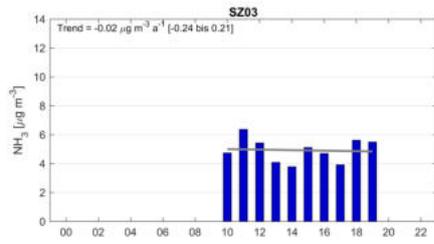
ZG02, ZG03

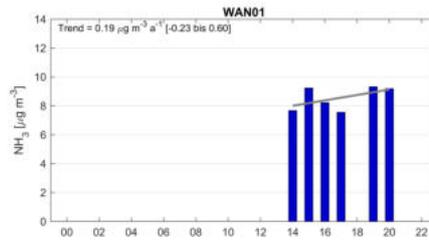
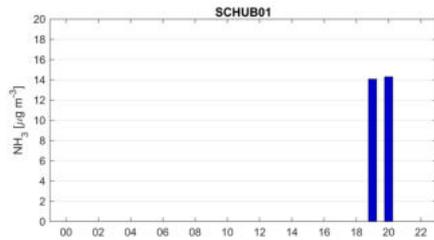
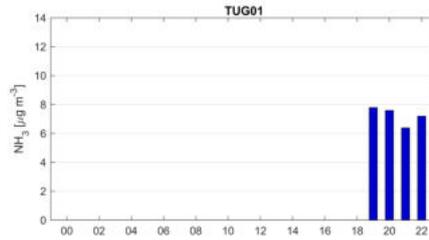
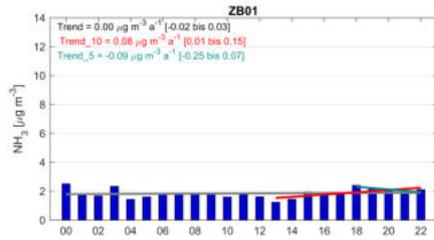
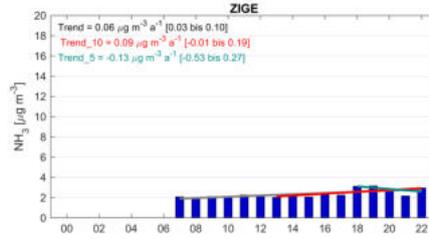
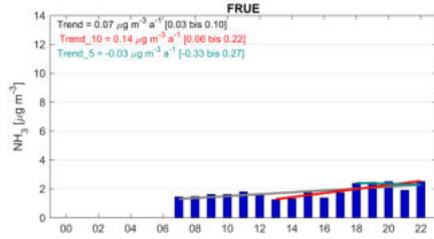
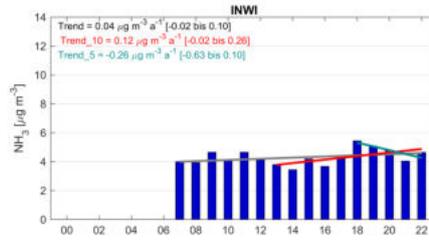
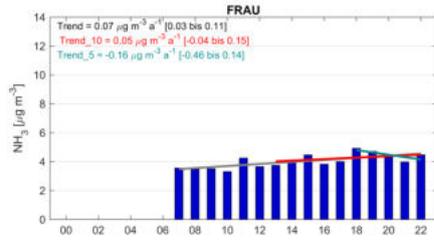
5.6.2 Jahresmittel-Trends nach Messpunkt











5.7 Anmerkungen zur statistischen Analyse

Die Trendanalysen der Daten in Kapitel 3 wurden, wie auch die restliche Datenanalyse, in Matlab durchgeführt. Für sämtliche Analysen wurde angenommen, dass die Messwerte unabhängig und gleichverteilt sind. Das Signifikanzniveau α beträgt 5 %. Als Regressionsmodell wurde das lineare Modell gewählt (Matlab: «poly1»). Das Modell kann mathematisch folgendermassen beschrieben werden:

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 * x_i + \epsilon_i \text{ mit } i = 1, \dots, n \text{ und die zufälligen Fehler } \epsilon_1, \dots, \epsilon_i \sim N(0, \sigma^2).$$

Dabei sind x_i und Y_i die gemessenen Daten, sprich die Zeit und die gemessenen Ammoniakkonzentration. β_0 entspricht dem gesuchten Achsenabschnitt und β_1 der Steigung und somit der Zunahme. Zusätzlich wird im Bericht jeweils das Vertrauensintervall für die Steigung β_1 angegeben.

Ein Vertrauensintervall gibt an, innerhalb welcher Grenzen der Parameter mit 95 % Wahrscheinlichkeit ($100-\alpha$) liegt. Um einen auf Niveau α statistisch signifikanten Trend zu zeigen, müssen beide Grenzen dieses Intervalls auf einer Seite der 0 liegen. Deshalb wird im Bericht das 95%-Vertrauensintervall des linearen Trends in eckigen Klammern aufgelistet. Daraus lässt sich somit direkt die Signifikanz ablesen. Das Vertrauensintervall für die Steigung hängt von der erwarteten Steigung, den Freiheitsgraden (d.h. Anzahl Messungen), dem gesetzten Signifikanzniveau und dem Standardfehler ab.

Weitere Informationen zum theoretischen Hintergrund können zum Beispiel in «Stahel (2012): Statistische Datenanalyse.» nachgelesen werden.

5.8 Übersicht über die Messprogramme

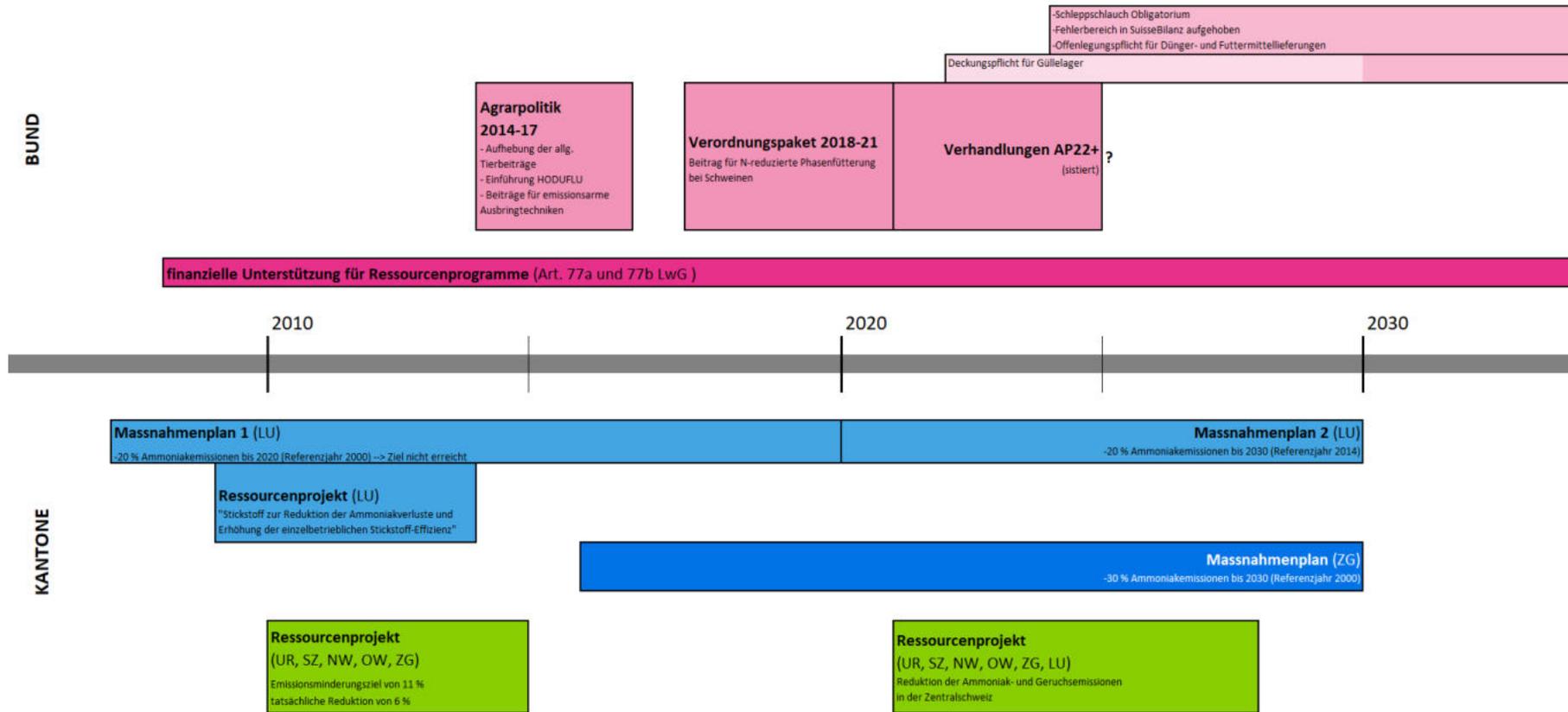


Abbildung 28: Übersicht über die Aktivitäten bezüglich Ammoniak auf nationaler Ebene und in der Zentralschweiz (Stand Anfang 2023). Es besteht keine Garantie auf Vollständigkeit.